



Mayara Gonçalves Costa

Influência do Detalhamento dos Estribos na Resistência à Punção de Lajes Lisas de Concreto Armado

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Maurício de Pina Ferreira

Belém – Pará – Brasil

2021

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Mayara Gonçalves Costa

**Influência do Detalhamento dos Estripos na Resistência à Punção de Lajes Lisas de
Concreto Armado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará como
requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Maurício de Pina Ferreira

Belém, 15 de setembro de 2021.

INFLUÊNCIA DO DETALHAMENTO DOS ESTRIBOS NA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DE LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO

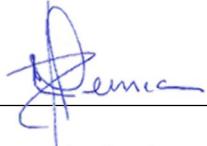
AUTORA:

MAYARA GONÇALVES COSTA

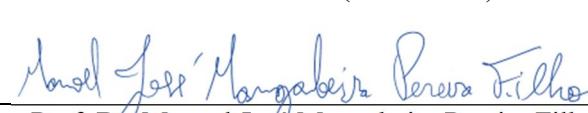
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA

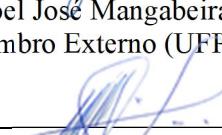
APROVADO EM: 15/09/2021.

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Mauricio de Pina Ferreira
Orientador (UFPA)


Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein
Membro Externo (UNICAMP)


Prof. Dr. Manoel José Mangabeira Pereira Filho
Membro Externo (UFPA)


Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo
Membro Interno (UFPA)

isto:

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de
Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

G635i Gonçalves Costa, Mayara.

Influência do Detalhamento dos Estripos na Resistência
à Punção de Lajes Lisas de Concreto Armado / Mayara
Gonçalves Costa. — 2021.
95 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Maurício de Pina Ferreira
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil, Belém, 2021.

1. Lajes Lisas. 2. Punção. 3. Estripos. 4.
Ancoragem. I. Título.

CDD 620.137

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Mayara Gonçalves Costa

TÍTULO: Influência do Detalhamento dos Estripos na Resistência à Punção de Lajes Lisas de Concreto Armado.

GRAU: Mestre **ANO:** 2021

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Mayara Gonçalves Costa

Av. Augusto Corrêa, no 1, Campus Universitário do Guamá, Laboratório de Engenharia Civil. Guamá, Belém, Pará. CEP 66075-970

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COSTA, M. G. Influência do Detalhamento dos Estripos na Resistência à Punção de Lajes Lisas de Concreto Armado. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

Agradecimentos

Os agradecimentos que faço aqui são destinados a todos que contribuíram diretamente na elaboração dessa dissertação, mas também, e principalmente, para aqueles que talvez nunca vão ler esse trabalho, nem mesmo esses agradecimentos, mas que sentem um orgulho imenso de mim por tê-lo feito. Então, eu começo pela minha trajetória antes mesmo do meu ingresso na universidade. Agradeço, então, a toda minha família, em especial aos meus pais, André e Sylvia, por todo amor, confiança e apoio, que contribuíram muito mais para a minha formação pessoal do que profissional, mas eu sei que muito do que foi cultivado por eles desde o período escolar foram fundamentais para que eu chegasse à UFPA, lugar em que eles não tiveram a oportunidade de estudar, mas que não pouparam esforços para que eu permanecesse. Da graduação à pós, ao meu orientador Maurício de Pina Ferreira, cujas orientações vão muito além do que foi preciso para o desenvolvimento desse trabalho. Acima de tudo, muito obrigada pela amizade. Em 2016, ao me apresentar o NUMEA, Núcleo de Modelagem Estrutural Aplicada, foi o responsável pela minha inserção na pesquisa. Desde então, a minha jornada acadêmica foi acompanhada de pessoas generosas, pacientes, engraçadas e absurdamente inteligentes. Então, aos amigos do NUMEA: Manoel, Alex, Iana, Matheus, Gleidson, Luamim, Fred, Rafael, Edir, Marília, Marcus, Denilda, Layse, Rodrigo, Thainá, Lucas, Sara, Inês e Rosalvo, obrigada. São pessoas que sempre me incentivaram a continuar, especialmente o Manoel Mangabeira e o Alex Nascimento, que merecem destaque por toda a ajuda que me deram desde o início até o fim deste trabalho. Saibam que eu considero esse trabalho nosso. E pensando no fim dessa etapa da pesquisa, lembro também das dificuldades pelas quais passei no ano de 2020, mas, como nunca estive sozinha, fica aqui meu agradecimento as minhas amigas Amanda e Fernanda, ao amigo Odivaldo e ao meu namorado Abinael, pelo suporte emocional que me deram. Chega, então, o momento de pensar na entrega e defesa dessa dissertação. Então, finalmente, agradeço aos membros da banca por todas as contribuições feitas nesse trabalho.

Resumo

COSTA, M. G. Influência do Detalhamento dos Estripos na Resistência à Punção de Lajes Lisas de Concreto Armado. Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil. 2021.

Estripos utilizados como armadura de combate à punção em lajes lisas de concreto armado podem proporcionar ganhos de resistência às regiões de ligação laje-pilar. Para tal, as normas recomendam que seus detalhamentos sejam feitos de modo a garantir sua ancoragem nas barras da armadura de flexão, envolvendo-as. Entretanto, projetos que seguem rigorosamente os critérios de detalhamento podem tornar-se de difícil execução, ou até inexequíveis, devido a concentração de barras longitudinais nessas regiões. A necessidade por mais praticidade na montagem dos estribos impulsionou o desenvolvimento de sistemas de reforço, cujos detalhamentos de suas ancoragens ainda não estão contemplados nas prescrições normativas. Então, se faz necessária a validação, no meio científico, de tais alternativas construtivas. Nesse contexto, este trabalho busca contribuir para o processo de validação de inúmeras alternativas construtivas para estribos utilizados como armadura de punção, para que, dessa forma, elas possam ser devidamente difundidas no meio técnico, tendo como objetivo avaliar a influência da variação da ancoragem de estribos sobre sua eficiência, a partir de uma extensa revisão da literatura científica, que possibilitou a montagem de um banco de dados onde constam 119 ensaios de punção em ligações laje-pilar interno, submetidas a carregamento simétrico. Os parâmetros de análise foram os incrementos de resistência proporcionados em função do acréscimo de força desempenhada pela armadura de cisalhamento. Ao final, foram definidos os detalhamentos de ancoragem mais eficientes para diferentes tipos de estribos utilizados como armadura de punção e, para tais estribos, instruções de montagem foram propostas, visando a otimização do processo construtivo.

Palavras-chave

Lajes Lisas, Punção, Estripos, Ancoragem

Abstract

COSTA, M. G. Influence of Stirrup Detailing on the Punching Resistance of Reinforced Concrete Flat Slabs. MSc Thesis, Institute of Technology, Federal University of Pará, Belém, Pará, Brazil. 2021.

Stirrups used as punching shear reinforcement in reinforced concrete flat slabs can provide strength gains to the regions of slab-column connection. To this end, the standards recommend that the details should be made in order to ensure their anchorage in the flexural reinforcement bars, involving them. However, designs that strictly follow the detailing criteria may become difficult to execute, or even unfeasible, due to the concentration of longitudinal bars in these regions. The need for more practicality in the assembly of stirrups has driven the development of reinforcement systems, whose anchorage details are not yet contemplated in the normative prescriptions. Therefore, the scientific validation of such constructive alternatives is necessary. In this context, this work seeks to contribute to the validation process of numerous constructive alternatives for stirrups used as punching shear reinforcement, so that, in this way, they can be properly disseminated in the technical environment. The objective of this work is to evaluate the influence of the variation of the stirrups anchorage on its efficiency, from an extensive review of scientific literature, which enabled the assembly of a database containing 119 punching shear tests in internal slab-column connections, subjected to symmetric loading. The analysis parameters were the increments of strength provided as a function of the increase of force played by the shear reinforcement. At the end, the most efficient anchorage details for different types of stirrups used as punching shear reinforcement were defined and, for such stirrups, assembly instructions were proposed, aiming the optimization of the constructive process.

Keywords

Flat Slabs, Punching Shear, Stirrups, Anchorage

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Tipos de estribos utilizados como armadura de cisalhamento contra punção em ligações laje-pilar: (a) fechados, (b-c) abertos, (d) contínuos, (e) individuais; e (f-h) treliçados.	17
.....
Figura 1.2 – Alternativas construtivas para armadura de punção do tipo estribo.	17
Figura 1.3 – Perfil de tensões nas camadas de armadura de cisalhamento.	19
Figura 2.1 – Fissuras na ligação laje-pilar associadas ao fenômeno da punção.	23
Figura 2.2 – Modos de ruptura de ligações laje-pilar armadas ao cisalhamento.	24
Figura 2.3 – Influência do tipo de armadura de cisalhamento na resistência ao esmagamento da biela adjacente ao pilar (adaptado de EINPAUL <i>et al.</i> , 2016).	26
Figura 2.4 – Influência da taxa de armadura de cisalhamento na inclinação da superfície da ruptura por tração diagonal dentro da região armada ao cisalhamento (SCHMIDT <i>et al.</i> , 2019).	26
Figura 2.5 – Principais tipos de estribos utilizados em ligações laje-pilar.	28
Figura 2.6 – Possíveis arranjos de estribos utilizados em ligações laje-pilar.	29
Figura 2.7 – Ativação da ancoragem em concreto não-fissurado (Adapt. de BRANTSCHEN, 2016).	30
Figura 2.8 – Resistência da ancoragem à ruptura do cone de concreto (Adapt. de REGAN, 2000).	31
Figura 2.9 – Influência da barra longitudinal (simplesmente disposta ou soldada) no comportamento de diferentes geometrias de barras dobradas de superfície lisa (Adapt. de LEONHARDT e WALTHER, 1965).	32
Figura 2.10 – Influência da barra longitudinal (simplesmente disposta) no comportamento de diferentes geometrias de barras dobradas de superfície rugosa (Adapt. de SILVA, 2018).	33
Figura 2.11 – Influência da fissuração do concreto no comportamento de diferentes geometrias de barras de superfície rugosa (Adapt. de BRANTSCHEN <i>et al.</i> 2016).	34
Figura 2.12 – Especificações de ancoragem de estribos de acordo com o ACI 318 (2019).	36
Figura 2.13 – Especificações de ancoragem de estribos de acordo com o EUROCODE 2 (2014).	38
Figura 2.14 – Especificações de ancoragem de estribos de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014).	39
Figura 2.15 – Especificações de ancoragem de estribos de acordo com o <i>fib</i> MODEL CODE 2010 (2013).	41

Figura 3.1 – Tipos de estribos individuais usados como armadura de combate à punção.	43
Figura 3.2 – Tipos de estribos fechados usados como armadura de combate à punção.....	44
Figura 3.3 – Tipos de estribos abertos usados como armadura de combate à punção.	45
Figura 3.4 – Tipos de estribos contínuos usados como armadura de combate à punção.	46
Figura 3.5 – Tipos de estribos treliçados usados como armadura de combate à punção.	47
Figura 3.6 – Arranjos para estribos usados como armadura de combate à punção.	49
Figura 3.7 – Linhas de ruptura utilizadas para estimar a resistência à flexão das lajes (adaptado de KOPPITZ <i>et al.</i> , 2014).....	50
Figura 3.8 – Armadura de cisalhamento considerada para o cálculo da resistência à punção de acordo com as normas.	52
Figura 3.9 – Modelo de gráfico para avaliação dos acréscimos de resistência à punção proporcionados pela armadura de cisalhamento.....	53
Figura 3.10 – Modelos de gráfico para avaliação da segurança proporcionada pela armadura de cisalhamento.	54
Figura 5.1 – Acréscimos de resistência à punção obtidos por estribos individuais.....	60
Figura 5.2 – Acréscimos de resistência à punção obtidos por estribos fechados.	61
Figura 5.3 – Acréscimos de resistência à punção obtidos por estribos abertos.	63
Figura 5.4 – Acréscimos de resistência à punção obtidos por estribos contínuos.	64
Figura 5.5 – Acréscimos de resistência à punção obtidos por estribos treliçados.	65
Figura 5.6 – Segurança dos estribos individuais verificada pelas equações do ACI 318 (2019).	67
Figura 5.7 – Segurança dos estribos fechados verificada pelas equações do ACI 318 (2019).67	67
Figura 5.8 – Segurança dos estribos abertos verificada pelas equações do ACI 318 (2019)...68	68
Figura 5.9 – Segurança dos estribos contínuos verificada pelas equações do ACI 318 (2019).	68
Figura 5.10 – Segurança dos estribos treliçados verificada pelas equações do ACI 318 (2019).	69
Figura 5.11 – Segurança dos estribos individuais verificada pelas equações do EUROCODE 2 (2014).	70
Figura 5.12 – Segurança dos estribos fechados verificada pelas equações do EUROCODE 2 (2014).	70
Figura 5.13 – Segurança dos estribos abertos verificada pelas equações do EUROCODE 2 (2014).	71

Figura 5.14 – Segurança dos estribos contínuos verificada pelas equações do EUROCODE 2 (2014)	71
Figura 5.15 – Segurança dos estribos treliçados verificada pelas equações do EUROCODE 2 (2014)	72
Figura 5.16 – Segurança dos estribos individuais verificada pelas equações da ABNT NBR 6118 (2014)	74
Figura 5.17 – Segurança dos estribos fechados verificada pelas equações da ABNT NBR 6118 (2014)	74
Figura 5.18 – Segurança dos estribos abertos verificada pelas equações da ABNT NBR 6118 (2014)	75
Figura 5.19 – Segurança dos estribos contínuos verificada pelas equações da ABNT NBR 6118 (2014)	75
Figura 5.20 – Segurança dos estribos treliçados verificada pelas equações da ABNT NBR 6118 (2014)	76
Figura 5.21 – Segurança dos estribos individuais verificada pelas equações do <i>fib</i> MODEL CODE 2010 (2013).....	77
Figura 5.22 – Segurança dos estribos fechados verificada pelas equações do <i>fib</i> MODEL CODE 2010 (2013).....	77
Figura 5.23 – Segurança dos estribos abertos verificada pelas equações do <i>fib</i> MODEL CODE 2010 (2013)	78
Figura 5.24 – Segurança dos estribos contínuos verificada pelas equações do <i>fib</i> MODEL CODE 2010 (2013).....	78
Figura 5.25 – Segurança dos estribos treliçados verificada pelas equações do <i>fib</i> MODEL CODE 2010 (2013).....	79
Figura 5.26 – Eficiência dos estribos na resistência à punção.....	81
Figura 5.27 – Propostas de montagem de estribos para reforço à punção de ligação laje-pilar interno.....	83
Figura 5.28 – Propostas de montagem de estribos para reforço à punção de pilar interno (Continuação).....	84
Figura 5.29 – Propostas de montagem de estribos para reforço à punção de pilar interno (Continuação).....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Síntese da metodologia normativa do ACI 318 (2019) para estimar a resistência à punção de ligação laje-pilar.....	36
Tabela 2.2 – Síntese da metodologia normativa do EUROCODE 2 (2014) para estimar a resistência à punção de ligação laje-pilar.	37
Tabela 2.3 – Síntese da metodologia normativa da ABNT NBR 6118 (2014) para estimar a resistência à punção de ligação laje-pilar.	39
Tabela 2.4 – Síntese da metodologia normativa do <i>fib</i> MODEL CODE 2010 (2013) para estimar a resistência à punção de ligação laje-pilar.....	41
Tabela 4.1 – Principais características das lajes ensaiadas com estribos individuais.....	55
Tabela 4.2 – Principais características das lajes ensaiadas com estribos fechados	56
Tabela 4.3 – Principais características das lajes ensaiadas com estribos abertos.....	57
Tabela 4.4 – Principais características das lajes ensaiadas com estribos contínuos.....	57
Tabela 4.5 – Principais características das lajes ensaiadas com estribos treliçados.....	58
Tabela 5.1 – Propostas de detalhamento de estribos para reforço à punção de ligação laje-pilar interno.....	82

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{sw}	Área de aço das armaduras de cisalhamento
$A_{sw,1+2}$	Soma das áreas de aço da primeira e segunda camada de armadura de cisalhamento
C	Dimensão do pilar
d	Altura útil da laje
d_b	Diâmetro da barra
d_g	Diâmetro máximo do agregado
d_v	Altura útil reduzida
E_{sw}	Módulo de elasticidade da armadura de cisalhamento
f_b	Tensão de aderência da armadura de cisalhamento
f_c	Resistência a compressão do concreto
f_{ck}	Resistência a compressão característica do concreto
f_{ys}	Tensão de escoamento da armadura de flexão
f_{ysw}	Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento
$f_{ysw,ef}$	Tensão efetiva na armadura de cisalhamento
f_{sw}	Tensão na armadura de cisalhamento
h	Altura total da laje
h_{ef}	Comprimento de embutimento
k	Efeito de escala
k_{dg}	Fator que leva em consideração a rugosidade da superfície de fissura, segundo o <i>fib Model Code 2010 (2013)</i>
k_{sys}	Fator que considera o desempenho da armadura de cisalhamento, segundo o <i>fib Model Code 2010 (2013)</i>
k_ψ	Fator que depende da rotação da laje, segundo o <i>fib Model Code 2010 (2013)</i>
M_R	Momento resistente da laje
M_S	Momento solicitante da laje
r_q	Raio de carregamento da laje
s	Distância a contar da face do pilar
s_0	Espaçamento inicial das camadas de armadura
s_r	Espaçamento das camadas de armadura
u_1	Perímetro de controle interno à região das armaduras

u_{out}	Perímetro de controle externo à região das armaduras
$V_{R,cs}$	Resistência à punção para ruptura por tração diagonal dentro da região das armaduras
$V_{Rcs,teo}$	Resistência teórica à punção para ruptura por tração diagonal dentro da região das armaduras
$V_{R,max}$	Resistência à punção para ruptura por esmagamento da biela adjacente ao pilar
$V_{R,out}$	Resistência à punção para ruptura por tração diagonal fora da região das armaduras
$V_{R,s}$	Parcela resistente à punção atribuída às armaduras de cisalhamento
$V_{R,teo}$	Resistência teórica à punção de uma ligação laje/pilar
V_{Rc}	Parcela resistente à punção atribuída ao concreto
V_{REF}	Resistência da laje de referência
$V_{Rc,teo}$	Parcela resistente teórica à punção atribuída ao concreto
$V_{R,flex}$	Resistência à flexão da laje
$V_{Rs,teo}$	Parcela resistente teórica à punção atribuída às armaduras de cisalhamento
V_u	Carga última de ensaio
η_1	Fator da tensão de aderência da armadura de cisalhamento relacionado a superfície da barra
η_2	Fator da tensão de aderência da armadura de cisalhamento relacionado ao material da barra
ρ	Taxa de armadura de flexão da laje
ρ_{sw}	Taxa de armadura de cisalhamento
ρ_x	Taxa de armadura de flexão na direção “x” da laje
ρ_y	Taxa de armadura de flexão na direção “y” da laje
ν	Fator de redução da eficiência da resistência à compressão do concreto da biela, segundo a NBR 6118 (2014)
ϕ_{sw}	Diâmetro da armadura de cisalhamento
ψ	Rotação da laje

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. MOTIVAÇÃO	20
1.2. OBJETIVOS	20
1.2.1. Objetivo Geral	20
1.2.2. Objetivos Específicos	20
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1. PUNÇÃO EM LIGAÇÕES LAJE-PILAR	22
2.1.1. Aspectos Gerais	22
2.1.2. Modos de ruptura de lajes armadas ao cisalhamento	24
2.2. ARMADURAS DE CISALHAMENTO PARA LIGAÇÕES LAJE-PILAR DO TIPO ESTRIBO	27
2.2.1. Tipos	27
2.2.2. Arranjos	28
2.2.3. Ancoragem	29
2.3. MÉTODOS NORMATIVOS PARA ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA À PUNÇÃO	35
2.3.1. ACI 318 (2019)	35
2.3.2. EUROCODE 2 (2014)	37
2.3.3. ABNT NBR 6118 (2014)	38
2.3.4. <i>fib</i> MODEL CODE 2010 (2013)	39
3. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS ESTRIBOS	42
3.1. COLETA DE DADOS	42
3.1.1. Estripos Individuais	42
3.1.2. Estripos Fechados	43
3.1.3. Estripos Abertos	44
3.1.4. Estripos Contínuos	45
3.1.5. Estripos Treliçados	46
3.2. CRITÉRIOS DE FILTRAGEM DE DADOS	50
3.3. TRATAMENTO DE DADOS	51
3.4. PARÂMETROS DE ANÁLISE	52
4. BANCO DE DADOS	55

5. RESULTADOS	59
5.1. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA ANCORAGEM	59
5.2. AVALIAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE RESISTÊNCIA À PUNÇÃO	66
5.2.1. ACI 318 (2019)	66
5.2.2. EUROCODE 2 (2014)	69
5.2.3. ABNT NBR 6118 (2014)	72
5.2.4. <i>fib</i> MODEL CODE 2010 (2013)	76
5.3. PROPOSTAS DE DETALHAMENTO E INSTALAÇÃO	79
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

1. INTRODUÇÃO

Na concepção do projeto, se o emprego de um sistema estrutural com lajes lisas for o mais adequado, isto é, se dentre as demais alternativas para estruturas de concreto armado, aquele em que as lajes são apoiadas diretamente sobre os pilares for o que atende satisfatoriamente aos requisitos de segurança, durabilidade e economia, o projetista deverá preocupar-se com as suas particularidades, como a redução da rigidez da edificação quanto às ações horizontais, a flecha excessiva nos vãos dos pavimentos e a possibilidade de ruptura por punção.

A punção é o ponto mais crítico para a segurança desse tipo de sistema. É um modo de ruptura frágil caracterizado pelo destacamento de um tronco de cone de concreto na região de ligação laje-pilar que pode levar a edificação à ruína devido ao colapso progressivo, mas que, pode ser controlado, ou evitado, através da utilização de armaduras de cisalhamento, que proporcionam ductilidade ao comportamento na ruptura, devido a contribuição do aço, podendo elevar a resistência ao ponto de mudar o modo de ruptura da laje para flexão, como confirmaram estudos realizados tanto em pesquisas experimentais (VOLLUM *et al.*, 2010; SCHMIDT *et al.*, 2019) ou analíticas (RUIZ e MUTTONI, 2009; BROMS, 2019) quanto em análises de casos reais de acidentes por ação da punção (WOOD, 2001; MUTTONI *et al.*, 2005; SUBRAMANIAN, 2014).

Os estribos são um dos tipos mais tradicionais de armadura de cisalhamento em lajes lisas devido a simplicidade da sua confecção e eficiência, uma vez que podem aumentar a capacidade de deformação e a resistência à punção das ligações laje-pilar, atestado pelos ensaios de CHANA e DESAI (1992), LIPS (2012), SCHMIDT *et al.* (2019), entre outros. No entanto, a necessidade por mais praticidade na montagem e instalação dessa armadura direcionou os esforços científicos à investigação de sistemas de reforço cujas ancoragens não obedecem aos critérios normativos que preconizam detalhamentos feitos de modo a garantir a ancoragem dos estribos nas barras da armadura de flexão, envolvendo-as, como faz a norma americana ACI 318 (2019), o EUROCODE 2 (2014) na Europa e, no Brasil, a ABNT NBR 6118 (2014).

A Figura 1.1 apresenta alguns tipos de armaduras de punção constituídas por estribos encontrados na literatura científica. Por meio da Figura 1.1 é possível observar, além da variedade de geometrias, que determina a classificação em fechados, abertos, contínuos,

individuais e treliçados, as variações nos detalhes das suas ancoragens, que caracterizam alternativas construtivas para garantir mais praticidade ao processo construtivo.

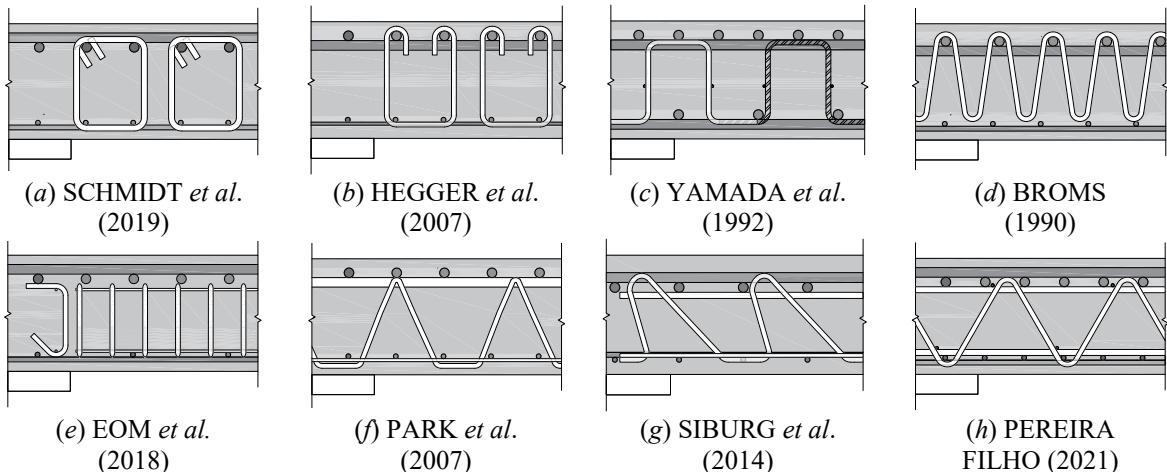


Figura 1.1 – Tipos de estribos utilizados como armadura de cisalhamento contra punção em ligações laje-pilar: (a) fechados, (b-c) abertos, (d) contínuos, (e) individuais; e (f-h) treliçados.

Algumas dessas alternativas vêm se consolidando cada vez mais no mercado brasileiro. A Figura 1.2 apresenta alguns exemplos de armaduras de punção sendo executadas com estribos cujas ancoragens não obedecem aos padrões normativos. Na Figura 1.2a os estribos fechados estão ancorados por dobra apenas ao redor das barras tracionadas. Na Figura 1.2b os estribos contínuos estão distribuídos de forma a dificultar a ancoragem em qualquer barra de flexão.



Figura 1.2 – Alternativas construtivas para armadura de punção do tipo estribo.

Como toda armadura, a eficiência dos estribos está relacionada à máxima tensão desenvolvida nas suas barras. A Figura 1.3 mostra a variação da razão entre a tensão média em cada camada

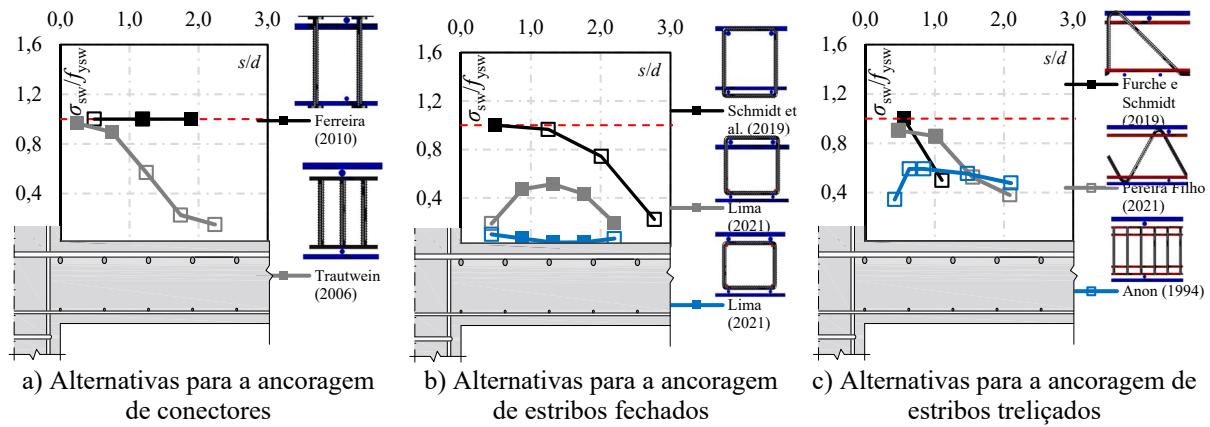
da armadura de cisalhamento (σ_{sw}) e a tensão de escoamento da armadura de cisalhamento (f_{ysw}) para estágios de carregamento próximos à ruptura por punção interna à região armada. Os espécimes selecionados representam os melhores resultados obtidos dentro de diversos programas experimentais, embora todos apresentem características de geometria e de materiais semelhantes, incluindo a taxa de armadura de flexão e cisalhamento, assim como os demais parâmetros que influenciam na resistência à punção.

A Figura 1.3a apresenta os resultados para *double headed studs* com ancoragem na altura das barras de flexão da laje LC06 de FERREIRA (2010) e de uma alternativa de conectores com ancoragem entre as barras de flexão da laje I11 de TRAUTWEIN (2006), denominada “stud interno”. Ambos proporcionaram incrementos de resistência satisfatórios, porém a ativação das camadas mais distantes dos conectores de TRAUTWEIN (2006) decai de forma expressiva, embora as superfícies de ruptura de ambas as lajes não tenham apresentado a mesma inclinação, logo, não interceptaram as mesmas camadas de armadura de cisalhamento.

Comportamento semelhante pode ser observado na Figura 1.3b, com a variação na ancoragem de estribos fechados. Estribos com ancoragem envolvendo as barras da armadura de flexão superior e inferior da laje A2-10 de SCHMIDT *et al.* (2019) possuem capacidade de ancoragem suficiente para o escoamento das camadas mais próximas ao pilar, enquanto estribos ancorados apenas na armadura de flexão superior ou com ancoragem interna às barras de flexão das lajes TA-04 e NA-04 de LIMA (2021) alcançam, respectivamente, 51% e 10% da tensão de escoamento nas camadas com maior ativação.

A Figura 1.3c apresenta os resultados para os estribos treliçados testados por FURCHE e SCHMIDT (2019) na laje V4kO, que consistem em treliças espaciais compostas por diagonais e montantes com inclinações alternadas que possuem as dobras de ancoragem inferiores posicionadas em placas de concreto pré-moldado e a superiores no nível das barras de flexão, sem envolvê-las, nas quais a primeira camada instrumentada, correspondente a diagonal inclinada em 45°, houve o escoamento do aço. Também é observado que na laje SW6 de PEREIRA FILHO (2021) nas duas primeiras camadas de um sistema composto por treliças planas pré-fabricadas unidas em módulos independentes da armadura de flexão mais de 80% da tensão de escoamento é atingida e na terceira camada ainda há o desenvolvimento de 52% da tensão de escoamento. Embora essa seja a única laje onde não foi realizado o corte após o ensaio, de acordo com o autor, as deformações, concentradas nas duas primeiras camadas,

foram semelhantes do início ao fim do ensaio provavelmente em virtude da inclinação das armaduras de cisalhamento (em 60°), que favoreceu que a fissura de cisalhamento cortasse as duas camadas deixando comprimentos de ancoragem equivalentes. Na laje 4 de ANON (1994) somente a camada mais próxima ao pilar apresenta ativação menor que 50% da tensão de escoamento, tratando-se de estribos treliçados compostos por módulos de barras verticais soldadas em cada extremidade a duas barras longitudinais internas às barras de flexão, embora nenhuma camada tenha sido interceptada pela superfície de ruptura, pois esta não se apresentou de forma nítida, mas acompanhada de fissuras de delaminação.



* **Observação:** Os pontos com preenchimento sólido indicam as camadas de armadura de cisalhamento que foram interceptadas pela superfície de ruptura identificada através dos cortes dos espécimes ensaiados.

Figura 1.3 – Perfil de tensões nas camadas de armadura de cisalhamento.

Portanto, as diferenças significativas que surgem nos perfis de tensão apresentados na Figura 1.3 evidenciam a influência da ancoragem no desempenho da armadura de cisalhamento, principalmente no caso particular da utilização em elementos delgados como lajes, onde os pequenos embutimentos fazem com que o comportamento aderente das barras esteja sujeito aos mecanismos de ancoragem nas suas extremidades, como apontado em BEUTEL e HEGGER (2002), HEGGER *et al.* (2007) e EINPAUL *et al.* (2016).

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma extensa revisão da literatura científica que possibilitou a montagem de um banco de dados onde constam 119 resultados de ensaios de punção em ligações laje-pilar interno com a utilização de diversos tipos de estribos como armadura de punção, sobre os quais foram feitas análises de eficiência através dos incrementos de resistência proporcionados em função do acréscimo de força desempenhada pela armadura de cisalhamento. Ao final, foram definidos os detalhamentos de ancoragem mais eficientes para

diferentes tipos de estribos utilizados como armadura de punção, e, para tais estribos, instruções de detalhamento e montagem foram propostas, visando a otimização do processo construtivo.

1.1. MOTIVAÇÃO

Estríbos utilizados como armadura de combate à punção proporcionam ganhos de resistência última às ligações laje-pilar, para tal, as recomendações normativas estabelecem critérios de detalhamento de modo a garantir a ancoragem dos estribos por meio das dobras ao redor das barras da armadura de flexão. Na prática, a execução da montagem desse tipo de armadura pode apresentar dificuldades, demandar muito tempo e até ser inexistente, devido à concentração de barras de armadura de flexão nessas regiões. Dessa forma, trabalhos como os de YAMADA *et al.* (1992), REGAN e SAMADIAN (2001), ELIGEHAUSEN *et al.* (2003), PARK *et al.* (2007), HAUSLER (2009), CALDENTEY *et al.* (2013) e EOM *et al.* (2018) trataram de desenvolver alternativas para a ancoragem dos estribos como solução para evitar eventuais conflitos e ganhar produtividade. Embora ainda não haja normalização que assegure o dimensionamento seguro, algumas dessas alternativas já estão sendo executadas no mercado da construção civil. Neste contexto, este trabalho colabora para o processo de validação no meio científico de inúmeras alternativas construtivas para estribos, para que, dessa forma, elas possam ser devidamente difundidas no meio técnico.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral contribuir para o conhecimento acerca da eficiência de diferentes alternativas para ancoragem de estribos utilizados como armadura de punção.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Apresentar uma revisão das variações da ancoragem de estribos utilizados como armadura de punção;
- Avaliar a influência da variação da ancoragem de estribos utilizados como armadura de punção sobre sua capacidade de proporcionar acréscimos de resistência;

- Verificar a segurança de lajes dimensionadas pelas propostas de cálculo para estimativa de resistência à punção do ACI 318 (2019), EUROCODE 2 (2014), ABNT NBR 6118 (2014) e *fib* MODEL CODE 2010 (2013), considerando a utilização das variações da ancoragem dos estribos que fogem às regras de detalhamento dessas normas para ancoragem de estribos.
- Definir critérios de detalhamento para a ancoragem dos estribos mais eficientes utilizados como armadura de punção;
- Propor processos de montagem de armaduras de cisalhamento na construção de lajes lisas com pilar interno utilizando os estribos que proporcionaram níveis satisfatórios de eficiência de acordo com a avaliação feita neste trabalho;

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O *capítulo 1* apresenta a problemática tratada nessa dissertação, a motivação e objetivos, geral e específicos.

O *capítulo 2* apresenta uma breve revisão da literatura do fenômeno da punção e das diversas armaduras de cisalhamento do tipo estribo, assim como os principais aspectos da sua ancoragem para a resistência à punção. Também são apresentados os critérios de ancoragem e de cálculo das seguintes normas: ACI 318 (2019), EUROCODE 2 (2014), ABNT NBR 6118 (2014) e *fib* MODEL CODE 2010 (2013).

O *capítulo 3* apresenta a metodologia utilizada para a avaliação da eficiência dos estribos, que consistiu na montagem de um banco de dados, envolvendo as etapas de coleta, tratamento dos dados e escolha dos parâmetros de análise.

O *capítulo 4* apresenta o banco de dados com os 119 resultados de ensaios de punção em ligações laje-pilar interno dividido em cinco grandes grupos definidos pelos tipos: estribos individuais, fechados, abertos, contínuos e treliçados.

O *capítulo 5* contém os resultados dessa dissertação apresentados em diversos gráficos por meios dos quais foi feita a análise da influência da variação da ancoragem dos estribos e a verificação da segurança de lajes dimensionadas pelas propostas de cálculo normativas considerando a utilização de tais variações da ancoragem;

O *capítulo 6* contém as conclusões dessa dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feita, inicialmente, uma breve revisão da literatura sobre os principais aspectos da punção em lajes lisas, bem como o comportamento diante dos modos de ruptura que estão ligados a este fenômeno. Em seguida, são apresentadas as diversas características relacionadas aos estribos utilizados como armadura de combate à punção em ligações laje-pilar, como os tipos, arranjos típicos e ancoragem. Por fim, são descritos os critérios normativos, restritos a pilares internos, quanto ao dimensionamento à punção de lajes lisas de concreto armado submetidas à carregamento simétrico. As seguintes normas são abordadas: ACI 318 (2019), EUROCODE 2 (2014), ABNT NBR 6118 (2014), e *fib* MODEL CODE 2010 (2013).

2.1. PUNÇÃO EM LIGAÇÕES LAJE-PILAR

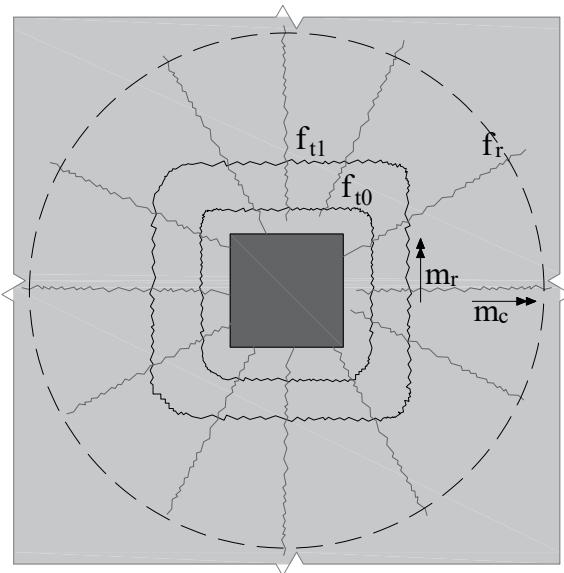
2.1.1. Aspectos Gerais

Projetos estruturais de concreto armado que utilizam sistemas de lajes apoiadas diretamente sobre os pilares, denominadas de lajes lisas, podem ser governados pela possibilidade de uma ruptura abrupta, sem aviso, nas proximidades da região de ligação entre a laje e o pilar, associada à punção devido à concentração de esforços cortantes e momentos negativos de alta intensidade que se desenvolvem nessa região.

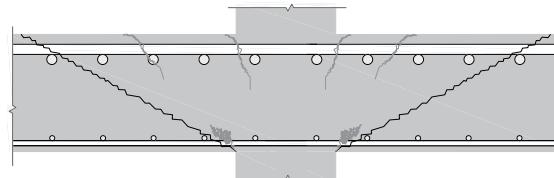
A depender da distribuição desses esforços, que são influenciados pela geometria do pavimento, do carregamento, das condições de contorno e da distribuição das armaduras de flexão, a punção pode ser simétrica, assimétrica ou excêntrica. Então, quando estes fatores geram esforços simétricos em relação aos eixos de simetria da ligação laje-pilar, a punção é dita simétrica. Quando houver assimetria na distribuição dos esforços, a punção será assimétrica. E a punção excêntrica ocorrerá quando houver transferência de momento fletor na ligação.

Diversas investigações em lajes sem armaduras de cisalhamento, como as de MUELLER *et al.* (1984) e REGAN (1985), fundamentaram normas como o CEB-FIP MC90 (1993), EUROCODE 2 (2014) e a ABNT NBR 6118 (2014) a admitirem a previsão de que a superfície de ruptura por punção forma um ângulo de aproximadamente 26° com o plano da laje, com origem na face do pilar, em forma de cone, assim como determinaram o padrão de fissuração,

o qual depende fundamentalmente se a laje é unidirecional ou bidirecional, da geometria e do tamanho do pilar, onde, na face tracionada em direção a face comprimida, as primeiras fissuras a surgirem são fissuras tangenciais (f_{t0}), que contornam o pilar, causadas pelo momento radial (m_r). Posteriormente, surgem as fissuras radiais (f_r) em função do momento circunferencial (m_c). E, por fim, outras fissuras tangenciais vão surgindo (como f_{tl}) em níveis de carregamento próximos à carga de ruptura. As principais fissuras relacionadas ao fenômeno da punção estão ilustradas na Figura 2.1.



a) Padrão de fissuração de uma ligação laje-pilar em laje bidirecional apoiada em pilar interno sem momentos desbalanceados



b) Seção de uma ligação laje-pilar com cone de punção

Figura 2.1 – Fissuras na ligação laje-pilar associadas ao fenômeno da punção.

Na etapa de projeto é possível adotar algumas soluções para aumentar a resistência da ligação laje-pilar e, dessa forma, até evitar a ruptura por punção, como aumentar a resistência do concreto, a taxa da armadura de flexão, a seção transversal do pilar ou a espessura da laje, uma vez que os principais fatores que influenciam na resistência à punção de lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento são: a resistência à compressão do concreto, a taxa de armadura de flexão tracionada, o tamanho e geometria do pilar e a altura útil da laje.

No entanto, aumentar a seção do pilar (ou utilizar ábacos e capitéis) produzem incompatibilidades arquitetônicas. Aumentar a espessura da laje acarreta problemas econômicos, pois aumenta o peso próprio da estrutura, elevando as cargas nas fundações. E aumentar a resistência do concreto ou a taxa de armadura de flexão são opções pouco eficientes.

Dessa forma, atualmente, a solução técnico-econômico considerada mais eficiente é a utilização de armaduras de cisalhamento, como confirmaram os estudos de YAMADA *et al.* (1992), OLIVEIRA *et al.* (2000) e BEUTEL e HEGGER (2002) ao mostrarem a eficiência de diferentes tipos de estribos no combate à punção.

2.1.2. Modos de ruptura de lajes armadas ao cisalhamento

Quando armada ao cisalhamento, a ligação laje-pilar fica sujeita a diversos modos de ruptura. A ruptura pode ocorrer por flexão, por punção (pela compressão da biela de concreto adjacente ao pilar, por tração diagonal dentro da região armada ou por tração diagonal fora da região das armaduras de cisalhamento) e por falha de ancoragem da armadura de cisalhamento, também conhecida como delaminação, como ilustra a Figura 2.2.

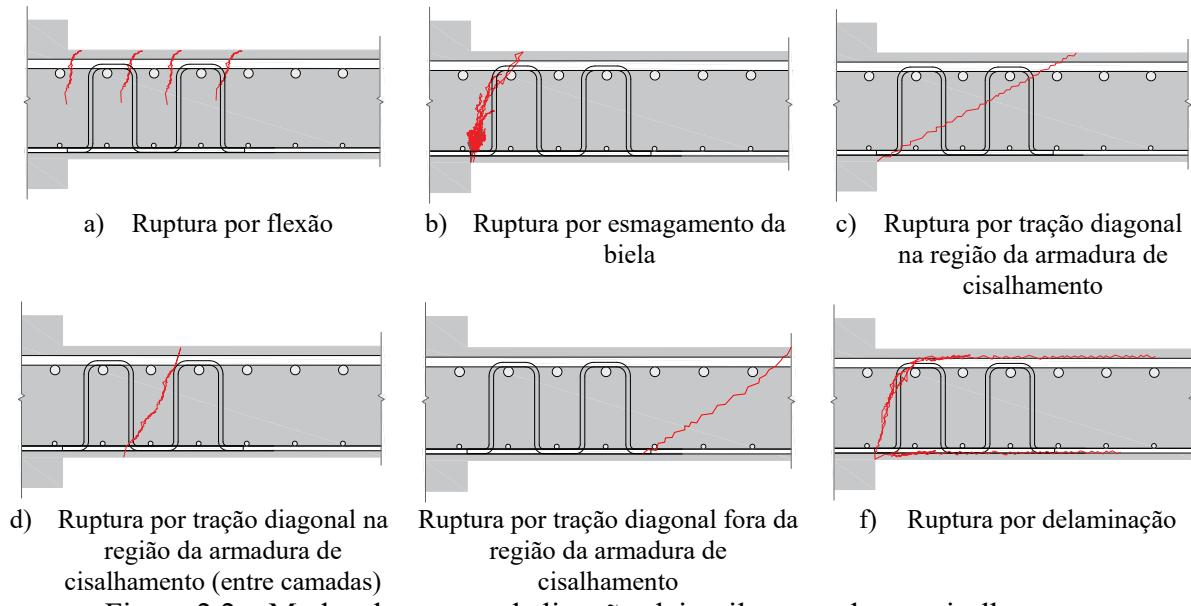


Figura 2.2 – Modos de ruptura de ligações laje-pilar armadas ao cisalhamento.

A ruptura por flexão é o modo de ruína que apresenta o comportamento mais deformável, com elevado grau de fissuração, escoamento da armadura de flexão e o concreto da face comprimida da laje na iminência de esmagar. Por esses motivos, é comum que os projetistas dimensionem os elementos de concreto armado visando que, em caso de falha, a estrutura venha a ruir pelo modo de ruptura mais dúctil possível.

Para ser devidamente classificado, o modo de ruptura por flexão pode ser identificado por meio de critérios de deformação no aço e no concreto para que sejam diferenciados a flexão da punção e, ainda, o intermediário flexo-punção, com base no raio de plastificação das barras da armadura de flexão e deformações máximas no concreto.

Na ruína por punção, quando a superfície de ruptura se situa na zona entre o pilar e a primeira camada de armadura de cisalhamento ela ocorre por esmagamento da biela comprimida que, apesar de estar associada à um nível máximo de resistência de uma ligação laje-pilar armada à punção e, geralmente, ocorrer para elevadas taxas de armadura de cisalhamento, apresenta comportamento frágil por estar relacionado à mobilização dos mecanismos resistentes do concreto.

O tipo de armadura de cisalhamento influencia na resistência ao esmagamento da biela de concreto, uma vez que a sua eficiência se deve não somente à resistência à compressão do concreto, mas também ao estado de deformações transversais, de acordo com MUTTONI e RUIZ (2010). Dessa forma, assim como as fissuras de flexão, as fissuras de cisalhamento provocam redução da eficiência das bielas, e estas, por sua vez, têm suas aberturas controladas pelo escorregamento da ancoragem das armaduras de cisalhamento.

Os resultados para as lajes ensaiadas por EINPAUL *et al.* (2016) - com geometria, condições de contorno, características dos materiais e taxas de armadura de cisalhamento e flexão semelhantes - evidenciam a influência do tipo de armadura de cisalhamento na resistência ao esmagamento da biela de concreto, pois todas tiveram como modo de ruptura declarado pelos autores, o esmagamento da biela de concreto próximo ao pilar, como ilustra a Figura 2.3.

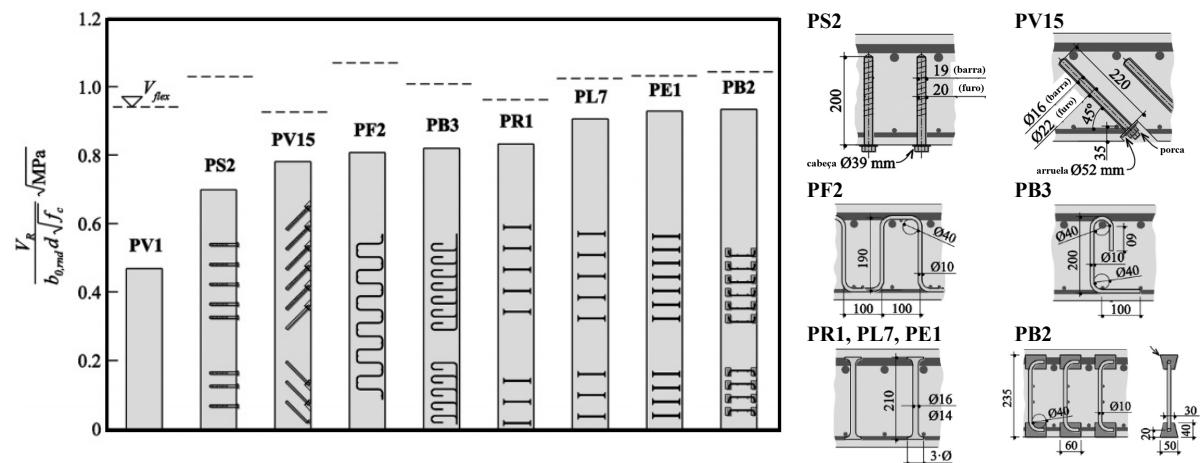


Figura 2.3 – Influência do tipo de armadura de cisalhamento na resistência ao esmagamento da biela adjacente ao pilar (adaptado de EINPAUL *et al.*, 2016).

Quando a superfície de ruptura ocorre dentro da região das armaduras de cisalhamento, a ruína se dá por esgotamento da resistência à tração diagonal do concreto e do aço das armaduras de punção presentes na ligação laje-pilar. E, em razão da contribuição do aço interceptado, proporciona ductilidade para o comportamento da ligação na ruptura.

A influência da taxa de armadura de cisalhamento para este modo de ruptura pode ser observada na Figura 2.4 através das mudanças de inclinação da superfície de ruptura medidas em ensaios conduzidos por SCHMIDT *et al.* (2019). Percebe-se que, com o aumento da taxa de armadura de cisalhamento, a superfície de ruptura torna-se mais íngreme.

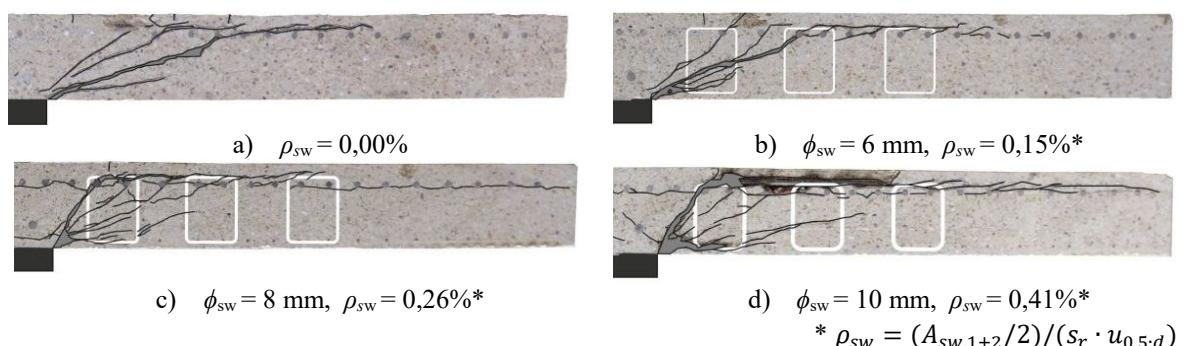


Figura 2.4 – Influência da taxa de armadura de cisalhamento na inclinação da superfície da ruptura por tração diagonal dentro da região armada ao cisalhamento (SCHMIDT *et al.*, 2019).

Quando a superfície de ruptura se desenvolve na região situada fora das armaduras de cisalhamento, as características do comportamento de ruína se assemelham à ruptura de lajes

sem armadura de cisalhamento ou por esmagamento da biela de concreto. Portanto, o esgotamento da resistência à tração diagonal do concreto fora da região da armadura de cisalhamento é um modo de ruptura frágil. Porém, além da fragilidade, outro aspecto importante sobre ele é a particularidade de apresentar a superfície de ruptura surgindo entre as barras de flexão inferiores e as barras de cisalhamento da última camada, o que resulta na diminuição da área de concreto que contribui para a resistência à punção.

A delaminação é a ruptura caracterizada pela presença de fissuras nos dois planos horizontais entre a armadura de flexão e a de punção, com possível redução da carga de ruptura. Em ensaios de punção de ligações laje-pilar, foi inicialmente observada por REGAN e SAMADIAN (2001), como decorrente da falha na transferência dos esforços de tração das barras transversais para as longitudinais. Dessa forma, parece ser determinante para este modo de ruptura a eficiência entre os vários mecanismos de ancoragem. Nos ensaios de TRAUTWEIN (2001) e TRAUTWEIN (2006) foram testados mecanismos para evitar o surgimento das fissuras de delaminação em lajes amadas com “stud interno” soldando pinos ou ganchos em forma de U na chapa inferior.

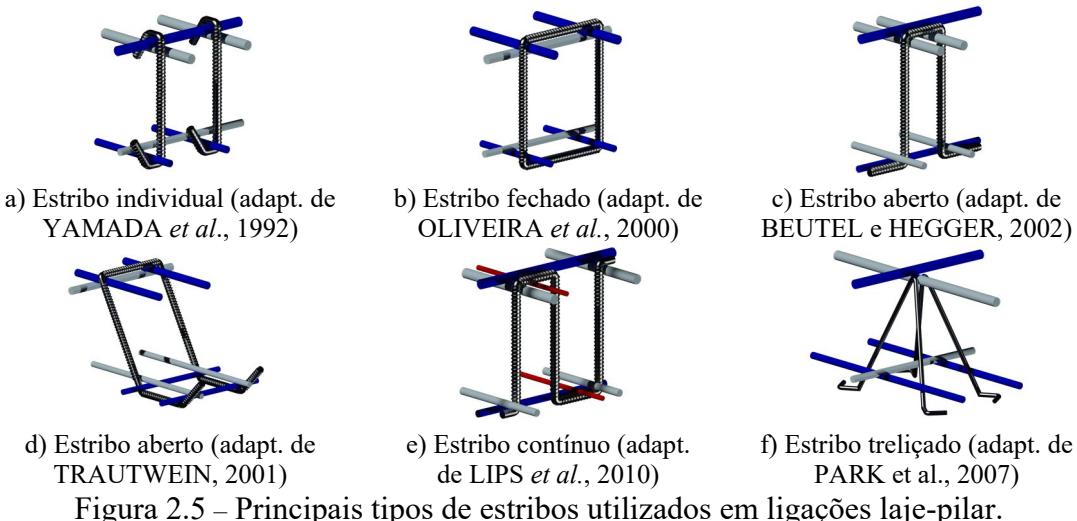
2.2. ARMADURAS DE CISALHAMENTO PARA LIGAÇÕES LAJE-PILAR DO TIPO ESTRIBO

Estríbos consistem em uma armadura de cisalhamento composta por uma barra individual ou um grupo de barras cuja ancoragem é garantida principalmente através de ganchos ou dobras nas extremidades. São um dos tipos mais tradicionais de armadura de cisalhamento utilizados em ligações laje-pilar para combate à punção em razão da simplicidade da sua confecção, a qual, geralmente, não exige processos industriais especiais, mas apenas serviços de corte e dobra. Fato que justifica a variedade de detalhamentos empregados em projetos com esta armadura. Este capítulo faz uma breve revisão dos principais aspectos relacionados aos estríbos utilizados como armadura de cisalhamento em ligações laje-pilar que estão presentes na literatura acerca da punção em lajes lisas.

2.2.1. Tipos

A Figura 2.5 mostra as variações dos tipos de estríbos desenvolvidas ao longo do tempo que podem ser vistas em cinco grandes grupos: individuais, fechados, abertos, contínuos e treliçados. Nas imagens da figura, as barras das camadas internas da armadura de flexão estão

representadas na cor azul claro, as barras das camadas externas da armadura de flexão em azul escuro e as barras construtivas em vermelho.



2.2.2. Arranjos

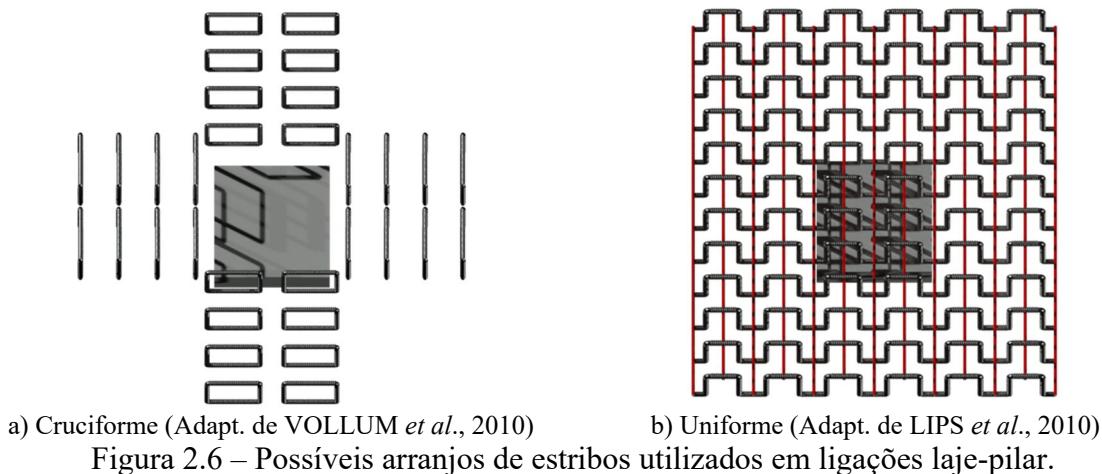
Dentre as inúmeras formas de distribuir as armaduras de cisalhamento ao redor do pilar, as quatro mais populares são os arranjos ou distribuições do tipo radial, cruciforme, uniforme e circunferencial.

O arranjo radial compreende a distribuição da armadura de cisalhamento ao longo de linhas radiais em direção ao centro do pilar, proporcionando a distribuição ideal das camadas da armadura ao longo da superfície de ruptura, onde facilmente se é contabilizado a área de aço por perímetro. Por outro lado, este arranjo é o mais favorável a conflitos entre as barras de flexão e cisalhamento, podendo se tornar inexecutável para detalhamentos que estipulam as dobras envolvendo as barras da armadura de flexão, como para os estribos.

O arranjo cruciforme, mostrado na Figura 2.6a, é caracterizado pela distribuição da armadura de cisalhamento em faixas ortogonais a partir das faces do pilar. É a forma mais simples de distribuir estribos mantendo uma área de aço constante por perímetro de armadura evitando conflitos com armaduras de flexão. Entretanto, devido ao grande espaçamento circunferencial na última camada da armadura de cisalhamento, favorece a ruptura prematura e frágil fora da região armada à punção.

A distribuição uniforme, apresentada na Figura 2.6b, se dá pela distribuição da armadura de cisalhamento em linhas de grade ao longo das quais o espaçamento é constante nas direções ortogonais. É mais uma forma de minimizar as chances de conflito entre barras de flexão e cisalhamento. No entanto, dificulta a contabilização do número de pernas que efetivamente contribuem na resistência à punção, além de impossibilitar a utilização de armaduras que envolvem as barras de flexão para baixas taxas de armadura de flexão.

O arranjo circunferencial é a distribuição da armadura de cisalhamento em camadas concêntricas, circulares ou quadradas, sem necessariamente obedecer a critérios de área de aço constante por camada. Para este arranjo, assim como para a distribuição uniforme, não existem especificações claras por parte das normas, mas é uma alternativa para distribuição de armaduras em que as extremidades não se encontram ao mesmo nível ou externas às camadas da armadura de flexão.



2.2.3. Ancoragem

A ancoragem é um dos mecanismos de transferência de força entre o concreto e o aço que interage com os demais mecanismos (adesão química e atrito) para caracterizar o fenômeno da aderência, a qual, geralmente, governa o comportamento de um elemento de concreto armado, tanto no Estado Limite de Serviço, pela influência no desenvolvimento da fissuração, quanto no Estado Limite Último, no que afeta as resistências, capacidade de deformação, deslocamentos, etc. ELIGEHAUSEN *et al.* (2006) afirmam que cada detalhe na geometria da armadura consiste em uma combinação específica e única desses mecanismos, levando a diferenças significativas no desempenho relacionado à armadura, como apontam as inúmeras

investigações, a exemplo das de HAMAD *et al.* (1993), RAMIREZ e RUSSEL (2008), LEE e PARK (2010), SPERRY *et al.* (2015), entre outros, acerca da transmissão de forças entre aço e concreto e da eficiência dos mecanismos mencionados.

O fato é que, o mecanismo de transferência de força dominante pode variar consideravelmente de um tipo de armadura a outro. Por exemplo, em barras retas, a influência da superfície da barra (lisa, nervurada, entalhada, etc.) é o detalhe mais importante da sua geometria, pois o mecanismo de transferência de força dominante em barras de superfície lisa é a adesão química, que se desenvolve em níveis baixos de deslizamento relativo entre barra e concreto, portanto, limitada, enquanto em barras de superfície rugosa os mecanismos de atrito são expressivos, tornando-a mais aderente.

No caso dos estribos, as dobras, que ancoram as barras, são de grande interesse das pesquisas que buscaram avaliar seu desempenho, permitindo que as diferenças significativas que surgiram entre suas geometrias justificassem simplificações nas regras de detalhamento. Os ensaios de arrancamento de BRANTSCHEN (2016) indicaram a redução do comprimento necessário para o escoamento do aço (l_b) dos demais detalhamentos (cabeça, dobra em 180°, dobra em U, etc.), mostrados na figura 2.7, em comparação a barra reta, além de ressaltar, por meio das relações de força-escorregamento, a disparidade da influência da presença de nervuras para cada detalhe, indicando que mais de um mecanismo de transferência de força está envolvido.

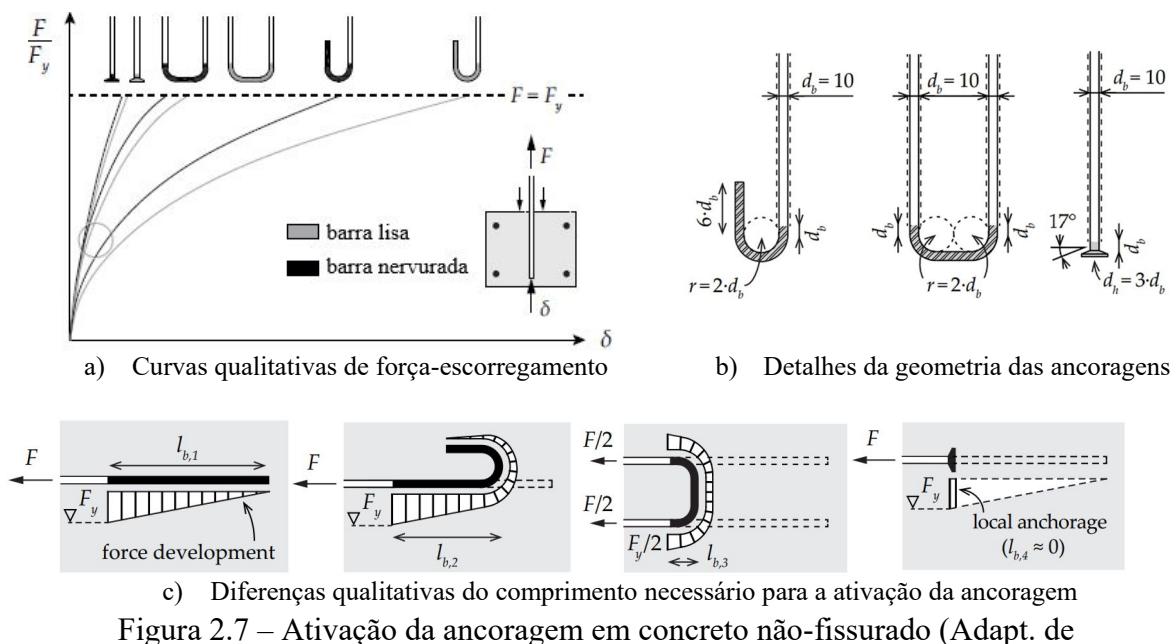


Figura 2.7 – Ativação da ancoragem em concreto não-fissurado (Adapt. de BRANTSCHEN, 2016).

No entanto, em lajes lisas, as condições de ancoragem dos estribos são desfavoráveis, em parte pela pequena espessura das lajes, resultando em embutimentos das armaduras de cisalhamento demasiadamente curtos. Ou seja, na prática, a tensão limite média dessas armaduras de cisalhamento alcançam níveis inferiores à tensão de escoamento.

REGAN (2001) destaca que a tensão admissível desenvolvida na armadura de cisalhamento em lajes depende, basicamente de três fatores: da resistência à ruptura do concreto em torno da ancoragem, da resistência ao escorregamento ou deslizamento e da transferência de esforços ao concreto em torno da ancoragem nas zonas comprimida e tracionada na flexão.

Nesse sentido, os ensaios de arrancamento realizados por REGAN (2000) para avaliar a resistência à ruptura do cone de concreto em torno da ancoragem, uma vez que essa ruptura ocorre ao longo de uma superfície cônica, podem ser avaliados no contexto da punção, pois o autor utilizou de seis detalhes de ancoragem diferentes em concreto não-fissurado com comprimentos de ancoragem (h_e) abaixo de 100 mm, simulando armaduras em lajes delgadas. Na Figura 2.8 observa-se que os ensaios com estribos foram divididos em quatro séries: dois com dobras de 90° na extremidade e dois com dobras de 180° . Entre ambos os pares de séries houve variação com relação à presença de uma barra longitudinal dentro das dobras, a qual garantiu aumento de resistência aos estribos, chegando a equiparar-se à resistência à formação do cone de arrancamento dos conectores.

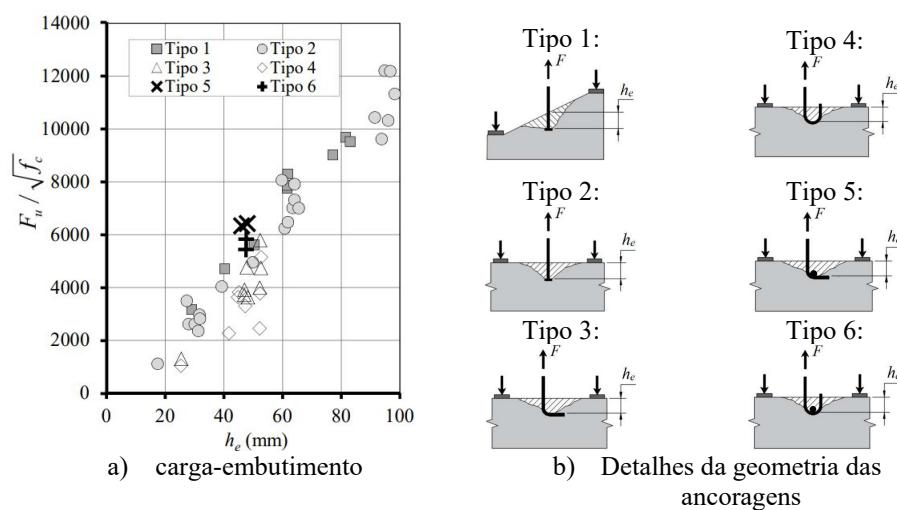
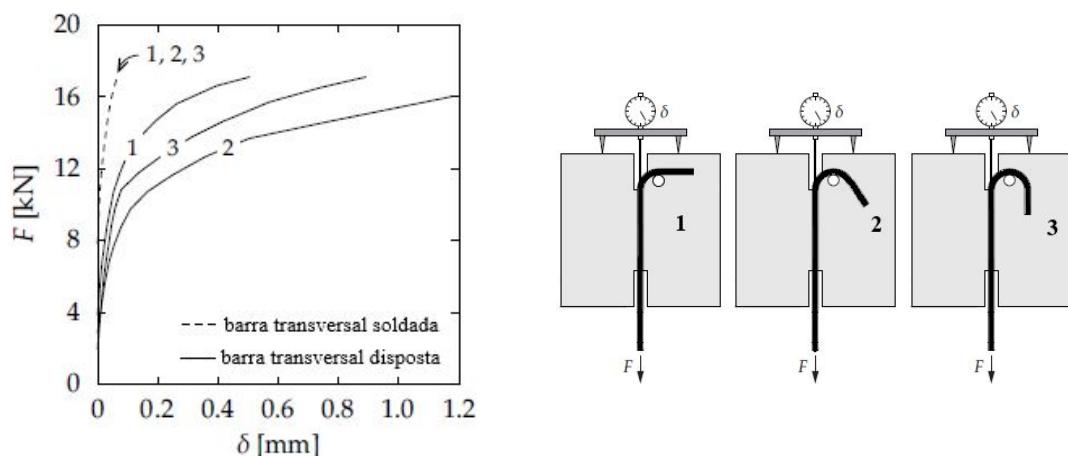


Figura 2.8 – Resistência da ancoragem à ruptura do cone de concreto
(Adapt. de REGAN, 2000).

A constatação de que a presença da armadura longitudinal dentro da dobra proporciona uma resistência adicional conduziu as exigências das recomendações normativas sobre a obrigatoriedade das armaduras de cisalhamento (que possuem dobras como dispositivo de ancoragem) em envolver as armaduras de flexão. Neste contexto, pesquisas relacionadas a eficiência desse tipo de detalhamento tornaram-se de grande interesse.

A série de ensaios realizada por LEONHARDT e WALTHER (1965) em barras lisas dobradas evidenciaram que a geometria da dobra é importante apenas quando a barra longitudinal é simplesmente disposta na dobra (Figura 2.9), uma vez que a barra longitudinal soldada atua como uma ancoragem mecânica proporcionando uma melhoria significativa do comportamento quanto ao escorregamento, porém, limita a influência da geometria da dobra.



Ressalta-se que as observações sobre os ensaios de LEONHARDT e WALTHER (1965) não são diretamente aplicáveis as barras nervuradas. Pelos comportamentos de força-escorregamento de barras nervuradas embutidas em concreto não-fissurado com ruptura através do arrancamento do cone de concreto para variações nos tipos de ancoragem ensaiados por SILVA (2018) (Figura 2.10), é possível observar que as discrepâncias se dão pela presença da barra longitudinal para o mesmo tipo de dobra – ou seja, barras dobradas que envolvem barras longitudinais apresentaram resistência superior às barras que não envolvem, com resultados próximos ou superiores aos obtidos com cabeça como ancoragem mecânica – mas, não há

diferença expressiva de comportamentos entre as várias dobras onde há barra longitudinal disposta no seu interior.

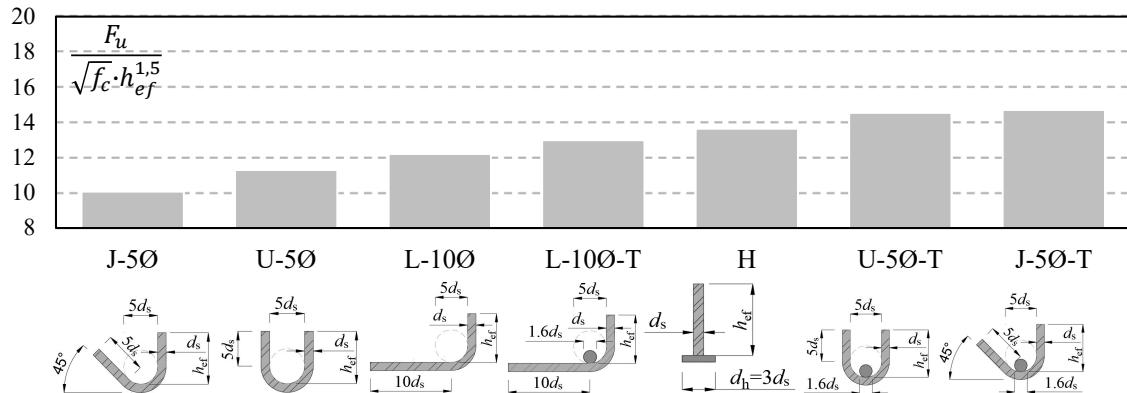


Figura 2.10 – Influência da barra longitudinal (simplesmente disposta) no comportamento de diferentes geometrias de barras dobradas de superfície rugosa (Adapt. de SILVA, 2018).

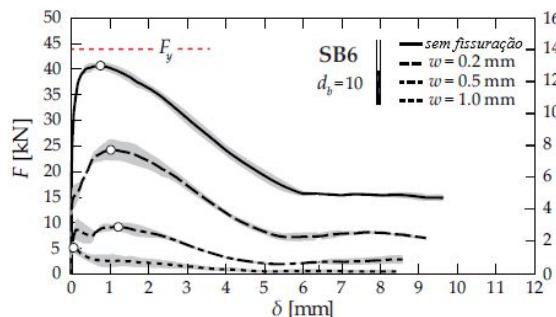
Quanto a resistência ao escorregamento ou deslizamento da barra, caracterizada quando a relação entre a carga e o deslocamento aumenta continuamente e a falha acontece quando atinge deslocamentos grandes (FUCHS *et al.*, 1995), a geometria da dobradura também exerce influência, confirmada por demonstrações de que dobradas em ângulo de 90º estão relacionadas a deslizamentos significativamente menores - quase a metade – que dobradas em ângulo de 180º. Isso se deve ao fato de, no arrancamento de barras com ganchos, a tendência a desencurvar gera uma perda parcial da aderência do lado externo da dobradura com o esmagamento do concreto a partir da concentração de tensões normais no interior da dobradura.

No entanto, embora várias séries de experimentos tenham sido realizadas nos últimos anos, em virtude do aperfeiçoamento das configurações de testes para avaliar situações mais complexas, para o terceiro fator apontado por REGAN (2001) - a ligação da armadura de cisalhamento às zonas comprimida e tracionada da laje - os resultados foram geralmente insuficientes para o desenvolvimento de qualquer formulação sobre condições de ancoragem diante do grau de fissuração do concreto, mas consolidaram o fato de que apesar da transferência de força ter um bom desempenho para regiões de concreto não-fissurado, a presença de fissuras afeta em demasiado esse fenômeno.

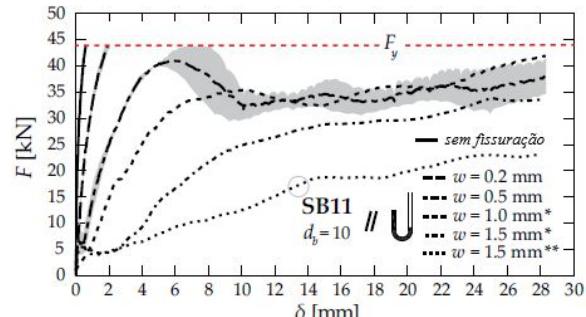
BRANTSCHEN *et al.* (2016) avaliou a influência de fissuras de flexão, que comumente afetam a ancoragem superior das amaduras de cisalhamento em ligações laje-pilar, por meio de um extenso programa experimental de ensaios de arrancamento com diversas ancoragens (barra

reta, com cabeça, dobra em 180° e dobra em forma de U). A abertura das fissuras (w) foi controlada (variando de 0,2 mm a 2,0 mm para simular condições tanto de serviço quanto no estado limite último) enquanto as barras transversais - localizadas no plano dessas fissuras - eram arrancadas dos corpos-de-prova.

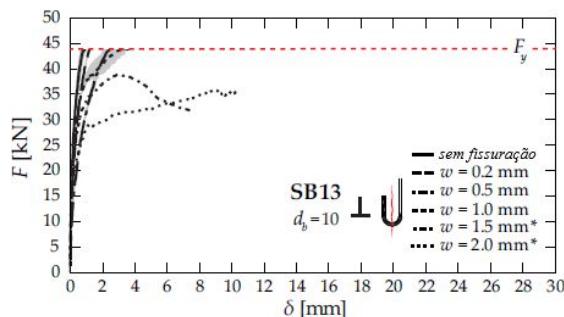
Pelos gráficos da Figura 2.11 os autores mostraram haver dependência da geometria no comportamento da ancoragem na presença da fissura no plano da armadura, pois todos os detalhes avaliados apresentaram de forma consistente uma redução da resistência e/ou rigidez nas curvas de força - escorregamento, no entanto, as barras retas e dobras em 180° exibiram maior sensibilidade em comparação as dobras em U. Adicionalmente, os autores atestaram que o grau de redução do desempenho das dobras em 180° depende da disposição do gancho em relação à fissura.



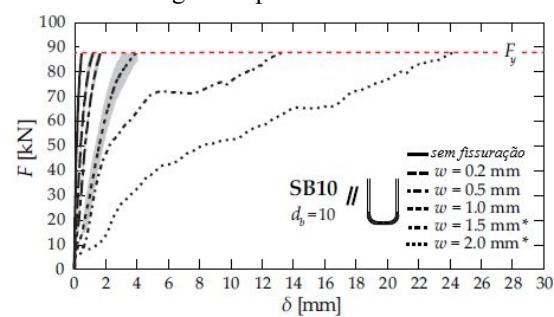
a) Curvas força-escorregamento para barra reta



b) Curvas força-escorregamento para barra com gancho paralela a fissura



c) Curvas força-escorregamento para barra com gancho transversal a fissura



d) Curvas força-escorregamento para barra com dobra em U

Figura 2.11 – Influência da fissuração do concreto no comportamento de diferentes geometrias de barras de superfície rugosa (Adapt. de BRANTSCHEN *et al.* 2016).

2.3. MÉTODOS NORMATIVOS PARA ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA À PUNÇÃO

De uma forma geral, O ACI 318 (2019), o EUROCODE 2 (2014), a ABNT NBR 318 (2014) e o *fib* MODEL CODE 2010 (2013) consideram que a resistência à punção de uma ligação laje-pilar sem armadura de cisalhamento ($V_{R,c}$) pode ser obtida a partir da resistência à tensão cisalhante distribuída a uma taxa constante ao longo de uma seção crítica, embora assumam diferentes propostas para a geometria e posição dela.

Para ligações laje-pilar com armadura de cisalhamento, recomendam a verificação de três modos de ruptura: esmagamento da biela comprimida na região adjacente ao pilar, entre a face do pilar e a primeira camada de armadura ($V_{R,max}$), e falhas por tração diagonal, dentro da região das armaduras de cisalhamento ($V_{R,cs}$) ou fora dessa região ($V_{R,out}$), cujos perímetros de controle correspondentes, assim como as regras de detalhamento recomendadas por esses métodos normativos para estribos são apresentados nos itens a seguir.

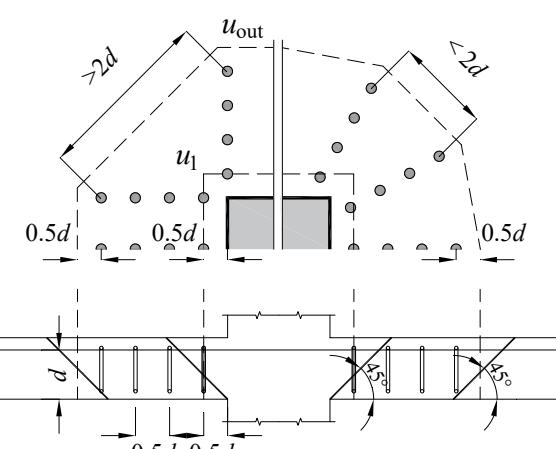
2.3.1. ACI 318 (2019)

O ACI 318 (2019) estima a resistência à punção de uma laje sem armadura de cisalhamento através de uma tensão cisalhante aplicada em um perímetro de controle afastado do pilar à uma distância igual a $d/2$, considerando uma fissura de punção com um plano de ruptura à 45°. A determinação dessa tensão resistente ($V_{R,c}$) é apresentada na Tabela 2.1, onde a mesma é determinada como a menor entre as três equações mostradas.

Para lajes armadas à punção, o ACI 318 (2019) prescreve a verificação dos três modos de ruptura: dentro da região armada ($V_{R,cs}$), fora da região armada ($V_{R,out}$) e o esmagamento da biela ($V_{R,máx}$), obtidos pelas equações apresentadas na Tabela 2.1.

Ressalta-se que esta norma propõe somente a distribuição cruciforme da armadura de cisalhamento para combate à punção, as especificações apresentadas na Tabela 2.1 para o caso de arranjo radial trata-se de uma adaptação baseada em recomendações de outras normas para esse caso de arranjo.

Tabela 2.1 – Síntese da metodologia normativa do ACI 318 (2019) para estimar a resistência à punção de ligação laje-pilar.

Lajes sem armadura de cisalhamento	Lajes com armadura de cisalhamento
$V_{Rc,ACI} = \min \begin{cases} 0,083 \cdot k \cdot (40 \cdot \frac{d}{u_1}) \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \\ 0,17 \cdot k \cdot (1 + \frac{2}{a/b}) \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \\ 0,33 \cdot k \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \end{cases}$ 	$V_{Rc,ACI} = h_c \cdot V_{Rc,ACI} + V_{Rs,ACI}$ $V_{Rc,ACI} = \min \begin{cases} V_{Rout,ACI} = 0,17 \cdot k \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{out} \cdot d \\ V_{Rmax,ACI} = k_{sys} \cdot V_{Rc,ACI} \end{cases}$ <p>onde: a = maior dimensão do pilar b = menor dimensão do pilar</p> $k = \sqrt{\frac{2}{1 + 0,004 \cdot d}} \leq 1$ $h_c = \begin{cases} 0,50 \text{ para estribos} \\ 0,75 \text{ para conectores} \end{cases}$ $V_{Rs,ACI} = \left(\frac{S_r}{d}\right) \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,ef} \cdot \sin(\alpha)$ $f_{yw,ef} = f_{yw} \leq 420 \text{ MPa}$ $k_{sys} = \begin{cases} 1,5 \text{ para estribos} \\ 2,0 \text{ para conectores} \end{cases}$

O ACI 318 (2019) também apresenta recomendações importantes sobre o detalhamento dos estribos utilizados como armadura de combate à punção, além da obrigatoriedade de as dobras envolverem as barras da armadura longitudinal na parte superior e inferior da laje, são estipulados limites para ângulo interno de dobramento, comprimento reto após a dobra – para os casos de dobras em 45°, 90° e 180° – e espaçamento entre pernas. Essas recomendações são mostradas na Figura 2.12.

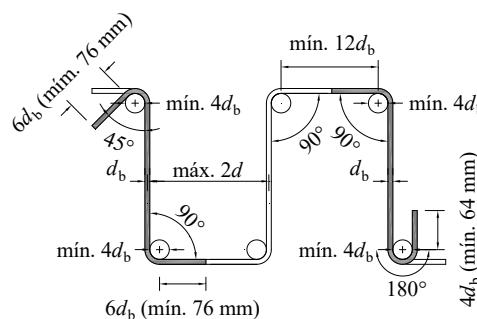


Figura 2.12 – Especificações de ancoragem de estribos de acordo com o ACI 318 (2019).

2.3.2. EUROCODE 2 (2014)

Para o CEN EN 1992-1-1 (2014), conhecido por EUROCODE 2 (2014), a verificação da resistência a punção de lajes lisas sem armadura de cisalhamento deve ser feita levando em consideração um perímetro de controle afastado $2 \cdot d$ da face do pilar, considerando uma fissura com inclinação hipotética igual à $26,6^\circ$, tal como apresentado no desenho da Tabela 2.2.

Para o cálculo da tensão resistente, as recomendações da norma europeia dividida em três documentos, CEN EN 1992-1-1 (2004), CEN EN 1992-1-1/AC (2010) e BSI BS EN 1992-1-1:2004/A1 (2014), utilizam equações empíricas que levam em conta a resistência a compressão do concreto (f_c), taxa de armadura de flexão (ρ), e o efeito de escala (k).

Para lajes armadas à punção, o EUROCODE 2 (2014) prescreve a verificação dos três modos de ruptura. Para o V_{Rcs} , a norma considera 75% da resistência à punção em lajes sem armadura de cisalhamento somado a parcela de contribuição das armaduras dentro da área de influência do perímetro de controle; a equação que representa o V_{Rout} deve ser verificada considerando que a tensão resistente é aplicada em um perímetro de controle afastado $1,5 \cdot d$ da última camada de armaduras, tal como apresentado na figura da Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Síntese da metodologia normativa do EUROCODE 2 (2014) para estimar a resistência à punção de ligação laje-pilar.

Lajes sem armadura de cisalhamento

Lajes com armadura de cisalhamento

$V_{Rc,EC2} = 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot u_1 \cdot d$

$V_{R,EC2} = \min \begin{cases} V_{Rcs,EC2} = 0,75 \cdot V_{Rc,EC2} + V_{Rs,EC2} \leq 1,5 \cdot V_{Rc,EC2} \\ V_{Rout,EC2} = 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot u_{out} \cdot d \\ V_{Rmax,EC2} = 0,40 \cdot f_c \cdot v \cdot u_0 \cdot d \end{cases}$

onde:

$V_{Rs,EC2} = 1,5 \cdot \left(\frac{S_r}{d}\right) \cdot A_{sw} \cdot f_{ysw,ef} \cdot \sin(\alpha)$

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

$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$

$\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \leq 0,02$

$v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_c}{250}\right)$

Nas suas especificações de ancoragem para estribos, estabelece que quando for efetuada por meio de dobras ou ganchos há a obrigatoriedade de uma barra longitudinal em seu interior, para os quais, os ângulos internos de dobramento mínimos e comprimentos retos mostrados na Figura 2.13 devem ser respeitados.

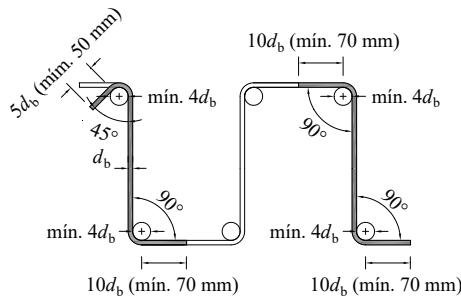


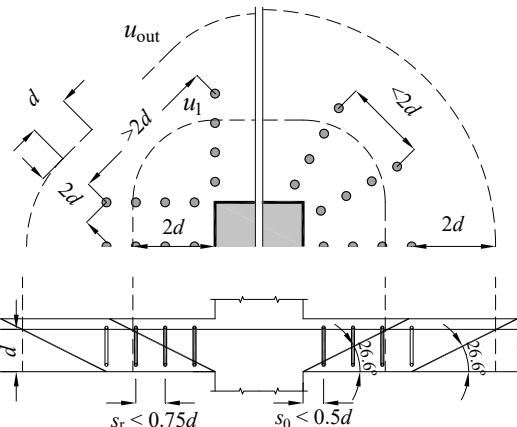
Figura 2.13 – Especificações de ancoragem de estribos de acordo com o EUROCODE 2 (2014).

2.3.3. ABNT NBR 6118 (2014)

A ABNT NBR 6118 (2014) baseia seus modelos de cálculo, assim como o EUROCODE 2 (2014), nas recomendações do documento CEB-FIP MC90 (1993), o que justifica a semelhança nas suas metodologias. A principal diferença entre os modelos normativas dá-se pelo fato de a norma brasileira não limitar os valores do efeito escala (k) e da taxa de armadura de flexão (ρ).

A Tabela 2.3 apresenta a estimativa de resistência para lajes sem armadura de punção. E, para a estimativa de resistência de uma laje com armadura de punção, a norma brasileira segue o mesmo padrão das normas apresentadas anteriormente, recomendando a verificação dos três modos de ruptura.

Tabela 2.3 – Síntese da metodologia normativa da ABNT NBR 6118 (2014) para estimar a resistência à punção de ligação laje-pilar.

Lajes sem armadura de cisalhamento	Lajes com armadura de cisalhamento
$V_{Rc,NBR} = 0,182 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot u_1 \cdot d$	$V_{R,NBR} = \min \begin{cases} V_{Rcs,NBR} = 0,77 \cdot V_{Rc,NBR} + V_{Rs,NBR} \\ V_{Rout,NBR} = 0,182 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot u_{out} \cdot d \\ V_{Rmax,NBR} = 0,54 \cdot f_c \cdot v \cdot u_0 \cdot d \end{cases}$
	<p>onde:</p> $V_{Rs,NBR} = 1,5 \cdot \left(\frac{s_r}{d}\right) \cdot A_{sw} \cdot f_{ysw,ef} \cdot \sin(\alpha)$ $f_{ysw,ef} = \begin{cases} f_{ysw} \leq 345 \text{ MPa}, h \leq 150 \text{ mm} \\ f_{ysw} \leq 228,75 + 0,775 \cdot h \leq 500 \text{ MPa}, h > 150 \text{ mm} \end{cases}$ $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$ $\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}$ $v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_c}{250}\right)$

A Figura 2.14 apresenta as especificações da norma brasileira para ancoragem da armadura de cisalhamento do tipo estribo, que estabelece como opção o uso de ganchos envolvendo uma barra longitudinal, que devem obedecer a valores mínimos de diâmetro interno de curvatura e ponta reta.

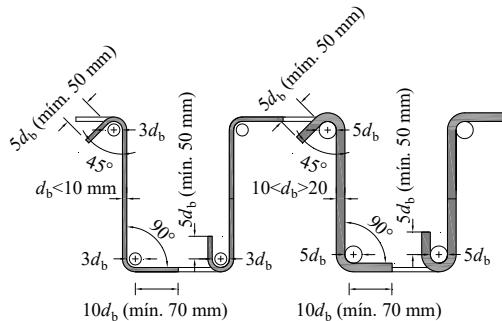


Figura 2.14 – Especificações de ancoragem de estribos de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014).

2.3.4. fib MODEL CODE 2010 (2013)

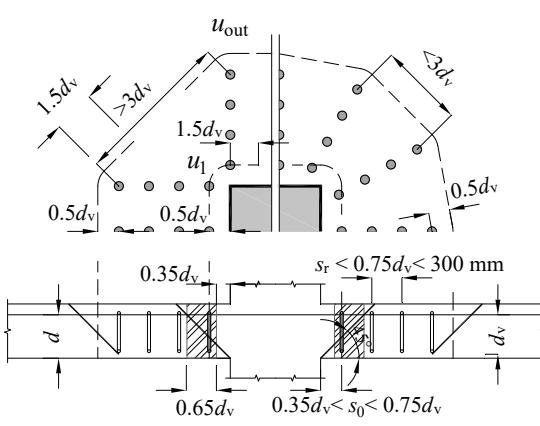
As recomendações para a previsão da resistência à punção do fib MODEL CODE 2010 (2013) baseiam-se na teoria da fissura crítica apresentada por MUTTONI e SCHWARTZ (1991),

MUTTONI (2008) e RUIZ e MUTTONI (2009), onde os autores propõem que a resistência à punção seja obtida em função da rotação da laje (ψ), esta última dependendo da carga aplicada e da resistência à flexão da laje. Devido a rotação ser função da carga aplicada, para calcular a estimativa de resistência da laje é necessário realizar um processo iterativo até que a condição de carga solicitante seja igual à resistente.

Outra diferença do *fib* MODEL CODE 2010 (2013) para as outras recomendações é que ele apresenta diversos níveis de aproximação para estimar a rotação da laje, sendo o nível III o mais apropriado para este trabalho pelo fato de ser indicado para as verificações especiais em estruturas existentes.

A verificação à punção de laje sem armadura de cisalhamento, segundo o *fib* MODEL CODE 2010 (2013), é apresentada na Tabela 2.4, assim como a estimativa de resistência de lajes armadas com ruptura interna a região das armaduras (V_{Rcs}), obtido pelo somatório da parcela resistente do concreto somada com a força resistida pelas armaduras em um perímetro de controle localizado entre $0,35 \cdot d$ e d da face do pilar. Para a ruptura externa a região das armaduras (V_{Rout}), é considerada a resistência em um plano de corte definido a uma distância entre o centroide da armadura de flexão e a base da armadura de cisalhamento (d_v), e o perímetro de controle afastado em uma distância igual à $0,5 \cdot d_v$ com uma distância circumferencial entre as armaduras máxima de $3 \cdot d_v$. A resistência pelo esmagamento da biela ($V_{Rmáx}$) também é apresentada como sendo uma multiplicação do V_{Rc} por um fator que considera o desempenho da armadura de cisalhamento utilizada (k_{sys}).

Tabela 2.4 – Síntese da metodologia normativa do *fib* MODEL CODE 2010 (2013) para estimar a resistência à punção de ligação laje-pilar.

Lajes sem armadura de cisalhamento	Lajes com armadura de cisalhamento
$V_{RC,MC10} = k_\psi \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d$	$V_{RC,MC10}$ $= \min \begin{cases} V_{RCS,MC10} = V_{RC,MC10} + A_{sw} \cdot f_{ysw} \\ V_{Rout,MC10} = k_\psi \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{out} \cdot d_{out} \\ V_{Rmax,MC10} = k_{sys} \cdot k_\psi \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \leq \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \end{cases}$ onde: $k_\psi = \frac{1}{1,5 + 0,9 \cdot k_{dg} \cdot \psi_{III} \cdot d} \leq 0,6$ $k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75$ $\psi_{III} = 1,2 \cdot \frac{r_q}{d} \cdot \frac{f_{ysw}}{E_{sw}} \cdot \left(\frac{m_s}{m_R} \right)^{3/2}$ $m_s = \frac{V}{8}; m_R = \rho \cdot f_{ys} \cdot d^2 \cdot \left(1 - \frac{0,5 \cdot \rho \cdot f_{ys}}{f_c} \right)$ $f_{ysw} = \frac{E_{sw} \cdot \psi}{6} \cdot \left(1 + \frac{f_b}{f_{ysw}} \cdot \frac{d}{\phi_w} \right) \leq f_{ysw}; f_b = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{25}}$
	$\eta_1 = \begin{cases} 1,75 \text{ p/ barras nervuradas} \\ 1,45 \text{ p/ barras aderidas com resina epoxy} \\ 0,90 \text{ p/ barras lisas} \end{cases}$ $\eta_2 = \begin{cases} 1,20, & f_{ysw} = 400 \text{ MPa} \\ 1,00, & f_{ysw} = 500 \text{ MPa} \\ 0,85, & f_{ysw} = 600 \text{ MPa} \\ 0,75, & f_{ysw} = 700 \text{ MPa} \\ 0,68, & f_{ysw} = 800 \text{ MPa} \end{cases}$ $k_{sys} = \begin{cases} 2,8 \text{ p/ conectores} \\ 2,4 \text{ p/ estribos} \\ 2,0 \text{ p/ outros} \end{cases}$

O *fib* MODEL CODE 2010 (2013) também propõe algumas especificações sobre a ancoragem dos estribos. De maneira mais objetiva, estipula os diâmetros de dobramento para estribos, indicados na Figura 2.15, para as dobruras, recomenda que a geometria garanta a ancoragem nas duas extremidades em volta de barras longitudinais.

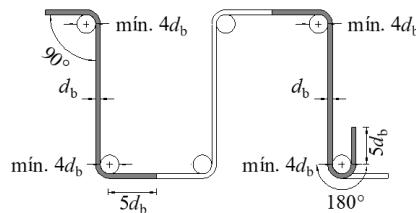


Figura 2.15 – Especificações de ancoragem de estribos de acordo com o *fib* MODEL CODE 2010 (2013).

3. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS ESTRIBOS

3.1. COLETA DE DADOS

Diversos tipos de estribos usados como armadura de cisalhamento para combate à punção são relatados em mais de 30 trabalhos disponíveis na literatura científica entre os anos de 1980 e 2021. Quando agrupados em função das suas geometrias, podem ser classificados como apresentados nas Figuras 3.1 a 3.5.

3.1.1. ESTRIBOS INDIVIDUAIS

Em conformidade com a principal exigência para a ancoragem de estribos por meio de dobra, presente nas normas de projeto apresentadas no item 2.3, YAMADA *et al.* (1992), REGAN (1980), CHANA e DESAI (1992), REGAN e SAMADIAN (2001), EINPAUL *et al.* (2016) e JANG e KANG (2019) testaram estribos individuais ancorados nas extremidades por dobras ao redor das barras de flexão.

YAMADA *et al.* (1992) utilizou estribos com dobras em 180° que envolviam as barras das camadas externas da armadura de flexão. Os ganchos foram dobrados em planos ortogonais para que cada barra pudesse ser ancorada nas barras de flexão superior e inferior nas duas direções ortogonais (Figura 3.1a). De forma semelhante, isto é, dobras inferiores feitas na direção ortogonal as dobras superiores, REGAN (1980) utilizou estribos ancorados por dobras em 180° que envolviam as barras da camada externa somente da armadura de flexão superior e, na parte inferior, envolviam as barras da camada interna (Figura 3.1b), enquanto CHANA e DESAI (1992), REGAN e SAMADIAN (2001), EINPAUL *et al.* (2016) e JANG e KANG (2019) testaram estribos cujas dobras envolviam somente as barras das camadas internas da armadura de flexão, além de utilizarem, em alguns casos, dobras em 45° e 90° (Figura 3.1c).

EOM *et al.* (2018) testou estribos que não envolviam as barras da armadura de flexão. Por esta razão este tipo de reforço não estava em conformidade com as prescrições normativas para ancoragem de estribos. Dessa forma, para viabilizar a montagem, módulos foram pré-montados para serem posicionados entre as camadas da armadura de flexão. No interior das dobras, houve

a inclusão de barras longitudinais de diâmetro inferior aos ramos dos estribos que serviram para compor uma armadura construtiva, proporcionando estabilidade aos módulos (Figura 3.1d).



Figura 3.1 – Tipos de estribos individuais usados como armadura de combate à punção.

3.1.2. Estriplos Fechados

OLIVEIRA *et al.* (2000), SCHMIDT *et al.* (2019) e LIMA (2021) utilizaram estribos fechados cujas dobras envolviam as barras da armadura de flexão superior e inferior, respeitando as regras de detalhamento preconizadas pelas normas (Figura 3.2a). Entretanto, na prática, para estes casos, é imprescindível avaliar a compatibilização com o detalhamento da armadura de flexão para garantir a presença das barras de flexão no interior de todas as dobras. Dessa forma, alternativas construtivas para estribos fechados, que não obedecem essa obrigatoriedade, foram propostas, variando-se o posicionamento das dobras de ancoragem.

VOLLUM *et al.* (2010) e LIMA (2021) testaram estribos que envolviam as barras de ambas as armaduras de flexão, entretanto possuíam as dobras de ancoragem afastadas dessas barras e em seu interior estavam presentes somente barras de uma armadura construtiva (Figura 3.2b). Também tinham barras de armadura construtiva no interior das dobras de ancoragem, os estribos utilizados por CALDENTEY *et al.* (2013) e LIMA (2021), pois envolviam somente a armadura de flexão superior ou, em outros casos, somente a armadura de flexão inferior, Figura 3.2c e Figura 3.2d, respectivamente. Neste último caso, LIMA (2021) também utilizou de estribos com dobras inferiores afastadas das barras da armadura de flexão (Figura 3.2e). Ainda, nos trabalhos de CALDENTEY *et al.* (2013), GOSAV *et al.* (2015), MABROUK e HEGAB (2017) e LIMA (2021) houveram testes com estribos que não envolviam as barras da armadura de flexão. Novamente, nesses casos, foi feita a colocação de barras construtivas no interior das dobras para facilitar a montagem desses tipos de estribos (Figura 3.2f).

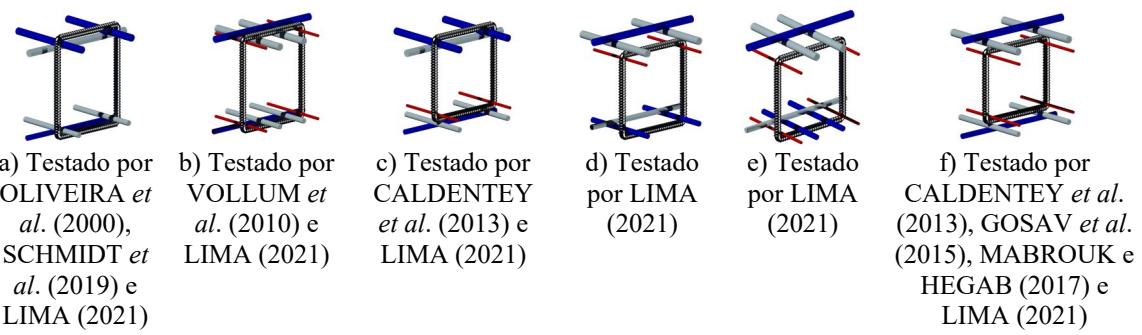


Figura 3.2 – Tipos de estribos fechados usados como armadura de combate à punção.

3.1.3. Estriplos Abertos

BEUTEL e HEGGER (2002) utilizaram estribos abertos na zona comprimida da laje com ramos verticais que envolviam tanto as barras da armadura de flexão superior quanto inferior por meio de dobras feitas no mesmo plano dos ramos (Figura 3.3a). Nos testados por ANDRADE (2000), as dobras inferiores foram feitas em direção ortogonal aos ramos (verticais) dos estribos para facilitar a colocação dos mesmos, uma vez que suas dobras também envolviam as barras da armadura de flexão em ambas as zonas tracionada e comprimida da laje, como recomendam as normas de projeto atuais (Figura 3.3b).

Entretanto, para possibilitar a pré-fabricação, YAMADA *et al.* (1992) desenvolveu módulos de estribos abertos verticais soldados a duas barras retas horizontais e, para maximizar a facilidade de instalação desses módulos, nenhuma barra de flexão foi inserida no interior das dobras superiores (Figura 3.3c). Por esta razão, e também pelo fato de ter mantido a distância da face do pilar à primeira camada de armaduras de cisalhamento igual a distância entre as camadas de armadura de cisalhamento, deixando-a superior a $0.5 \cdot d$, este tipo de detalhamento não estava em conformidade com os requisitos normativos.

Apesar de não haver, por parte das normas, recomendações explícitas sobre a utilização de armadura de punção do tipo estribo com ramos inclinados, há inúmeras investigações sobre o desempenho desse detalhamento. Para trabalhos que utilizaram estribos abertos, destacou-se ANDRADE (2000) que testou estribos com ramos inclinados à 45° com o plano da laje, mantendo o envolvimento das dobras superiores e inferiores em torno das barras de flexão (Figura 3.3d). Da mesma forma ancoravam-se os estribos testados por OLIVEIRA *et al.* (2000) e TRAUTWEIN (2001), que por sua vez possuíam inclinação de 60° . Em ambos os casos de

inclinação, para facilitar a colocação dos mesmos, as extremidades dos comprimentos retos destes estribos foram dobradas à 45º (Figura 3.3e).

Recentemente, visando agilizar o processo de montagem, GLIKMAN *et al.* (2017) testou estribos com ramos inclinados em 35º, cujas extremidades superiores se estendem até o nível da camada externa da armadura de flexão, enquanto que, na parte inferior desses estribos, os comprimentos retos após as dobras são soldados em trilhos de barras longitudinais posicionados abaixo da armadura de flexão (Figura 3.3f). Nenhuma dobra dos estribos testados por GLIKMAN *et al.* (2017) se ancora envolvendo as barras de flexão. Atualmente, não há diretrizes normativas que orientem seu detalhamento.

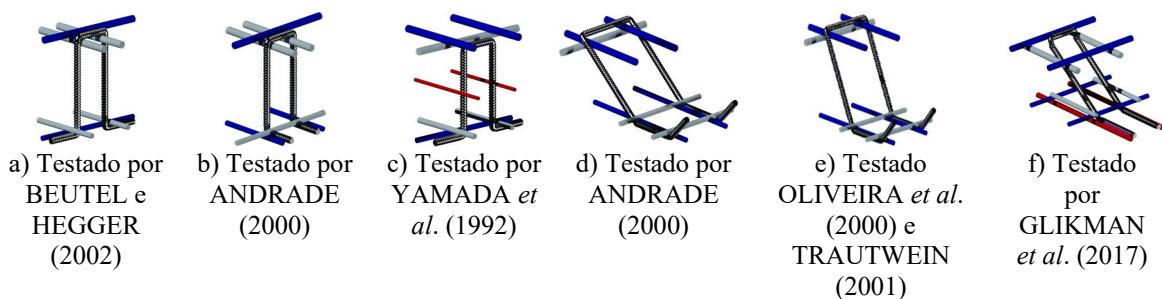


Figura 3.3 – Tipos de estribos abertos usados como armadura de combate à punção.

3.1.4. Estripos Contínuos

A dificuldade da execução de estribos contínuos detalhados conforme os critérios normativos, que determinam que sua ancoragem deve ser garantida pelo envolvimento de todas as dobras nas barras da armadura de flexão, fica evidente diante da ausência de trabalhos que apresentem a avaliação desse tipo de estribo seguindo tal critério. Em LIPS *et al.* (2010), por exemplo, foram utilizados módulos que consistiam em fileiras de estribos soldadas em barras retas horizontais na parte superior e inferior para formar uma gaiola e, dessa forma, proporcionar agilidade na armação, em contrapartida, os ramos dos estribos eram igualmente espaçados em ambas as direções, esse detalhe fez com que somente algumas dobras envolvessem barras de flexão (Figura 3.4a).

BROMS (1990) testou estribos em fileiras isoladas que envolviam somente as barras da armadura de flexão superior em espaçamentos entre pernas de $0,8 \cdot d$ (Figura 3.4b). Por fim, a variação mais recente desse tipo de estribo foi desenvolvida e testada por EOM *et al.* (2018) e

consiste em estribos dobrados de forma semelhante a uma mola, ou seja, a continuidade das barras não ocorre no mesmo plano. Para facilitar a instalação, EOM *et al.* (2018) dispôs estes estribos internamente as camadas da armadura de flexão, estando no interior de suas dobras apenas barras de armadura construtiva (Figura 3.4c).



Figura 3.4 – Tipos de estribos contínuos usados como armadura de combate à punção.

3.1.5. Estripos Treliçados

Os estribos classificados como treliçados não possuem normalização específica, tampouco obedecem aos critérios normativos vigentes para ancoragem, seja ela obtida por dobra ou por solda. Mas, são alternativas propostas para viabilizar a pré-fabricação de reforço à punção, agilizar o processo de instalação e evitar interferências com a armadura de flexão.

REGAN e SAMADIAN (2001), WICKE (1984) e ANON (1994) testaram uma armadura composta por barras nervuradas verticais pouco espaçadas soldadas nas extremidades em pares de barras horizontais dobradas em forma de “V” no plano da laje com ângulo interno de 22,5° que foram posicionadas entre a armadura de flexão (Figura 3.5a).

PARK *et al.* (2007) testou estribos que consistiam em barras diagonais de superfície lisa que formavam treliças espaciais soldadas na parte superior nas barras da camada interna da armadura de flexão superior e, na parte inferior, a 23 mm das dobras inferiores, soldadas nas barras de camada externa da armadura de flexão inferior (Figura 3.5b).

PEREIRA FILHO (2021) testou a utilização de treliças planas. Tratavam-se de módulos formados pelas treliças planas de barras nervuradas soldadas em barras horizontais colocadas a 19 mm das suas extremidades (Figura 3.5c). Também não tinham envolvimento com as barras de flexão, pois eram colocados internos as camadas da armadura de flexão.

Os estribos testados por HAEUSLER (2009) eram compostos por duas barras retas horizontais, para formar o banzo inferior, e uma barra horizontal formando o banzo superior, todas soldadas em montante e diagonais de barras lisas cujas inclinações se alternavam entre 90° e 45° , respectivamente (Figura 3.5d). A primeira modificação deste estribo também foi testada ainda em HAEUSLER (2009) e difere do projeto original pelo comprimento reto na parte superior das diagonais que permitiu aumentar a área de contato com a solda e, consequentemente, a inclinação das diagonais, uma vez que foi mantida a distância de 200 mm entre as barras das diagonais que possuem a mesma inclinação (Figura 3.5e). ELIGEHAUSEN *et al.* (2003), SIBURG *et al.* (2014), KUERES *et al.* (2016) e FURCHE e SCHMIDT (2019) também testaram modificações desse estribo, verificou-se que: no banzo superior, as dobras das diagonais ultrapassaram a altura da barra horizontal onde são soldadas – posicionando-se no mesmo nível das barras da armadura de flexão – e dois pontos de solda passaram a ser feitos; no banzo inferior, as barras horizontais possuem diâmetro maior; e os montantes, que originalmente estavam à 90° , passam a ser ligeiramente inclinados e contar com nervuras nas barras. Novamente, não são dispostas barras de flexão no interior das dobras desse estribo (Figura 3.5e). Em todos os casos, a ancoragem inferior desse estribo treliçado estava posicionada em placas de concreto pré-moldado.

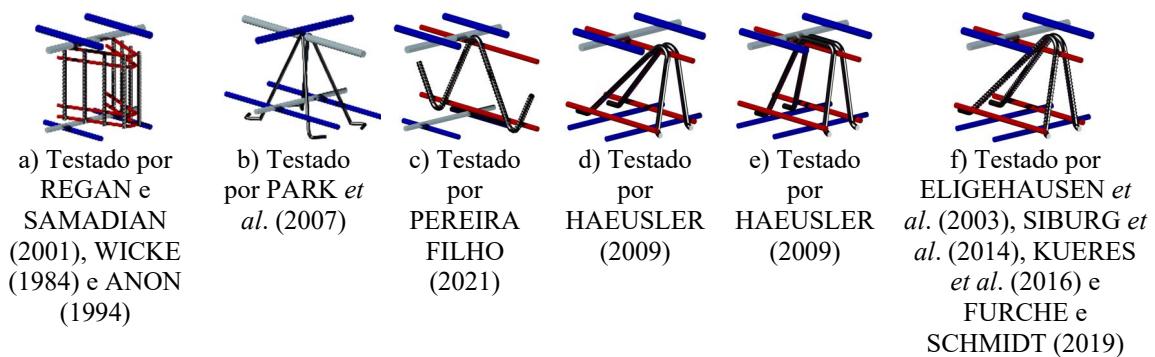


Figura 3.5 – Tipos de estribos treliçados usados como armadura de combate à punção.

Diante da variedade de alternativas para ancoragem dos estribos, os seus arranjos, diretamente influenciados pela forma de ancoragem, não puderam ser agrupadas nas distribuições usuais apresentadas no item 2.2.2. Dessa forma, as distribuições empregadas com os estribos apresentados neste capítulo estão representadas, de forma genérica, isto é, salvo as variações quanto ao número de camadas e número de ramos por camada, na Figura 3.6.

De maneira geral, para quando as dobras de ancoragem envolvem a armadura de flexão, as opções de arranjo capazes de minimizar eventuais conflitos entre barras se restringem as distribuições em camadas quadradas ou retangulares em torno do perímetro do pilar, apesar de dificultar a contabilização do número de ramos que efetivamente contribuem na resistência à punção, como o da Figura 3.6a, que mostra a alternativa adotada para os estribos individuais testados por YAMADA *et al.* (1992), REGAN (1980), CHANA e DESAI (1992), REGAN e SAMADIAN (2001) e EINPAUL *et al.* (2016), e o da Figura 3.6b, utilizada para os estribos individuais de JANG e KANG (2019) e EOM *et al.* (2018), assim como para os estribos fechados. Para os estribos abertos com ancoragem em volta das barras de flexão, o mesmo padrão de distribuição, formando faixas ortogonais a partir das faces do pilar, pode ser observado nas Figuras 3.6c, 3.6d, 3.6e, 3.6f e 3.6g. E, embora a Figura 3.6h mostre essa mesma distribuição para os estribos desenvolvidos por GLIKMAN *et al.* (2017), que não se ancoram envolvendo as barras de flexão, outro arranjo poderia comprometer a praticidade de montagem dessas armaduras que permite a colocação dos trilhos, onde são soldados os estribos, antes de qualquer barra da armadura de flexão, com as chances de conflitos entre barras minimizadas.

A uniformidade na distribuição dos estribos contínuos de LIPS *et al.* (2010) e BROMS (1990), mostradas nas Figuras 3.6i e 3.6j, respectivamente, também foi a alternativa encontrada por estes autores para garantir que o espaçamento entre os ramos dos estribos fosse mantido, evitando sobreposição com as barras de flexão. Entretanto, para os contínuos testados por EOM *et al.* (2018), a Figura 3.6k apresenta uma distribuição empregada que não estava limitada aos detalhes das ancoragens desses estribos, visto que suas dobras são internas as camadas da armadura de flexão, o que proporciona mais liberdade para dispor esse reforço, viabilizando outros arranjos, como o da Figura 3.6l, que mostra ser possível distribuir estribos radialmente, como fizeram REGAN e SAMADIAN (2001), WICKE (1984) e ANON (1994).

Entretanto, PARK *et al.* (2007), devido a solda das treliças serem feitas diretamente nas barras de flexão, condiciona a distribuição desse tipo de armadura da maneira como mostrada na Figura 3.6m. De toda forma, a variedade de distribuição viável para quando os estribos se ancoram internamente aos níveis das armaduras de flexão ou, quando no mesmo nível, sem envolvê-la, é vista também nas Figuras 3.6n, 3.6o e 3.6p, que apresentam as distribuições testadas de forma inédita para estribos treliçados de PEREIRA FILHO (2021), HAEUSLER (2009), ELIGEHAUSEN *et al.* (2003), SIBURG *et al.* (2014), KUERES *et al.* (2016) e FURCHE e SCHMIDT (2019).

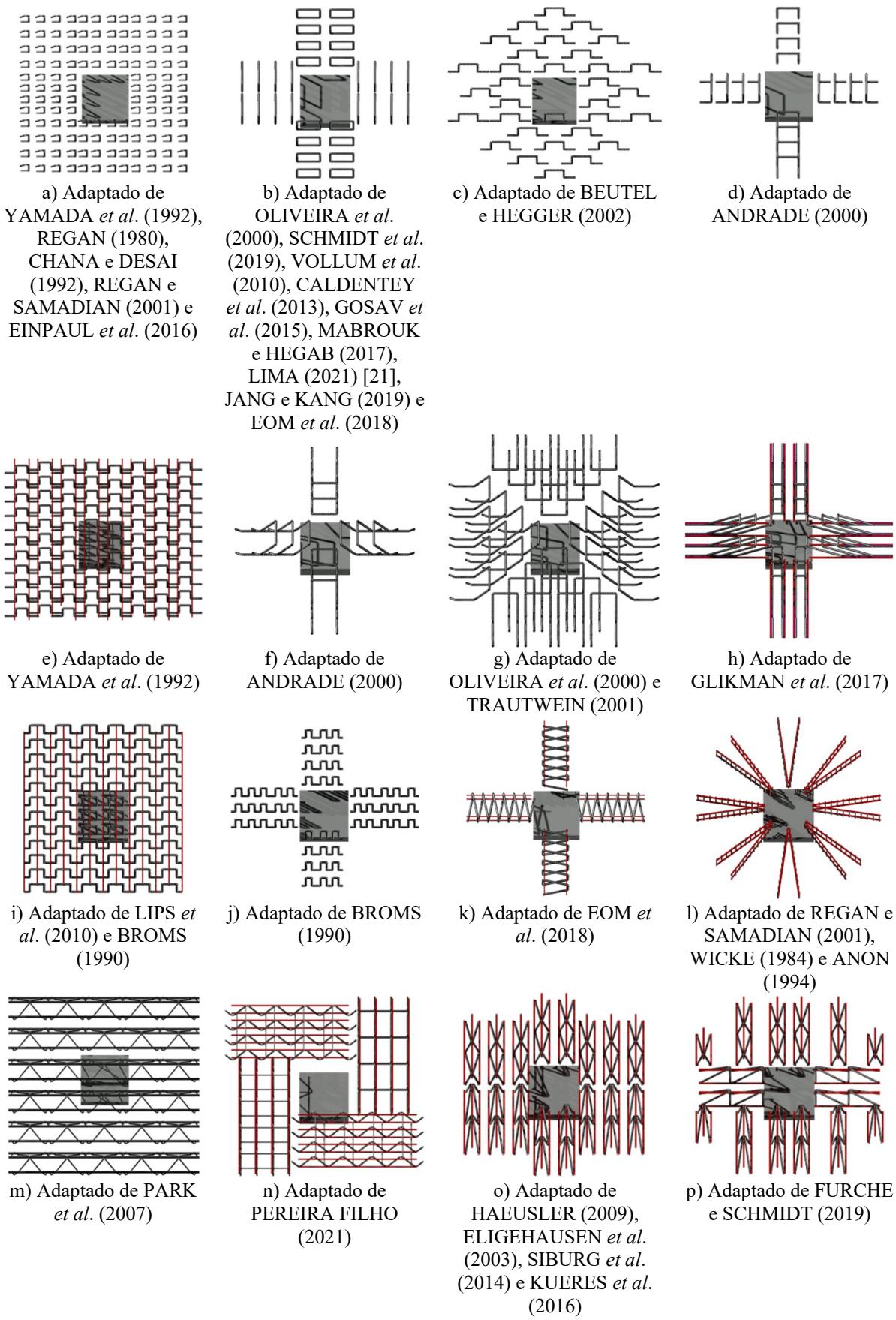
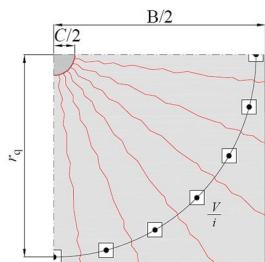


Figura 3.6 – Arranjos para estribos usados como armadura de combate à punção.

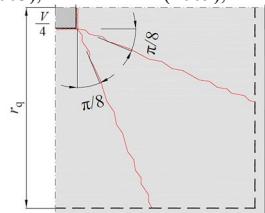
3.2. CRITÉRIOS DE FILTRAGEM DE DADOS

A seleção das lajes para compor o banco de dados obedeceu, inicialmente, à dois critérios: carregamento e ruptura. Dessa forma, compõem o banco de dados somente resultados referentes as lajes que foram submetidas a carregamento centrado e apresentaram ruptura por punção. Dessa forma, foi feita a verificação da capacidade resistente à flexão de todas as lajes coletadas por meio de modelos mecânicos propostos em KOPPITZ *et al.* (2014) apresentados na Figura 3.7, com as devidas equações desenvolvidas para cada caso. Para todas as lajes o momento fletor último por unidade de comprimento, ou momento resistente unitário (M_R), foi calculado conforme a equação prescrita no *fib MODEL CODE 2010* (2013).



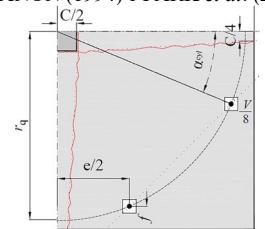
$$V_{R,flex} = M_R \cdot \frac{8}{\left(r_q - \frac{C}{2}\right)} \cdot \frac{B}{2} \cdot \ln(\sqrt{2} + 1)$$

a) Linhas de ruptura aplicadas em: SCHMIDT *et al.* (2019), BEUTEL e HEGGER (2002), HEGGER *et al.* (2007), ELIGEHOUSEN *et al.* (2003), HAEUSLER (2009), SIBURG *et al.* (2014), FURCHE e SCHMIDT (2019) e KUERES *et al.* (2016)



$$V_{R,flex} = M_R \cdot \frac{16}{(2 \cdot r_g - C)} \cdot \left[\frac{C}{2} + \frac{B - C}{2} \cdot 2 \cdot (\sqrt{2} - 1) \right]$$

b) Linhas de ruptura aplicadas em: VOLLUM *et al.* (2010), OLIVEIRA *et al.* (2000), MABROUK e HEGAB (2017), GOSAV *et al.* (2016), TRAUTWEIN (2001), ANDRADE (2000), EOM *et al.* (2018), REGAN (1980), REGAN e SAMADIAN (2001), WICKE (1984), ANON (1994) e PARK *et al.* (2007)

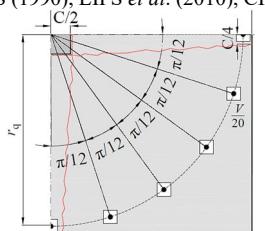


$$V_{R,flex} = M_R \cdot \frac{4}{(B - C)} \cdot \frac{B^2 - B \cdot C - (C/2)^2}{r_q \cdot [\cos(\alpha_{cyl}) + \sin(\alpha_{cyl})] - C}$$

onde,

$$\alpha_{cyl} = \arctan\left[\frac{e}{(B - \frac{C}{2} + \epsilon)}\right]$$

c) Linhas de ruptura aplicadas em: LIMA (2021), CALDENTEY *et al.* (2013), GLIKMAN *et al.* (2017), YAMADA *et al.* (1992), BROMS (1990), LIPS *et al.* (2010), CHANA e DESAI (1992), EINPAUL *et al.* (2016), PEREIRA FILHO (2021)



$$V_{R,flex} = M_R \cdot \frac{20}{(B - C)} \cdot \frac{B^2 - B \cdot C - (C/2)^2}{r_a \cdot (1 + \sqrt{2} + \sqrt{3} + \sqrt{6}) - 5 \cdot C}$$

d) Linhas de ruptura aplicadas em: BROMS (2019)

Figura 3.7 – Linhas de ruptura utilizadas para estimar a resistência à flexão das lajes (adaptado de KOPPITZ *et al.*, 2014).

O modo de ruptura por punção – adotado conforme informado pelo autor ou, em caso de ausência dessa informação, classificado através do corte do espécime ensaiado – também foi um critério de filtragem. Logo, lajes que apresentaram ruptura por punção fora da região das armaduras de cisalhamento foram excluídas do banco de dados.

Dessa forma, a avaliação da eficiência dos estribos foi realizada somente sobre os casos de ruptura dentro da região armada ou adjacente ao pilar. Para a aceitação deste último modo de ruptura, a justificativa está na possibilidade de estender as análises sobre lajes com baixas e médias taxas de armaduras de cisalhamento para os casos com altas taxas.

3.3. TRATAMENTO DE DADOS

O tratamento dos dados consistiu sobretudo na obtenção dos valores teóricos de resistência à punção. E, como consequência do descarte de resultados de lajes com ruptura externa à região das armaduras de cisalhamento, foi realizado somente o cálculo das estimativas de resistência à compressão diagonal ($V_{R,\text{máx}}$) e à tração diagonal na região das armaduras de cisalhamento ($V_{R,\text{cs}}$), cujas equações foram apresentadas nas Tabelas 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4.

Para os casos de arranjos em que a área de aço por camada não era constante, a parcela de esforço cortante resistida pela armadura de cisalhamento ($V_{R,s}$) foi determinada através do somatório das forças resultantes em uma quantidade de ramos de estribo – definida de acordo com a zona de armadura de cisalhamento considerada por cada norma – multiplicada pela tensão e seção transversal, isto é, a contribuição da armadura de cisalhamento considerando-se uma área total de aço onde se desenvolve a tensão considerada pela norma.

A Figura 3.8 ilustra a contagem dos ramos dos estribos das lajes 4 e 5 de BROMS (1990) consideradas nos cálculos de resistência à punção dentro da região das armaduras segundo as normas ACI 318 (2019), EUROCODE 2 (2014), ABNT NBR 318 (2014) e *fib* MODEL CODE 2010 (2013). Somente para o caso do EUROCODE 2 (2014) e da ABNT NBR 6118 (2014), a região compreendida entre $1,5 \cdot d$ é contada a partir do afastamento de $0,25 \cdot d$ das faces do pilar, para desconsiderar as barras interceptadas no início e fim da superfície de ruptura (assumida por essas normas como sendo inclinada em $26,6^\circ$) que favorecem a condição de pequenos comprimentos de embutimento, logo, podem não contribuir efetivamente para a resistência.

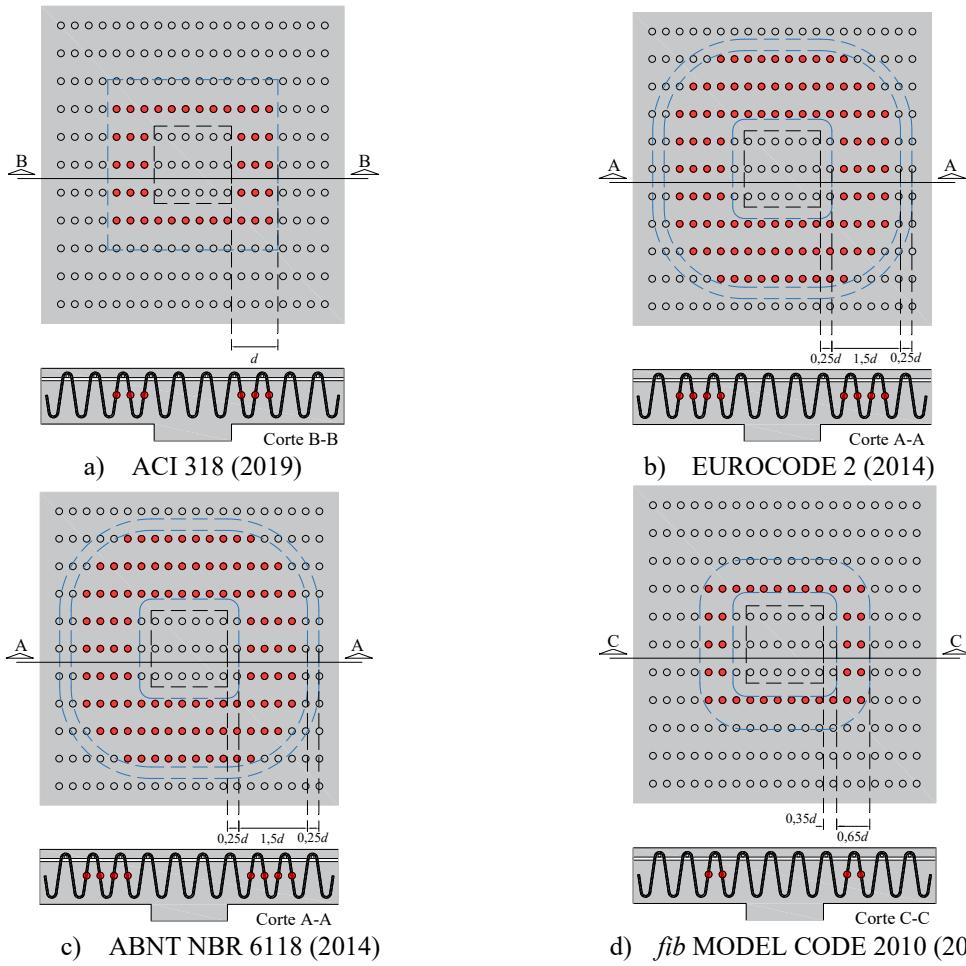


Figura 3.8 – Armadura de cisalhamento considerada para o cálculo da resistência à punção de acordo com as normas.

3.4. PARÂMETROS DE ANÁLISE

Os parâmetros utilizados para as análises realizadas consistiram basicamente em: 1. Acréscimo de resistência à punção, medido através do valor de carga última experimental dividido pelo de carga última teórico de uma laje igual sem armadura de cisalhamento, representado por V_u/V_{Rc} ; pelo acréscimo de força desempenhada pela armadura de cisalhamento que se distribui em uma determinada área de concreto, expresso pelo produto $\rho_{sw} \cdot f_{ysw}$, onde ρ_{sw} é a taxa de armadura de cisalhamento e f_{ysw} é a tensão de escoamento do aço usado para a confecção dos estribos.

Na determinação de V_{Rc} , foi utilizada a estimativa de resistência à punção de lajes sem armadura de cisalhamento proposta na seção 19.5 da ABNT NBR 6118 (2014) e apresentada na Tabela 2.3 deste trabalho. Segundo PEREIRA FILHO *et al.* (2019), a equação na norma brasileira melhor considera a influência dos parâmetros que influenciam na resistência à punção. Portanto, além deste aspecto, a decisão de medir o acréscimo de resistência pela razão V_u/V_{Rc} , e não

através da razão V_u/V_{REF} , onde V_{REF} é o valor de carga última obtida no ensaio de uma laje de referência, comumente utilizada, é justificada pelo fato de V_{REF} muitas vezes não representar fielmente uma outra laje do banco de dados, em virtudes de diferenças que podem ocorrer entre os espécimes, como a resistência à compressão do concreto.

A taxa de armadura de cisalhamento foi determinada pela Equação 3.1:

$$\rho_{\text{sw}} = \frac{A_{\text{sw},1+2}}{2 \cdot s_r \cdot u_{0,5 \cdot d}} \quad \text{Equação 3.1}$$

onde $A_{\text{sw},1+2}$ = área transversal das primeiras duas camadas de armadura de cisalhamento (mm^2); s_r = distância radial entre tais camadas (mm); e $u_{0,5 \cdot d}$ = perímetro de controle medido a uma distância de $0,5 \cdot d$ das faces do pilar com geometria do traçado igual ao assumido pelo *fib MODEL CODE 2010 (2013)* na seção 7.3.5.2 e apresentado, neste trabalho, na Tabela 2.4.

A Figura 3.9 mostra a forma de apresentação dos resultados dos acréscimos de resistência à punção para um grupo de estribos genérico, onde cada gráfico destaca somente os pontos referentes as lajes cujos estribos possuem os detalhes de ancoragem a serem analisados.

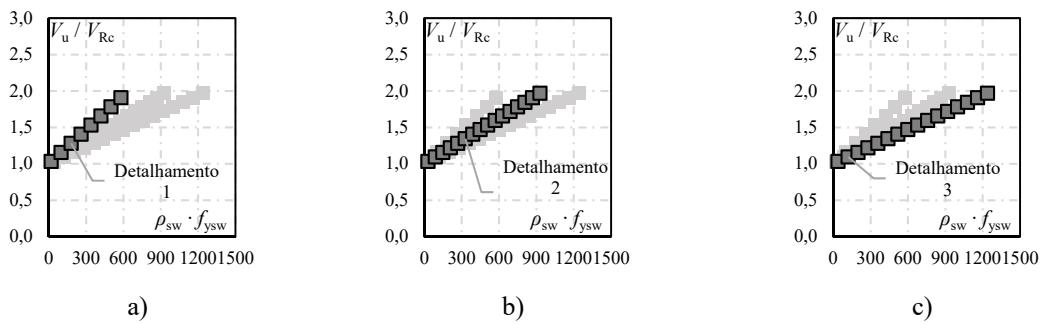


Figura 3.9 – Modelo de gráfico para avaliação dos acréscimos de resistência à punção proporcionados pela armadura de cisalhamento.

Adicionalmente, as análises de segurança foram feitas sobre o seguinte parâmetro: 2. Acréscimo de resistência à punção, representado novamente por V_u/V_{Rc} , pelo acréscimo de força estimada para a armadura de cisalhamento, medido pela razão $V_{\text{Rc}}/V_{\text{Rc}}$. Todo valor teórico correspondeu ao estimado de acordo com cada modelo normativo considerado. A Figura 3.10 apresenta os gráficos utilizados para suas respectivas normas, onde, para que os resultados experimentais das lajes pudessem ser avaliados em comparação às previsões normativas, plotou-se, em cada

gráfico, uma linha cheia que expressa a tendência descrita pela equação de V_{Rcs} para demarcar um limite inferior de segurança, uma vez que a região acima desta linha representa a situação $V_u > V_{Rcs}$. As linhas tracejadas indicam a limitação devido ao esmagamento da biela (V_{Rmax}), no caso do ACI 318 (2019), e o limite de eficiência do reforço ($1,5 \cdot V_{Rc}$), para o caso do EUROCODE 2 (2014).

Como visto no item 2.3, em lajes com armadura de cisalhamento, a resistência à punção dentro da região armada é definida pela soma de duas parcelas: a primeira é a resistência do concreto (de uma laje sem armadura de cisalhamento) minorada por um coeficiente de redução da eficiência, e a segunda é a resistência proporcionada pela armadura de cisalhamento. Para o ACI 318 (2019), EUROCODE 2 (2014) e ABNT NBR 6118 (2014), o coeficiente de redução de eficiência do concreto é constante, resultando no aspecto retilíneo das linhas mostradas nas Figuras 3.10a, 3.10b e 3.10c. Entretanto, para o *fib MODEL CODE* 2010 (2013), é assumido que o valor desse coeficiente varia conforme o aumento da relação V_s/V_c para considerar a diminuição da parcela resistente do concreto com o aumento da rotação da laje, que, por sua vez, aumenta com a adição de armadura de cisalhamento devido ao acréscimo da resistência à punção proporcionado por ela.

Dessa forma, a equação da linha que expressa a tendência da resistência à punção dentro da região da armadura de cisalhamento segundo o *fib MODEL CODE* 2010 (2013) foi obtida plotando-se, em função de V_{Rs}/V_{Rc} , a razão V_{Rcs}/V_{Rc} , para cada grupo de estribo analisado. Como pode ser observado na Figura 3.10d, que apresenta o gráfico utilizado para o grupo dos estribos individuais, a linha adotada é descrita por uma equação polinomial de segunda ordem que apresentou um coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,989.

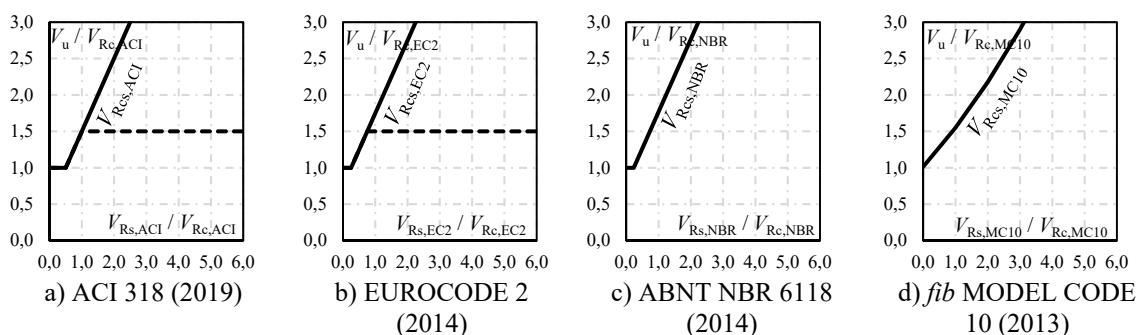


Figura 3.10 – Modelos de gráfico para avaliação da segurança proporcionada pela armadura de cisalhamento.

4. BANCO DE DADOS

Compõem o banco de dados 119 resultados de ensaios de punção simétrica em ligações laje-pilar, cujas características, de geometria e material, estão resumidas nas Tabelas 4.1 a 4.5, onde são apresentados os autores, o número de lajes ensaiadas, o raio de aplicação de carga (r_q), diâmetro ou lado do pilar (C), altura útil da laje (d), taxa de armadura de flexão tracionada (ρ), resistência média à compressão do concreto (f_c), conformação superficial das barras que compõem os estribos, arranjo utilizado, taxa de armadura de cisalhamento (ρ_{sw}) e tensão de escoamento do aço utilizado para os estribos (f_{ysw}).

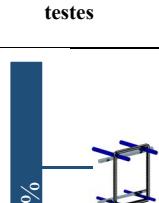
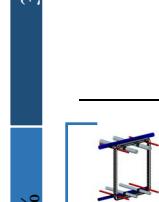
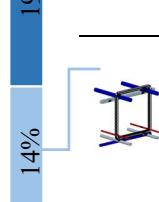
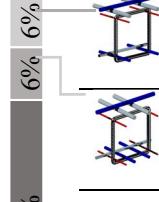
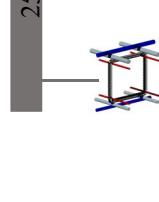
Para a análise dos estribos individuais, optou-se por descartar as lajes ensaiadas por EOM *et al.* (2018) em virtude de o índice de esbeltez (dado pela razão r_q/d) dessas lajes ser demasiadamente pequeno, fazendo com que tais modelos locais são sejam adequados para retratar o comportamento estrutural do pavimento de uma edificação com dimensões reais. Dessa forma, 23 lajes forneceram resultados para a utilização de baixas a médias taxas de armadura de cisalhamento com estribos individuais, como pode ser observado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Principais características das lajes ensaiadas com estribos individuais

Distribuição dos 23 testes	Autor	nº Lajes	r_q (mm)	C (mm)	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	Barra	Arranjo	ρ_{sw} (%)	f_{ysw} (MPa)
26%	YAMADA <i>et al.</i> (1992)	6	750	300	167	1,1	25,9 - 27,8	Nervurada	Fig. 3.6a	0,25 - 2,41	317 - 347
13%	REGAN (1980)	3	1293	240	128	1,3	26,7 - 32,8	Nervurada	Fig. 3.6a	0,30 - 0,54	510 - 740
61%	CHANA e DESAI (1992)	7	1200	300/ 400	188 - 210	0,8 - 0,9	30,6 - 36,3	Nervurada	Fig. 3.6a	0,14 - 1,06	520
	REGAN e SAMADIAN (2001)	2	1445	200	160	1,1	39,8 - 44,1	Nervurada	Fig. 3.6a	0,22 - 0,39	350 - 635
	EINPAUL <i>et al.</i> (2016)	1	1468	260	205	1,5	0,7	Nervurada	Fig. 3.6a	0,7	560
	JANG e KANG (2019)	4	725	450	174	0,7 - 1,4	29,5 - 44,4	Nervurada	Fig. 3.6b	0,29 - 0,57	427 - 538

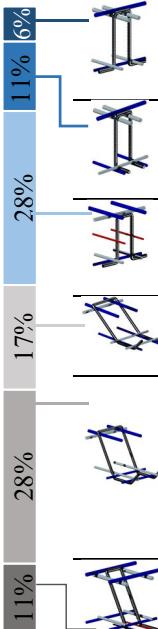
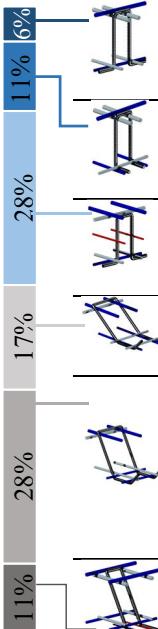
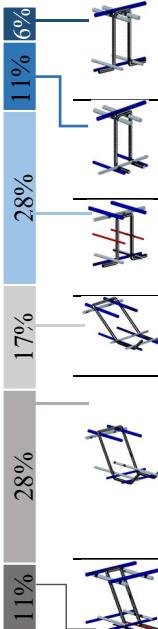
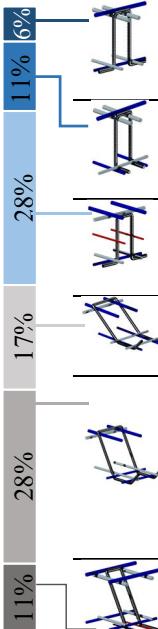
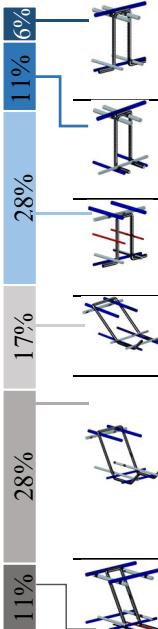
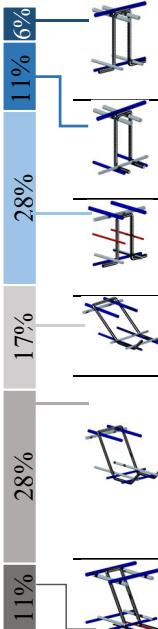
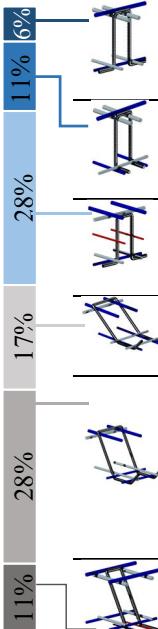
Para os estribos fechados, as lajes ensaiadas por GOSAV *et al.* (2015) foram descartadas, pois suas cargas de ruptura alcançaram em mais de 90% os resultados de previsão para a resistência à flexão dessas lajes. Portanto, 36 espécimes forneceram resultados para a utilização de baixas taxas de armadura de cisalhamento com estribos fechados, como pode ser observado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Principais características das lajes ensaiadas com estribos fechados

Distribuição dos 36 testes	Autor	nº Lajes	r_q (mm)	C (mm)	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	Barra	Arranjo	ρ_{sw} (%)	f_{ysw} (MPa)
 31%	OLIVEIRA <i>et al.</i> (2000)	1	810	120	105	1,2	60,0	Nervurada	Fig. 3.6b	0,24	730
	SCHMIDT <i>et al.</i> (2019)	8	1200 - 1700	280 - 400	224 - 320	1,4	30,9 - 34,8	Nervurada	Fig. 3.6b	0,13 - 0,41	505 - 595
	LIMA (2021)	2	1124	300	143 - 147	0,9 - 1,0	29,9 - 30,0	Nervurada	Fig. 3.6b	0,13 - 0,37	660 - 674
 19%	VOLLUM <i>et al.</i> (2010)	5	1372	270	174	0,6 - 1,3	23,2 - 27,2	Nervurada	Fig. 3.6b	0,28 - 0,55	485 - 560
	LIMA (2021)	2	1124	300	145 - 146	0,9	29,9 - 30,5	Nervurada	Fig. 3.6b	0,13	542 - 706
 14%	CALDENTEY <i>et al.</i> (2013)	2	1250	450	200	1,1	37,9 - 38,3	Nervurada	Fig. 3.6b	0,22	575
	LIMA (2021)	3	1124	300	143 - 148	0,9 - 1,0	29,9 - 30,0	Nervurada	Fig. 3.6b	0,13 - 0,37	600 - 706
 6%	LIMA (2021)	2	1124	300	142 - 147	0,9 - 1,0	29,9 - 30,0	Nervurada	Fig. 3.6b	0,13 - 0,37	542 - 674
	LIMA (2021)	2	1124	300	148	0,9	29,9 - 30,5	Nervurada	Fig. 3.6b	0,13 - 0,30	542 - 706
 25%	CALDENTEY <i>et al.</i> (2013)	2	1250	450	200	1,1	37,2 - 38,4	Nervurada	Fig. 3.6b	0,22	575
	MABROUK e HEGAB (2017)	3	1000	300	214	0,7	35,0	Nervurada	Fig. 3.6b	0,48 - 0,97	500
	LIMA (2021)	4	1124	300	144 - 148	0,7 - 1,0	29,9 - 30,5	Nervurada	Fig. 3.6b	0,13 - 0,37	542 - 706

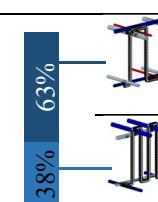
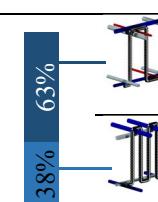
Por meio da Tabela 4.3, observa-se que as 18 lajes selecionadas forneceram resultados para a utilização de baixas a médias taxas de armadura de cisalhamento com estribos abertos.

Tabela 4.3 – Principais características das lajes ensaiadas com estribos abertos

Distribuição dos 18 testes	Autor	nº Lajes	r_q (mm)	C (mm)	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	Barra	Arranjo	ρ_{sw} (%)	f_{ysw} (MPa)
 6%	BEUTEL e HEGGER (2002)	1	1200	400	190	0,8	29,8	Nervurada	Fig. 3.6c	0,37	592
 11%	ANDRADE (2000)	2	855	120	89 - 100	1,3 - 1,5	36,2 - 51,9	Nervurada	Fig. 3.6d	0,28 - 0,42	722 - 866
 28%	YAMADA <i>et al.</i> (1992)	5	791	300	167	1,2	22,7 - 24,4	Nervurada	Fig. 3.6e	0,59 - 1,79	331 - 367
 17%	ANDRADE (2000)	3	855	120	89 - 100	1,3 - 1,5	36,2 - 50,1	Nervurada	Fig. 3.6f	0,27 - 0,42	722 - 866
 28%	OLIVEIRA <i>et al.</i> (2000)	2	810	120	102 - 105	1,3	60,9 - 62,0	Nervurada	Fig. 3.6g	0,40	647
 11%	TRAUTWEIN (2001)	3	1350	200	139 - 164	1,2 - 1,4	40,6 - 45,7	Nervurada	Fig. 3.6 / Fig. 3.6g	0,25 - 0,38	616 - 794
 11%	GLIKMAN <i>et al.</i> (2017)	2	1550	406	213	1,5	26,9 - 28,9	Nervurada	Fig. 3.6h	0,26 - 0,39	532

Da mesma forma como feito no grupo dos estribos individuais, as lajes ensaiadas por EOM *et al.* (2018) foram descartadas das análises sobre os estribos contínuos pelo pequeno índice de esbeltez. Restando, ao final, 8 lajes que forneceram resultados para a utilização de médias taxas de armadura de cisalhamento com estribos contínuos, como pode ser observado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Principais características das lajes ensaiadas com estribos contínuos

Distribuição dos 8 testes	Autor	nº Lajes	r_q (mm)	C (mm)	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	Barra	Arranjo	ρ_{sw} (%)	f_{ysw} (MPa)
 63%	LIPS <i>et al.</i> (2010)	5	1468	130 - 520	208 - 354	1,5	30,4 - 37,1	Nervurada	Fig. 3.6i	0,85 - 1,11	536 - 550
 38%	BROMS (1990)	3	1000	250	150	0,6 - 0,7	21,0 - 34,0	Nervurada	Fig. 3.6i / Fig. 3.6j	0,68	442 - 471

Lajes com estribos treliçados selecionadas para o banco de dados totalizaram 34 espécimes, que forneceram resultados para a utilização de médias a altas taxas de armadura de cisalhamento, como pode ser observado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Principais características das lajes ensaiadas com estribos treliçados

Distribuição dos 34 testes	Autor	nº Lajes	r_q (mm)	C (mm)	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	Barra	Arranjo	ρ_{sw} (%)	f_{ysw} (MPa)
         	REGAN e SAMADIAN (2001)	2	1372	200	165	1,3	42,3 – 44,3	Nervurada	Fig. 3.61	0,69 - 1,22	520
	WICKE (1984)	2	1200	250	165	0,8 - 1,4	28,5 - 35,9	Nervurada	Fig. 3.61	0,46	520
	ANON (1994)	4	1200	250	165 - 245	1,0 - 1,4	31,2 - 32,5	Nervurada	Fig. 3.61	0,52 - 0,72	550
	PARK <i>et al.</i> (2007)	2	825	250	90	0,8 - 1,6	27,4	Lisa	Fig. 3.6m	0,46	513
	PEREIRA FILHO (2021)	7	1125	400	152 - 169	1,0 - 2,0	23,1 - 35,3	Nervurada	Fig. 3.6n	0,46 - 1,17	430 - 675
	HAEUSLER (2009)	2	1200	300	160	1,9	21,9	Lisa	Fig. 3.6o	0,74	525
	HAEUSLER (2009)	3	1200	300	147 - 340	0,5 - 2,1	21,3 - 47,2	Lisa	Fig. 3.6o	0,55 - 0,76	534
	ELIGEHAU SEN <i>et al.</i> (2003)	3	1080	180 - 260	145 - 205	1,0 - 1,5	25,0 - 28,5	Lisa	Fig. 3.6o	0,84 - 1,20	500
	SIBURG <i>et al.</i> (2014)	6	1200	240 - 300	145 - 295	0,7 - 1,5	21,9 - 48,2	Nervurada	Fig. 3.6o	1,12 - 1,68	500
	FURCHE e SCHMIDT (2019)	2	700 - 1200	240 - 300	135 - 290	0,9 - 1,1	20,4 - 40,7	Nervurada	Fig. 3.6p	1,54 - 2,43	500
KUERES <i>et al.</i> (2016)	1	1200	300	215	0,7	21,6	Nervurada	Fig. 3.6o	1,27	500	

5. RESULTADOS

5.1. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA ANCORAÇÃO

A Figura 5.1 apresenta os resultados dos estribos individuais. Por meio da Figura 5.1a, observa-se que o comportamento do detalhamento utilizado por YAMADA *et al.* (1992) superou as demais a medida que proporcionou os maiores acréscimos de resistência, para as mesmas faixas de taxa de armadura de cisalhamento, em tendência ascendente que, por sua vez, foi favorecida pelos pequenos raios de carga sob os quais foram ensaiados esses espécimes, com consequente aumento da rigidez à flexão e diminuição da interferência que as fissuras de flexão causam no desempenho das armaduras de punção.

A Figura 5.1b atesta que o detalhamento utilizado por REGAN (1980) também apresentou comportamento eficiente ao aumentar a resistência à punção, embora a quantidade de espécimes analisados seja menor, é fato que, incrementos de resistência substanciais foram obtidos para taxas de armadura de cisalhamento consideradas baixas.

A constatação do bom desempenho dos detalhamentos utilizados por YAMADA *et al.* (1992) e REGAN (1980) leva à discussão pela necessidade de compatibilização entre as distribuições das armaduras de flexão e cisalhamento, uma vez que as dobras desses estribos, além de serem feitas em direções diferentes (ortogonais), envolvem as barras de ao menos uma camada externa da armadura de flexão, favorecendo a ocorrência de sobreposição com as barras das camadas internas diante das elevadas taxas de armadura de flexão que comumente são requeridas em projetos de lajes lisas.

A Figura 5.1c apresenta os resultados obtidos para os estribos utilizados por CHANA e DESAI (1992), REGAN e SAMADIAN (2001), EINPAUL *et al.* (2016) e JANG e KANG (2019), onde fica atestada a boa atuação de um detalhamento que apresenta menos interferência sobre a distribuição das barras da armadura de flexão para proporcionar incrementos de resistência elevados, embora em tendência menos acentuada em virtude da limitação que o menor embutimento exerce sobre a ativação desses estribos quando suas dobras são feitas em torno das barras das camadas internas da armadura de flexão, por estarem mais próximas da superfície de ruptura que intercepta as barras que efetivamente contribuem para a resistência à punção.

Ainda na Figura 5.1c, os pontos com marcação na cor azul indicam as lajes em que as dobras dos estribos foram feitas em direções ortogonais. Percebe-se, então, que não houve alteração da tendência de resultados, apontando que essa particularidade significa somente mais uma dificuldade construtiva.

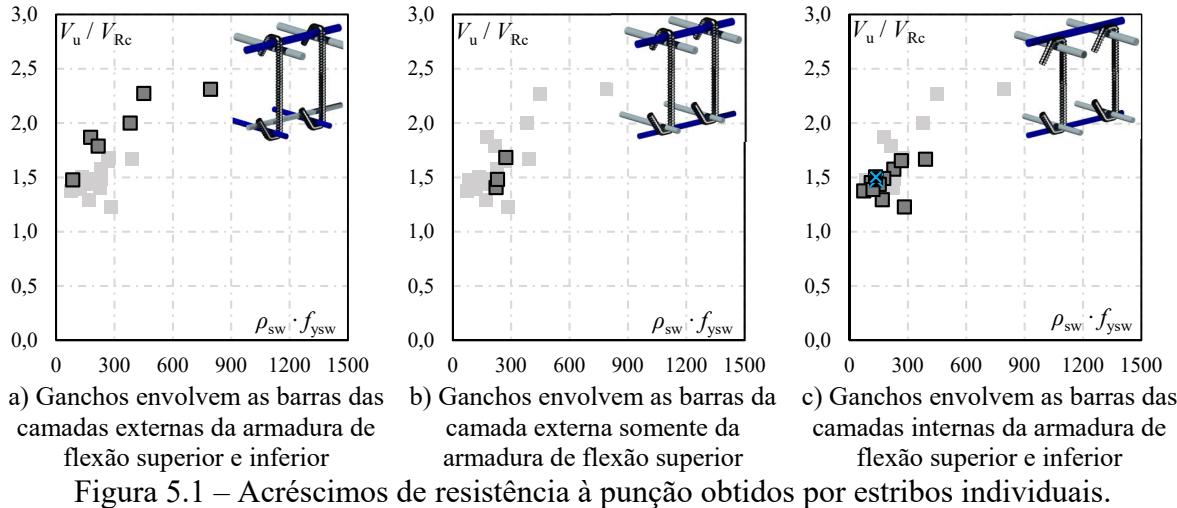


Figura 5.1 – Acréscimos de resistência à punção obtidos por estribos individuais.

Os resultados dos estribos fechados são apresentados na Figura 5.2. Em destaque na Figura 5.2a estão os estribos testados por OLIVEIRA *et al.* (2000), SCHMIDT *et al.* (2019) e LIMA (2021), cujo detalhamento é o que apresenta melhor rendimento dentre os demais deste grupo. Novamente, o envolvimento das dobras nas barras de flexão superiores e inferiores proporcionou os maiores acréscimos de resistência, sendo o seu comportamento ligeiramente comprometido quando há o afastamento das barras de flexão do interior das dobras, como é possível perceber na Figura 5.2b, que apresenta os resultados para os estribos utilizados por VOLLUM *et al.* (2010) e LIMA (2021).

Através dos resultados em destaque mostrados nas Figuras 5.2c, 5.2d e 5.2e, que compreendem os estribos utilizados por CALDENTEY *et al.* (2013) e LIMA (2021), cujas dobras não envolvem as barras de flexão superiores e inferiores simultaneamente, fica comprovada a ineficiência destes detalhamentos, uma vez que não proporcionaram incrementos de resistência na mesma ordem de grandeza que os detalhamentos analisados anteriormente para a mesma faixa de taxa de armadura de cisalhamento.

Por fim, fica vetada qualquer recomendação de utilização do detalhamento analisado na Figura 5.2f, em razão da nítida formação de um patamar de pequenos acréscimos de resistência, evidenciando que não houve aumento nos incrementos de resistência à medida que se elevou a taxa de armadura de cisalhamento e que a deficiência da ancoragem desses estribos favorece o surgimento das fissuras de delaminação, pois os pontos marcados na cor vermelha indicam as lajes que delaminaram.

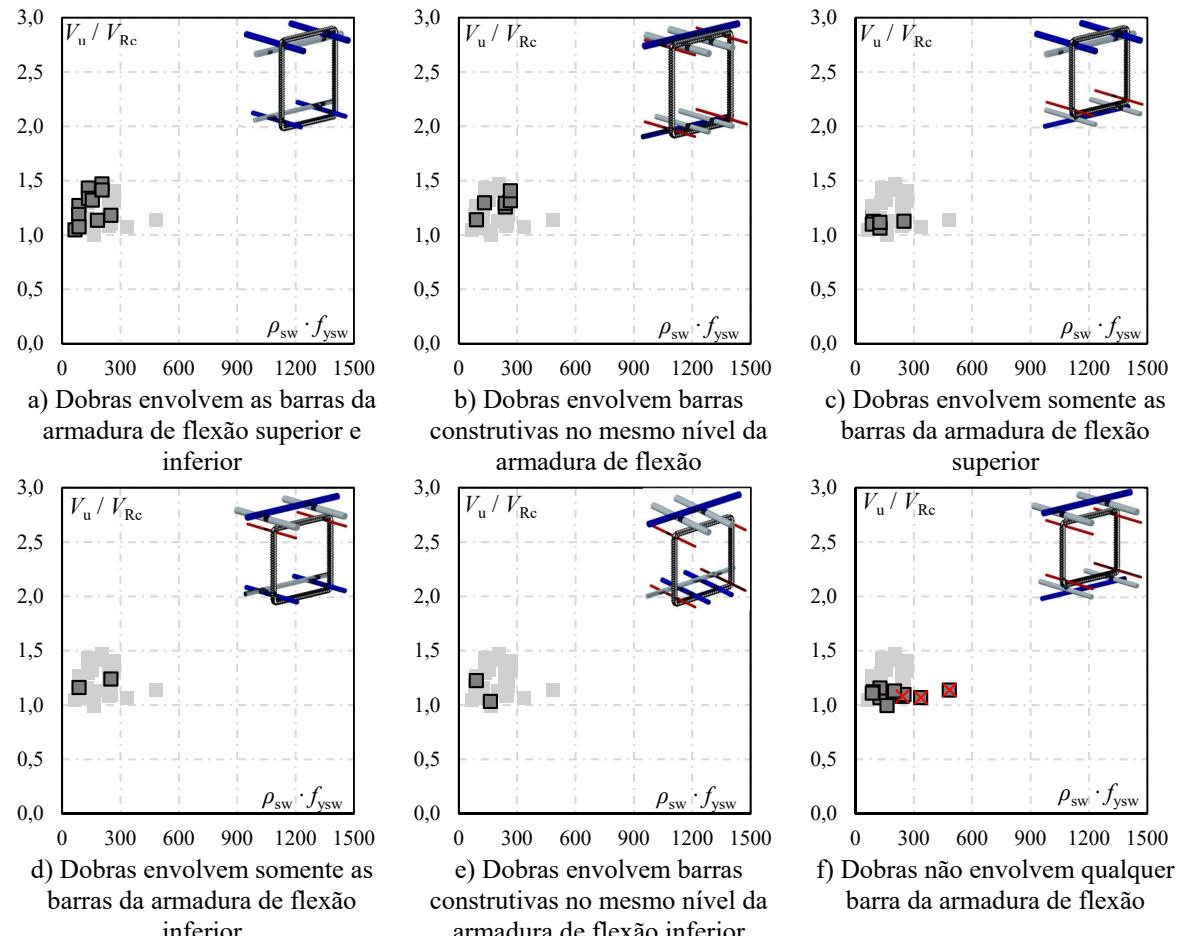


Figura 5.2 – Acréscimos de resistência à punção obtidos por estribos fechados.

A Figura 5.3 apresenta os resultados referentes as lajes ensaiadas com estribos abertos, por meio da qual as análises são feitas primeiramente sobre aqueles com ramos verticais. Dessa forma, verifica-se através da Figura 5.3a, que o detalhamento utilizado por BEUTEL e HEGGER (2002) aumentou em cerca de 40% a resistência à punção da laje onde foi utilizado e que os incrementos de resistência proporcionados pelos estribos utilizados por ANDRADE (2000) foram ligeiramente inferiores, como pode ser observado na Figura 5.3b. Logo, a direção para

onde são feitas as dobras que ancoram o mesmo tipo de estribo não exerce influência sobre a sua atuação.

Por outro lado, os resultados destacados na Figura 5.3c, que pertencem as lajes ensaiadas por YAMADA *et al.* (1992), mostram que a tendência descrita pelos incrementos de resistência foi consequência de um detalhamento que comprometeu em demasiado a ativação desses estribos, uma vez que, a ancoragem das dobras superiores era deficiente e o espaçamento entre os ramos era excessivo, o que pode ter favorecido o desenvolvimento de superfícies de ruptura entre as camadas da armadura de cisalhamento.

Quanto aos estribos abertos de ramos inclinados, fica atestado, por meio da comparação entre os pontos mostrados nas Figuras 5.3d e 5.3e, as quais destacam, respectivamente, os resultados referentes aos estribos utilizados por ANDRADE (2000) e aos testados por OLIVEIRA *et al.* (2000) e TRAUTWEIN (2001), que a inclinação dos ramos em 60° é mais interessante que a de 45° possivelmente pelo fato de formar um ângulo de aproximadamente 90° com uma eventual superfície de ruptura interna de 30° em relação ao plano da laje, tornando sua contribuição mais eficiente.

Ainda pela Figura 5.3e, é possível observar a marcação na cor amarela em um dos espécimes ensaiados para indicar que nele houve a tentativa de distribuir a armadura de cisalhamento na forma radial, inserindo quatro linhas diagonais de estribos com 4 cm de largura. Acredita-se que a ancoragem em torno das barras de flexão destes estribos que compõem essas linhas diagonais não foi devidamente executada como aqueles que pertencem as linhas de estribos perpendiculares ao pilar, justificando o fato de que ao utilizar este arranjo radial neste espécime não se obteve aprimoramento na atuação desse estribo.

Os resultados referentes aos estribos abertos testados por GLIKMAN *et al.* (2017) são os destacados na Figura 5.3f, onde revelaram-se promissores, devido aos acréscimos de resistência proporcionados por baixas taxas de armadura de cisalhamento.

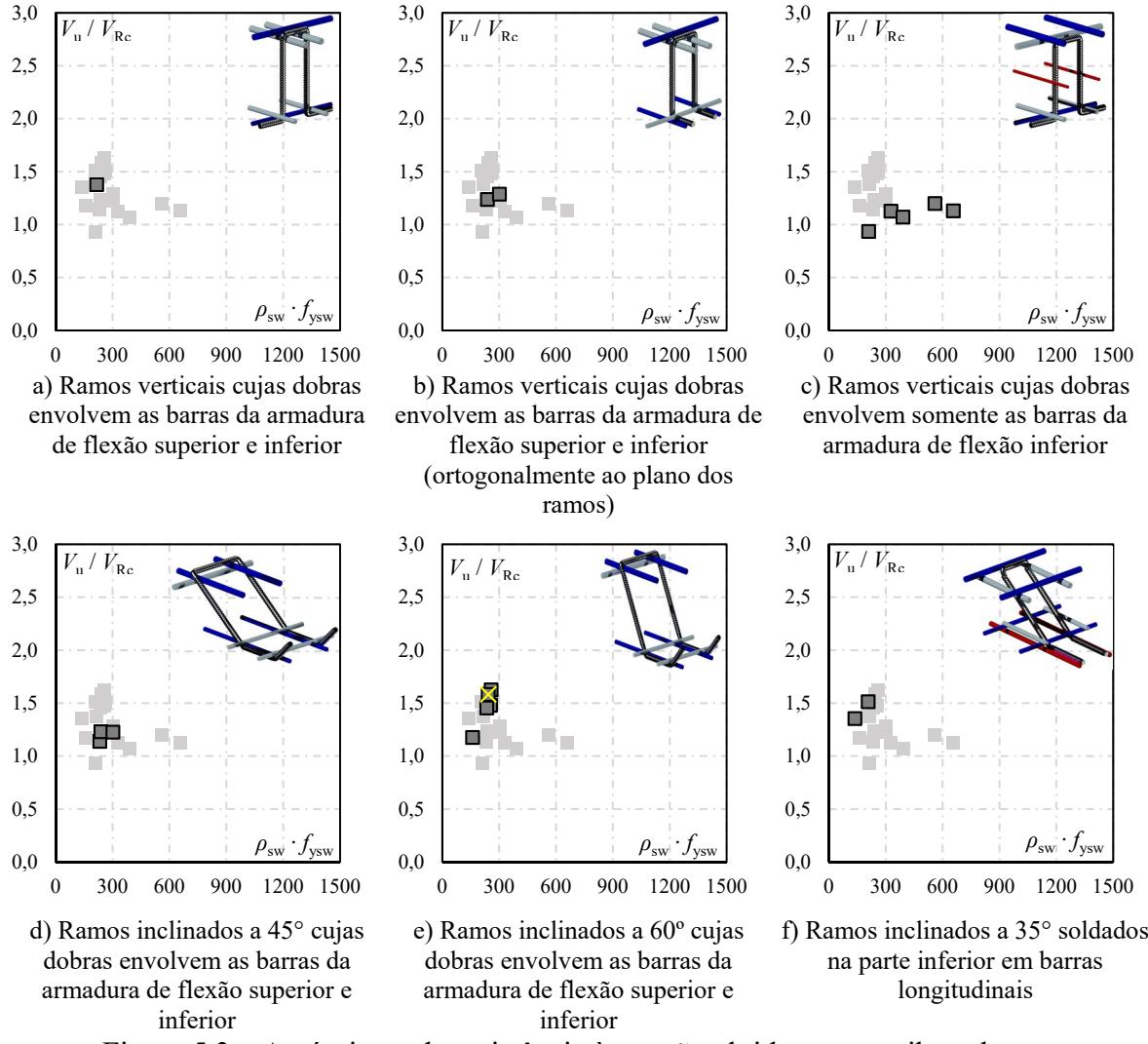
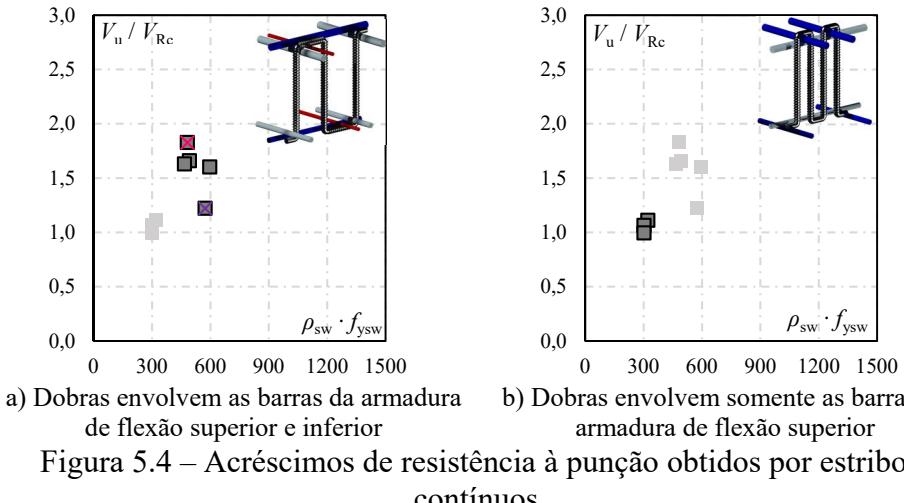


Figura 5.3 – Acréscimos de resistência à punção obtidos por estribos abertos.

A análise dos estribos contínuos é feita através dos gráficos da Figura 5.4. Os pontos destacados na Figura 5.4a pertencem as lajes ensaiadas por LIPS *et al.* (2010), onde se confirma o bom funcionamento do detalhamento utilizado em razão do estabelecimento de um patamar de incrementos de resistência elevados, da ordem de 60%, ao serem consideradas somente ligações laje-pilar com características geométricas usuais, uma vez que os pontos com marcações na cor rosa e roxo correspondem, respectivamente, aos resultados de ensaios de lajes com altura útil elevada ($d=354$ mm) e área da seção transversal do pilar pequena ($C=130$ mm) favorecendo a ruptura prematura por esmagamento da biela de concreto. A Figura 5.4b destaca os resultados referentes as lajes ensaiadas com os estribos utilizados por BROMS (1990). Novamente, os acréscimos de resistência insatisfatórios reforçam o fato de que o detalhamento desses estribos não foi capaz de assegurar a devida ancoragem das extremidades e o posicionamento correto dos ramos.



Os gráficos pelos quais a análise dos estribos treliçados foi feita são apresentados na Figura 5.5. Por meio da Figura 5.5a percebe-se que a proposta de REGAN e SAMADIAN (2001), WICKE (1984) e ANON (1994), de ancorar por soldas as extremidades das barras, mas posicioná-las entre as camadas da armadura de flexão pode proporcionar acréscimos de resistência de até 50%, mas não é capaz de evitar o surgimento das fissuras de delaminação, uma vez que os resultados marcados na cor vermelha indicam que nos ensaios dessas lajes houve o surgimento dessas fissuras. A Figura 5.5b mostra em destaque os resultados referentes aos ensaios das lajes com os estribos desenvolvidos por PARK *et al.* (2007). Embora estes resultados não permitam avaliar o comportamento destes estribos ao longo de uma faixa de taxa de armadura de cisalhamento maior, só foi alcançado um incremento de resistência ligeiramente superior a 50% para quando os autores dobraram a taxa de armadura de flexão ($\rho=0,80\%$ para $\rho=1,62\%$).

Uma análise sobre um amplo espectro de taxa de armadura de cisalhamento pode ser feita com os resultados destacados na Figura 5.5c, que atestam alto rendimento dos estribos treliçados testados por PEREIRA FILHO (2021) através da visualização de uma tendência crescente de ganho de resistência desde taxas de armadura de cisalhamento mais usuais até taxas mais elevadas. Também ocorre na Figura 5.5c a confirmação de que a inclinação das fileiras das treliças planas que compõem os módulos ($\alpha=60^\circ$) apresenta um comportamento melhor do que aqueles com ângulo de 90° , cujo resultado está marcado na cor amarela.

Quanto aos estribos treliçados testados por HAEUSLER (2009), percebe-se, por meio das Figuras 5.5d, 5.5e e 5.5f, que somente algumas modificações na geometria dessa armadura foram eficazes. Ao comparar os resultados da Figura 5.5d com os da Figura 5.5e, constata-se

que os incrementos obtidos com aqueles em que a área de contato com a solda é aumentada em função do trecho reto na parte superior não representa melhora no comportamento dessa armadura, visto que o ponto mais alto desde gráfico, marcado em rosa, refere-se ao ensaio de uma laje com altura útil elevada ($d=340$ mm). Por outro lado, as alterações propostas por ELIGEHAUSEN *et al.* (2003), SIBURG *et al.* (2014), KUERES *et al.* (2016) e FURCHE e SCHMIDT (2019), em que a principal delas compreende a elevação das dobras superiores aprimorou o desempenho desta armadura, como observado na Figura 5.5f, confirmando que a capacidade da ancoragem nas extremidades superiores da armadura de cisalhamento é mais relevante para o aprimoramento da sua atuação. Ainda na Figura 5.5f, os resultados marcados em azul indicam as lajes que experimentaram um arranjo ortogonal e obtiveram êxito com esta alternativa pelo fato de que quando todas as fileiras de estribos inclinados são colocadas na mesma direção, a superfície de ruptura ao redor do pilar não é interceptada da mesma forma ao longo de toda a sua extensão, diminuindo o aproveitamento da armadura.

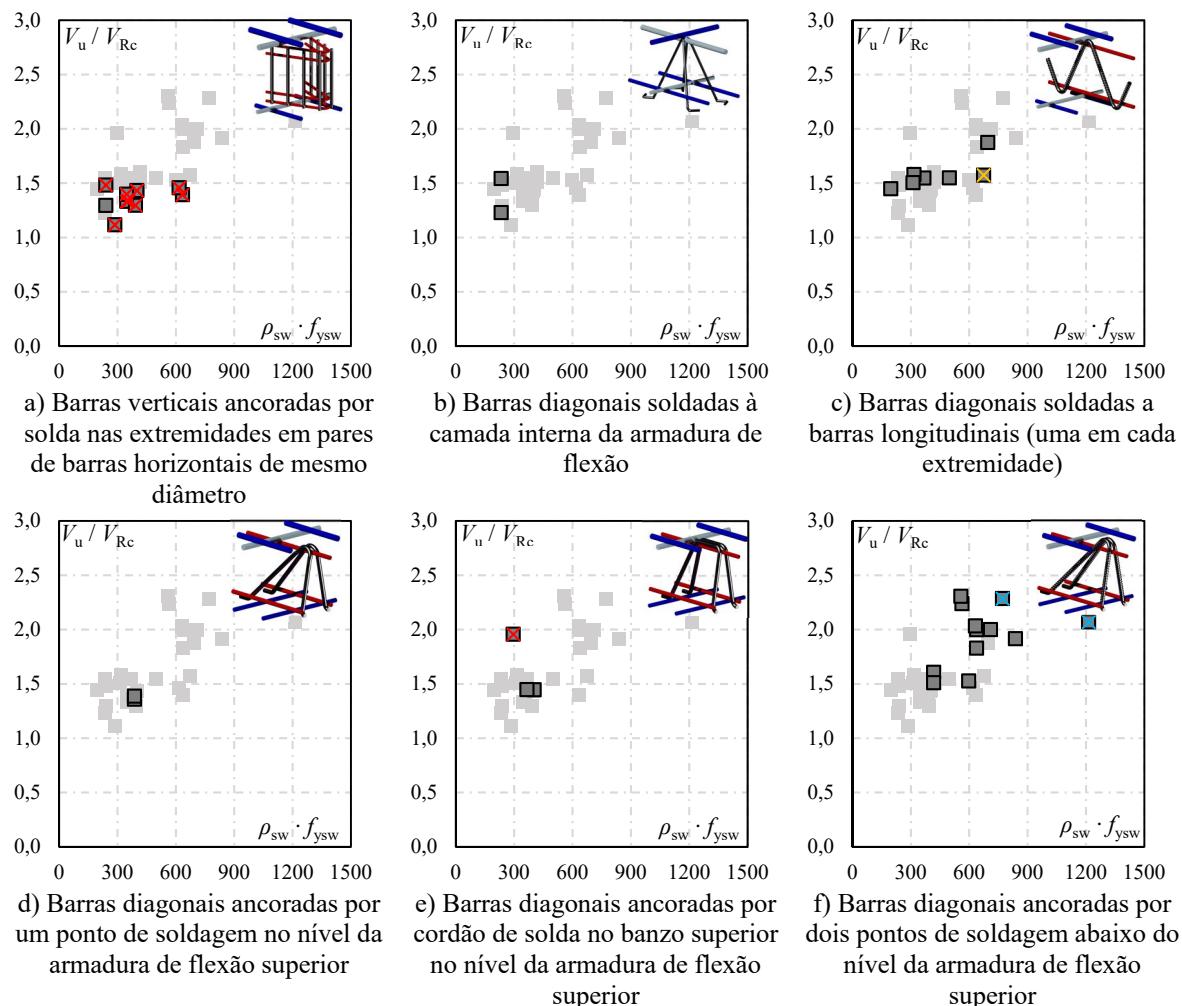


Figura 5.5 – Acréscimos de resistência à punção obtidos por estribos treliçados.

5.2. AVALIAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE RESISTÊNCIA À PUNÇÃO

De um modo geral, em todo grupo de estribo houve resultados que não alcançaram o nível de segurança esperado – constatação feita pela presença de pontos posicionados abaixo das linhas cheias nos gráficos da Figura 5.6 a Figura 5.25, representando os casos em que $V_u < V_{Rcs}$. No entanto, verificou-se que os estribos que não corresponderam às expectativas para aumento de resistência em lajes com ruptura dentro da região da armadura de cisalhamento foram apenas alguns dentre aqueles cujos detalhamentos comprometeram parcial ou totalmente a ancoragem dos estribos em torno das barras da armadura de flexão, ou seja, aqueles que não estão contemplados nas recomendações das próprias normas.

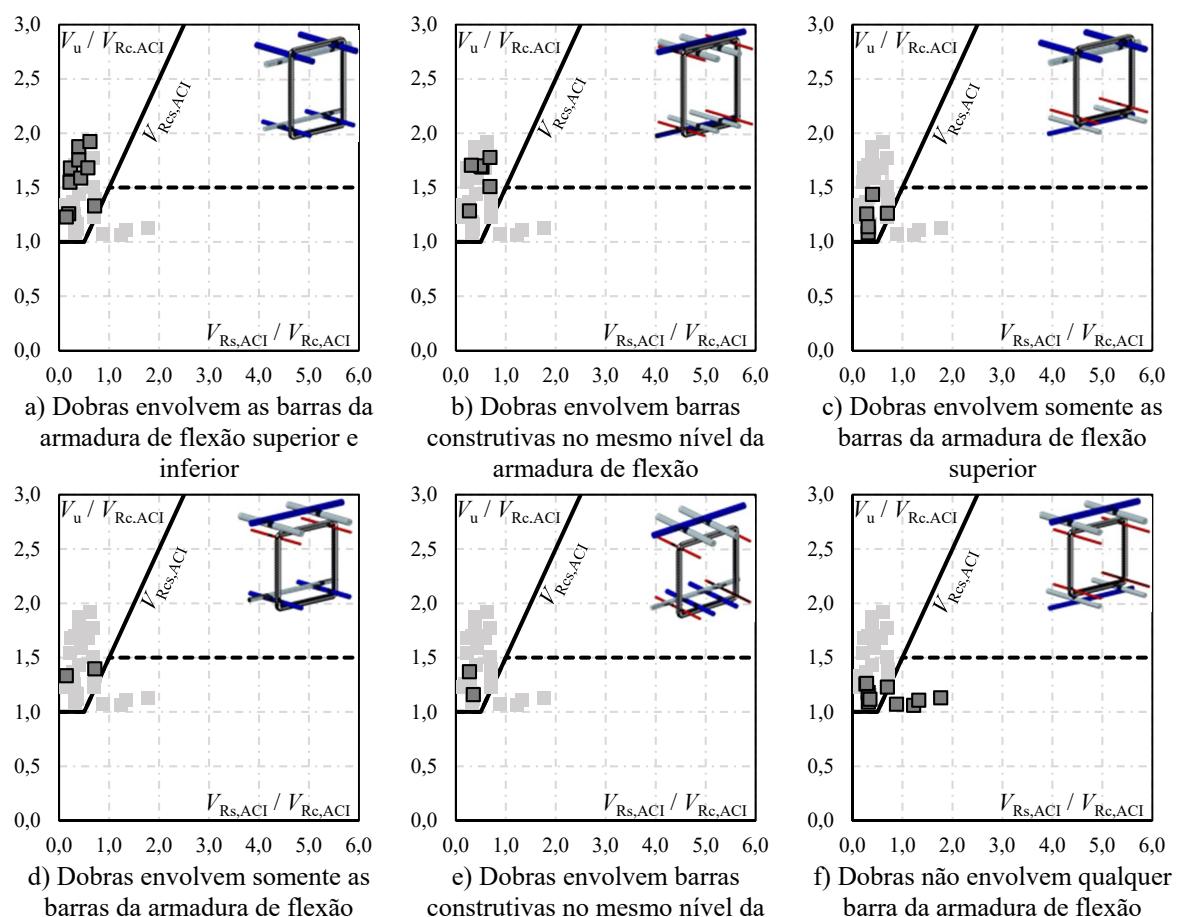
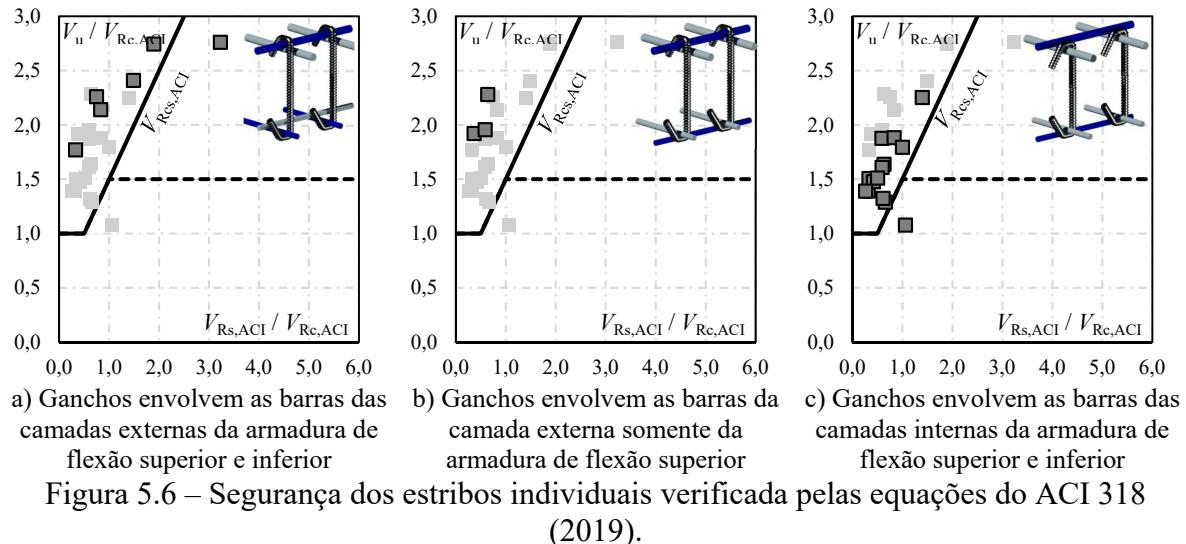
5.2.1. ACI 318 (2019)

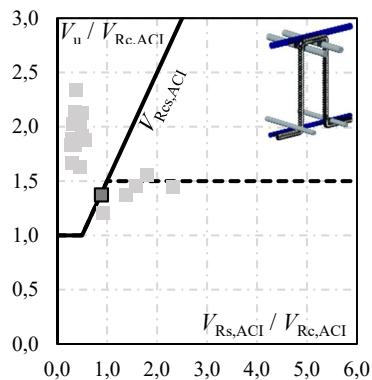
Para verificações feitas com as equações do ACI 318 (2019), percebe-se, por meio das Figuras 5.6 a 5.10, que os detalhamentos que proporcionaram resultados inseguros foram os utilizados nos estribos fechados de CALDENTEY *et al.* (2013), MABROUK e HEGAB (2017) e LIMA (2021), em que as dobras não envolvem qualquer barra da armadura de flexão (ver Figura 5.7f); nos abertos com ramos verticais testados por YAMADA *et al.* (1992), cujas dobras envolvem somente as barras da armadura de flexão inferior (ver Figura 5.8c); e nos contínuos que também envolvem somente as barras da armadura de flexão superior, testados por BROMS (1991) (ver Figura 5.9b).

Os estribos detalhados conforme os seus critérios de ancoragem apresentaram níveis de segurança satisfatórios, é o caso de todos os estribos individuais avaliados neste trabalho (ver Figuras 5.6a, 5.6b e 5.6c); os estribos fechados que envolvem as barras de flexão superior e inferior, testados por OLIVEIRA *et al.* (2000), SCHMIDT *et al.* (2019), VOLLM *et al.* (2010) e LIMA (2021) (ver Figuras 5.7a e 5.7b); e todos os estribos abertos cujas dobras envolvem ou alcançam o nível das armaduras de flexão (ver Figuras 5.8a, 5.8b, 5.8d, 5.8e e 5.8f).

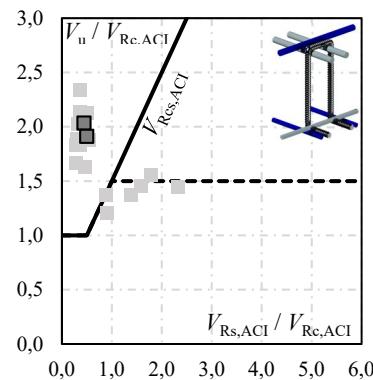
No grupo dos treliçados, todos os estribos proporcionaram resultados seguros, porém para aqueles em que foram utilizadas as taxas de armadura de cisalhamento mais elevadas a segurança foi garantida devido a limitação de $1,5 \cdot V_{Rc}$ (representada pela linha tracejada) imposta pela resistência ao esmagamento da biela comprimida na região adjacente ao pilar (ver

Figuras 5.10a, 5.10b, 5.10c, 5.10d, 5.10e e 5.10f), da mesma forma como para os estribos contínuos utilizados por LIPS *et al.* (2010) (ver Figura 5.9a).

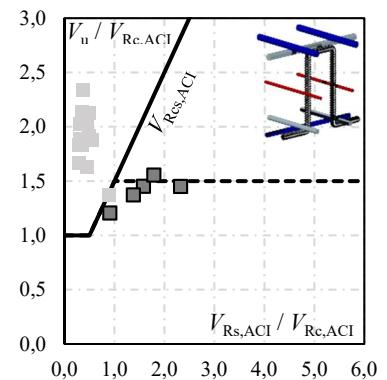




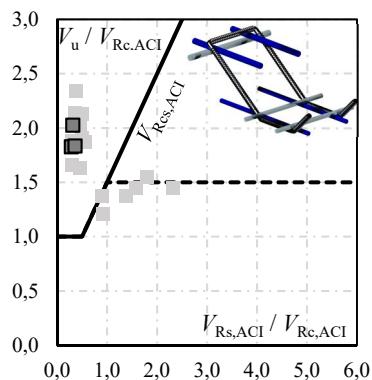
a) Ramos verticais cujas dobras envolvem as barras da armadura de flexão superior e inferior



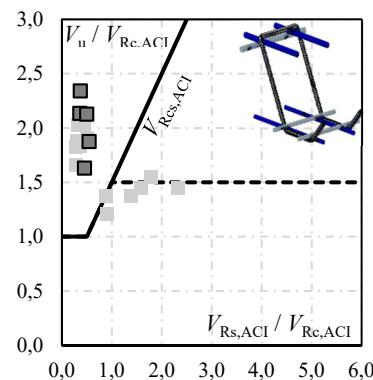
b) Ramos verticais cujas dobras envolvem as barras da armadura de flexão superior e inferior (ortogonalmente ao plano dos ramos)



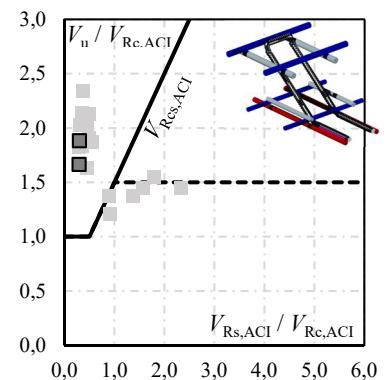
c) Ramos verticais cujas dobras envolvem somente as barras da armadura de flexão inferior



d) Ramos inclinados a 45° cujas dobras envolvem as barras da armadura de flexão superior e inferior

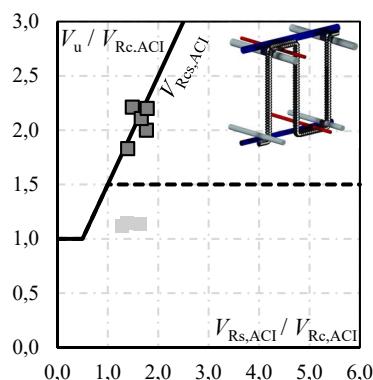


e) Ramos inclinados a 60° cujas dobras envolvem as barras da armadura de flexão superior e inferior

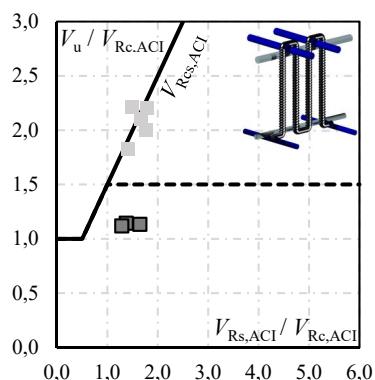


f) Ramos inclinados a 35° soldados na parte inferior em barras longitudinais

Figura 5.8 – Segurança dos estribos abertos verificada pelas equações do ACI 318 (2019).



a) Dobras envolvem as barras da armadura de flexão superior e inferior



b) Dobras envolvem somente as barras da armadura de flexão superior

Figura 5.9 – Segurança dos estribos contínuos verificada pelas equações do ACI 318 (2019).

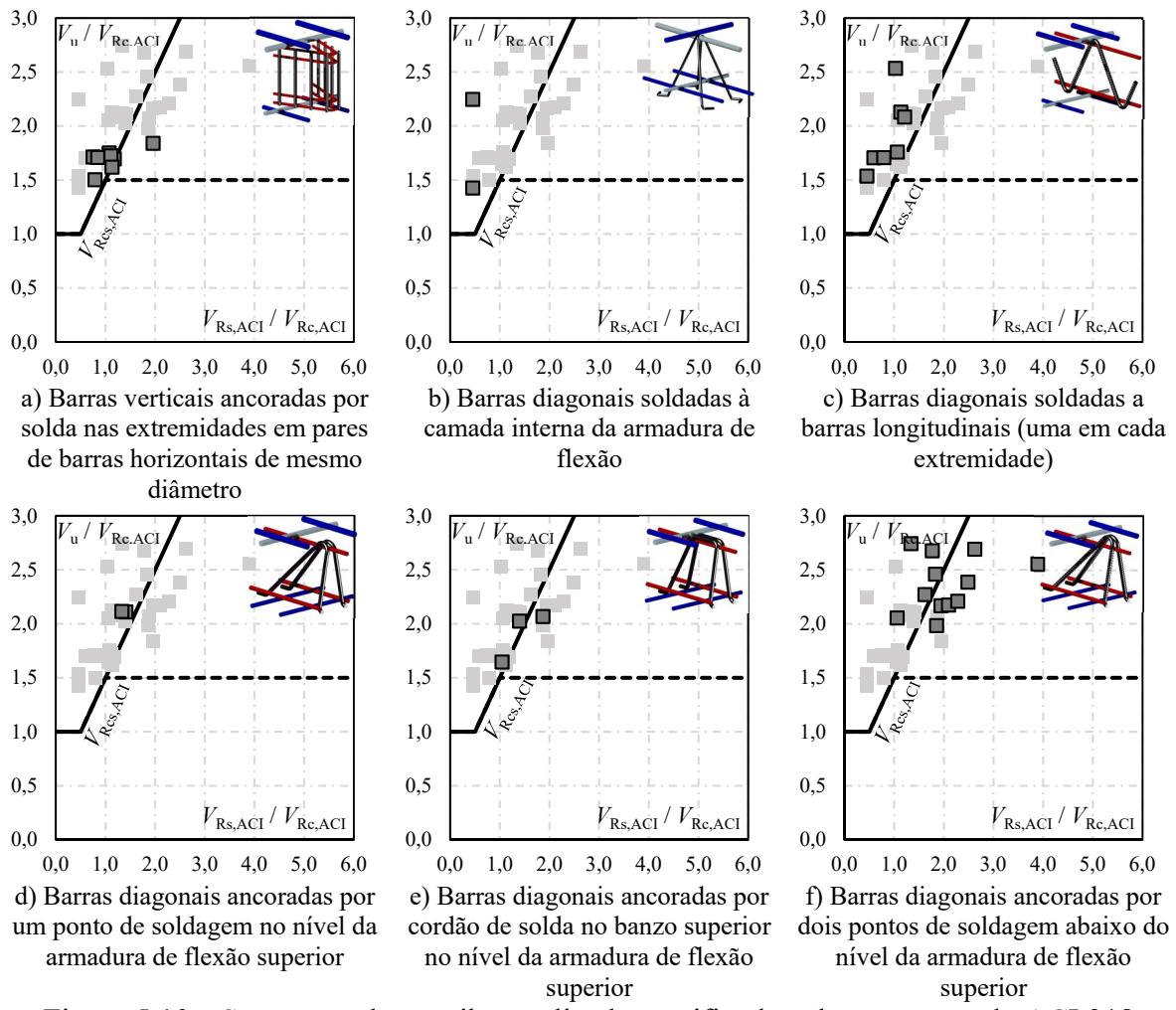


Figura 5.10 – Segurança dos estribos treliçados verificada pelas equações do ACI 318 (2019).

5.2.2. EUROCODE 2 (2014)

Além dos detalhamentos que não proporcionaram resultados em níveis satisfatórios de segurança quando os estribos foram dimensionados pelas equações do ACI 318 (2019), para quando os dimensionamentos foram feitos com as equações do EUROCODE 2 (2014), percebe-se, por meio da Figura 5.11 a Figura 5.15, que alguns estribos individuais (ver Figura 5.11c), a maioria dos estribos fechados (ver Figuras 5.12a, 5.12b, 5.12c, 5.12d, 5.12e e 5.12f) e os estribos treliçados compostos por barras verticais ancoradas por solda nas extremidades, utilizados por REGAN e SAMADIAN (2001), WICKE (1984) e ANON (1994) (ver Figura 5.15a), também não corresponderam ao comportamento assumido por essa norma, mesmo considerando a limitação da eficiência da resistência de lajes armadas ao cisalhamento de $1,5 \cdot V_{Rc}$, representada pela linha tracejada. Portanto, somente os estribos individuais testados por REGAN (1980) (ver Figura 5.11b) e os estribos abertos cujas dobras envolvem ou alcançam

o nível das armaduras de flexão (ver Figuras 5.13b, 5.13d, 5.13e e 5.13f) proporcionaram aumentos de resistência nas lajes com ruptura interna à região da armadura de cisalhamento que asseguraram a condição $V_u > V_{Rcs}$.

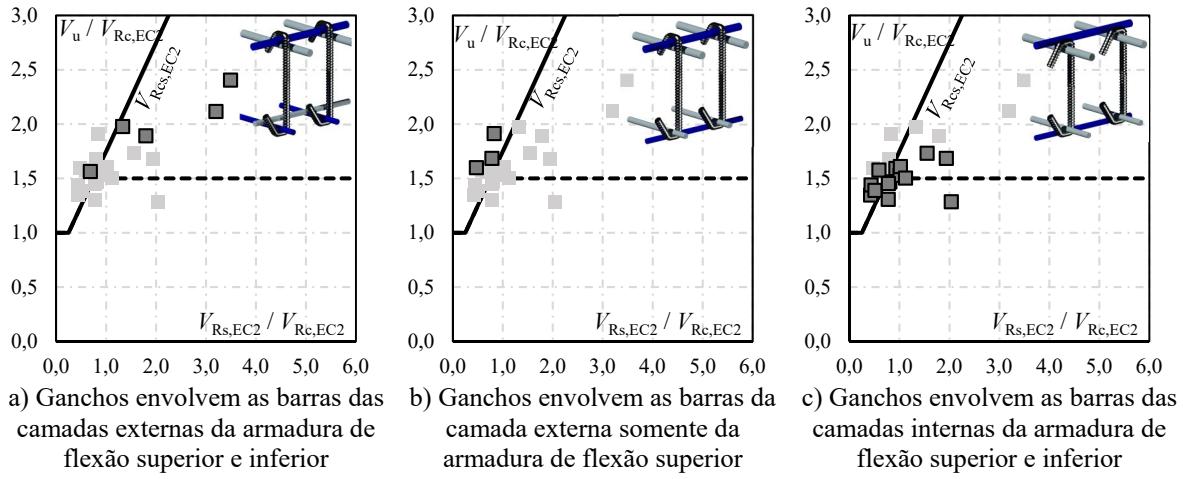


Figura 5.11 – Segurança dos estribos individuais verificada pelas equações do

EUROCODE 2 (2014).

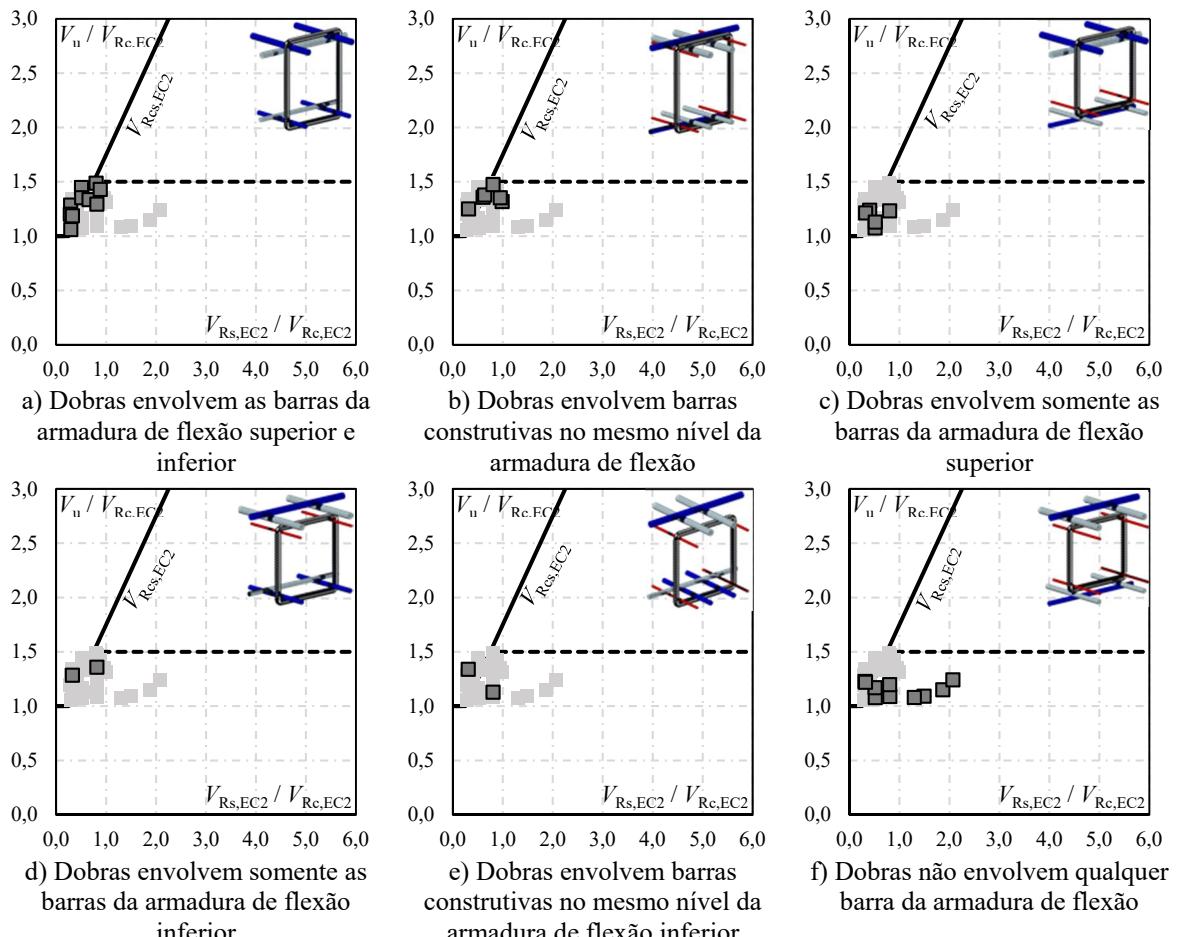
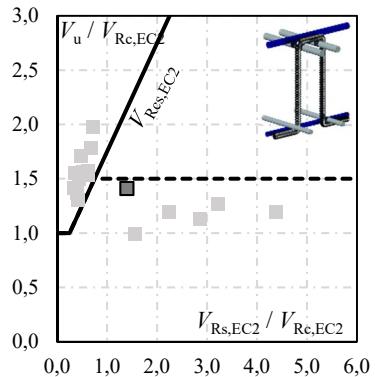
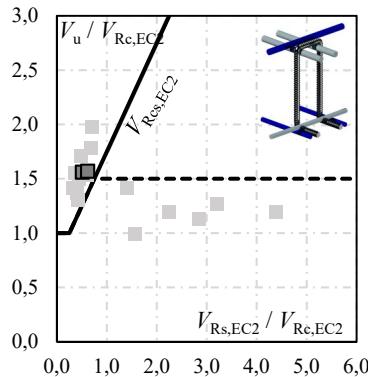


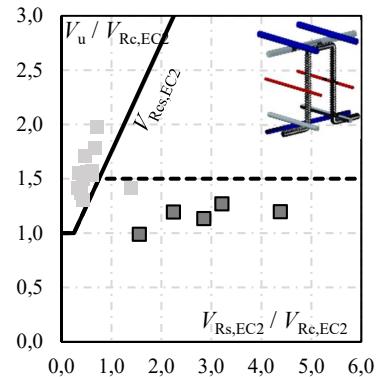
Figura 5.12 – Segurança dos estribos fechados verificada pelas equações do EUROCODE 2 (2014).



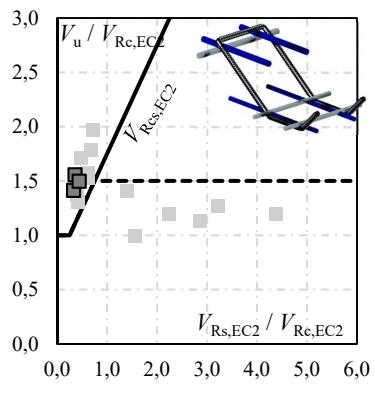
a) Ramos verticais cujas dobras envolvem as barras da armadura de flexão superior e inferior



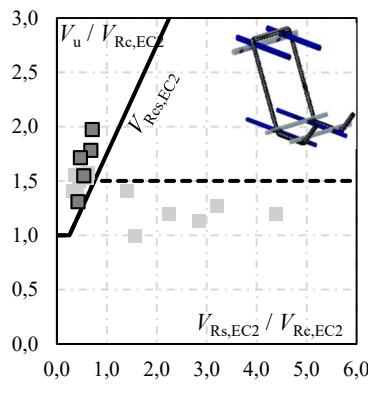
b) Ramos verticais cujas dobras envolvem as barras da armadura de flexão superior e inferior (ortogonalmente ao plano dos ramos)



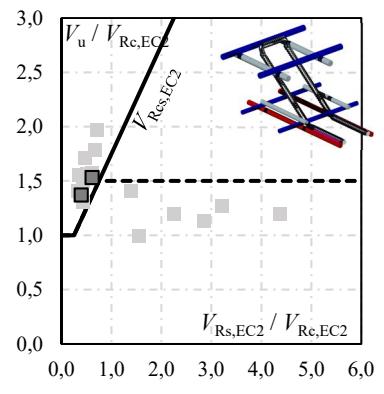
b) Ramos verticais cujas dobras envolvem somente as barras da armadura de flexão inferior



d) Ramos inclinados a 45° cujas dobras envolvem as barras da armadura de flexão superior e inferior

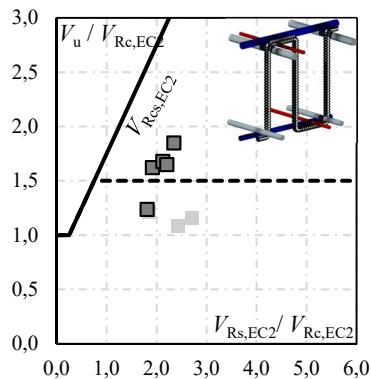


e) Ramos inclinados a 60° cujas dobras envolvem as barras da armadura de flexão superior e inferior

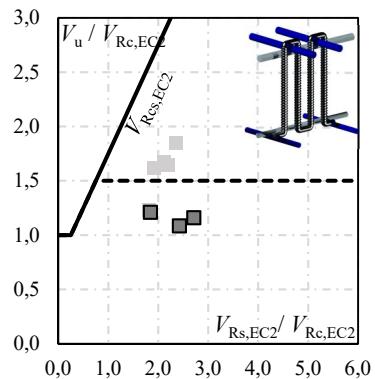


f) Ramos inclinados a 35° soldados na parte inferior em barras longitudinais

Figura 5.13 – Segurança dos estribos abertos verificada pelas equações do EUROCODE 2 (2014).



a) Dobras envolvem as barras da armadura de flexão superior e inferior



b) Dobras envolvem somente as barras da armadura de flexão superior

Figura 5.14 – Segurança dos estribos contínuos verificada pelas equações do EUROCODE 2 (2014).

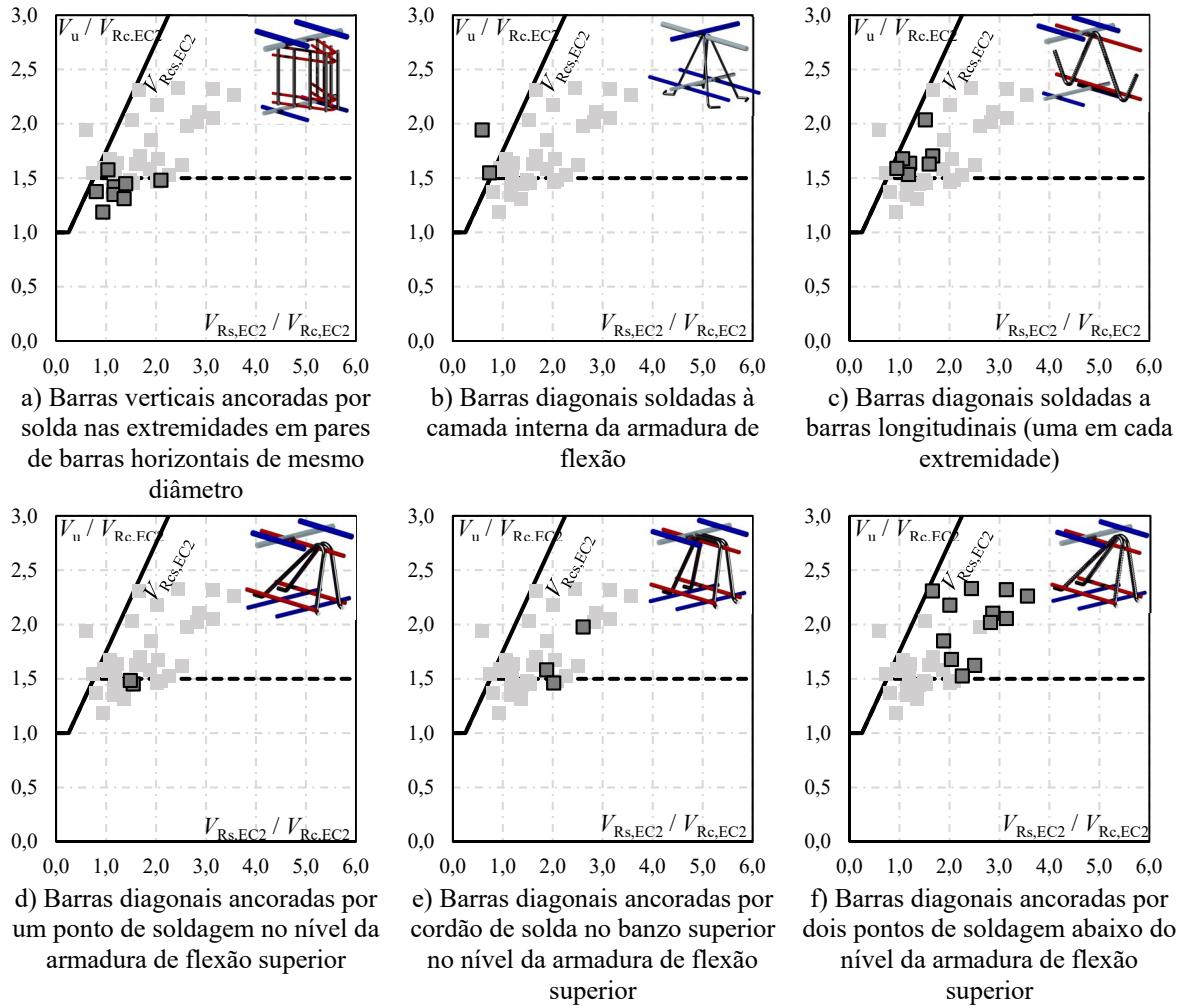


Figura 5.15 – Segurança dos estribos treliçados verificada pelas equações do EUROCODE 2 (2014).

5.2.3. ABNT NBR 6118 (2014)

Para dimensionamentos feitos com as equações da ABNT NBR 6118 (2014), Figura 5.16 a Figura 5.20, observa-se que grande parte dos estribos obtiveram resultados aquém do nível de segurança estipulado.

Os estribos cujos detalhes de suas ancoragens não obedecem aos padrões normativos apresentaram grande parte dos seus resultados abaixo da linha cheia. Dentro do grupo dos estribos fechados, são aqueles que envolvem barras construtivas no mesmo nível da armadura de flexão, ou envolvem somente as barras da armadura de flexão superior ou inferior e também aqueles que não envolvem qualquer barra da armadura de flexão, cujos resultados estão mostrados nas Figuras 5.17b, 5.17c, 5.17d, 5.17e e 5.17f; no grupo dos estribos abertos, são os resultados apresentados na Figura 5.18c, em que as dobras envolvem somente as barras da

armadura de flexão superior; e nos grupos dos estribos contínuos e treliçados, todos os resultados, sem exceção.

Merecem destaque os resultados dos estribos individuais mostrados nas Figuras 5.16a e 5.16c, os estribos fechados mostrados na Figura 5.17a e os estribos abertos da Figura 5.18a, pois, apesar de suas ancoragens seguirem as regras de detalhamento preconizados por esta norma, ou seja, envolverem por meio de dobras as barras da armadura de flexão em ambas as zonas tracionada e comprimida da laje, seus resultados posicionaram-se abaixo do limite inferior de segurança, uma vez que a região acima desta linha representa a situação $V_u > V_{Rcs}$.

Em resumo, somente o detalhamento utilizado por REGAN (1980), dentro do grupo dos estribos individuais (ver Figura 5.16b) e, dentre os estribos abertos, somente os resultados daqueles que possuem os ramos inclinados (ver Figuras 5.18d, 5.18e e 5.18f), apresentaram todos os resultados localizados acima da linha cheia. Entretanto, devido à similaridade dos detalhamentos utilizados dentro do grupo dos estribos individuais, a diferença que se observa entre os seus resultados só reforça que a segurança dos dimensionamentos feitos com detalhamentos que asseguram a devida ancoragem desse tipo de estribo só é garantida para quando baixas taxas de armadura de cisalhamento são utilizadas.

Essa análise deixa um alerta para a necessidade de modificações nas considerações de cálculo da norma brasileira que objetivem aumentar os níveis de segurança para os detalhamentos já preconizados por esta norma. Em razão da similaridade entre as equações da ABNT NBR 6118 (2014) e do EUROCODE 2 (2014), é válido ressaltar que a limitação da eficiência da armadura de cisalhamento imposta em $V_{Rcs} \leq 1,5 \cdot V_{Rc}$, presente no EUROCODE 2 (2014), pode ser capaz de tornar as previsões mais seguras ao evitar a tendência de superestimar resultados com taxas de armadura de cisalhamento elevadas.

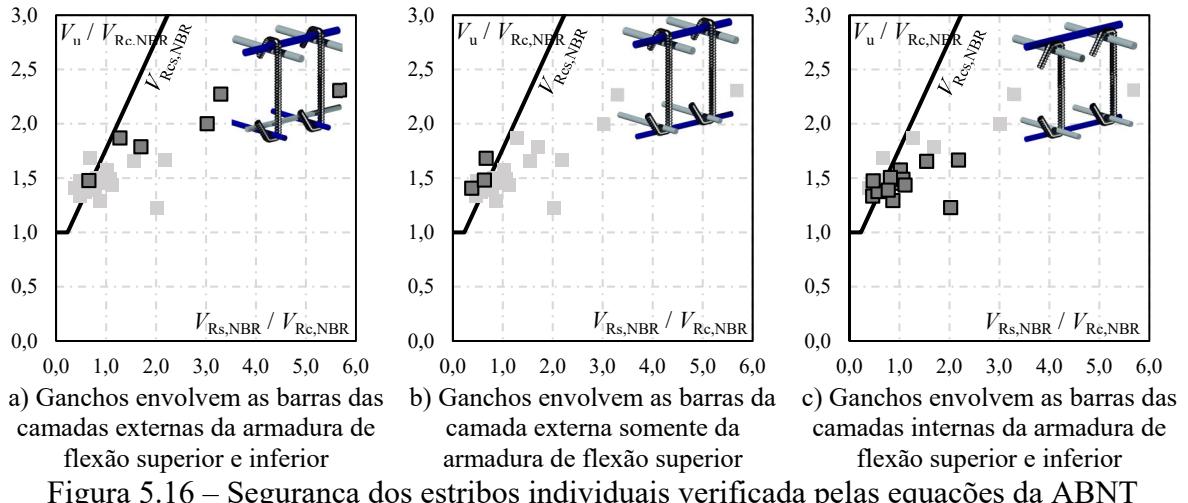


Figura 5.16 – Segurança dos estribos individuais verificada pelas equações da ABNT NBR 6118 (2014).

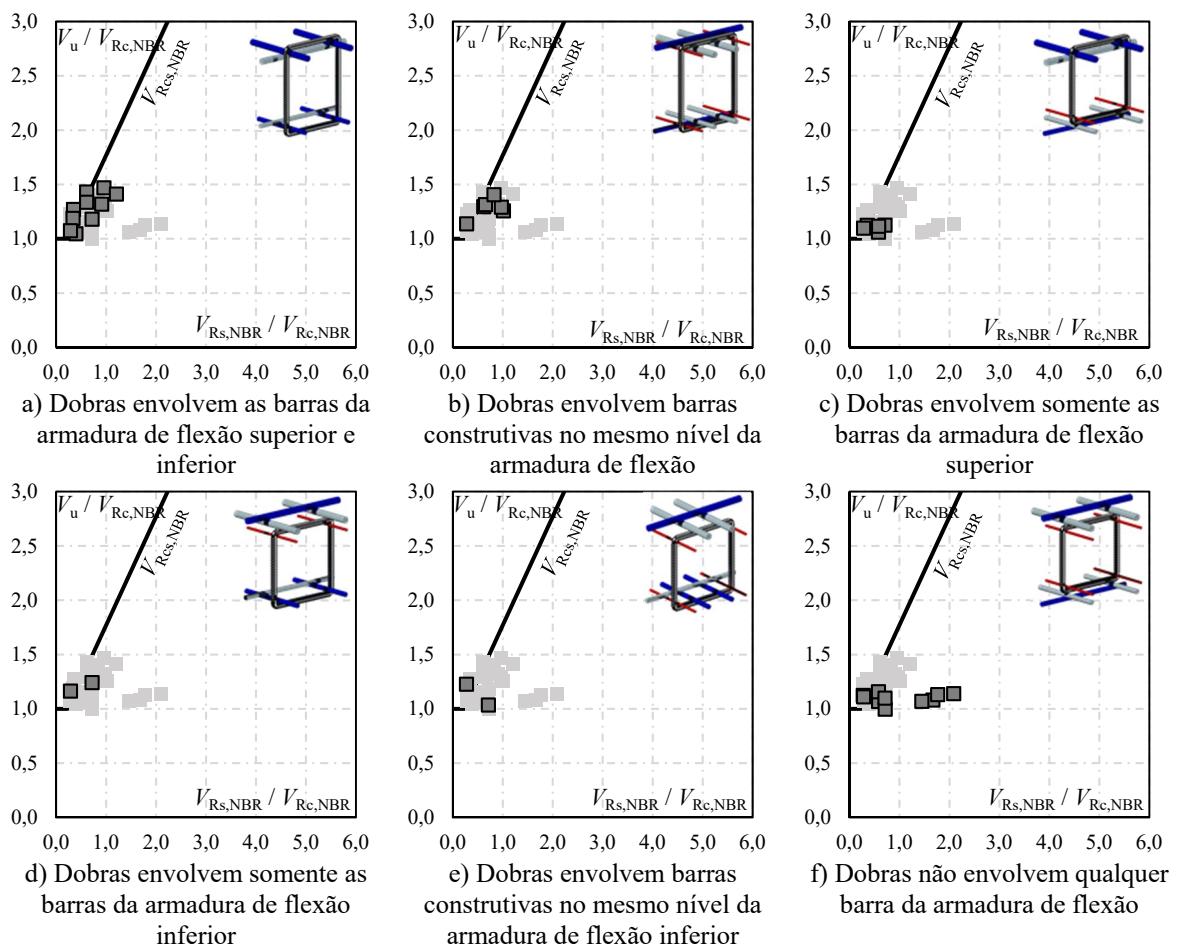
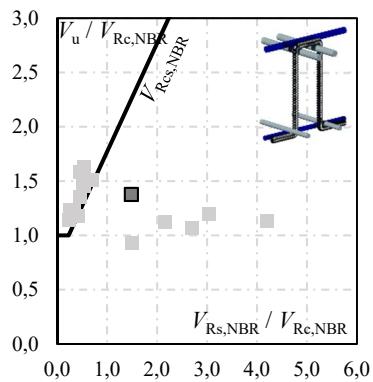
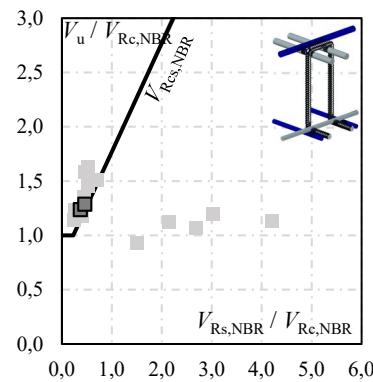


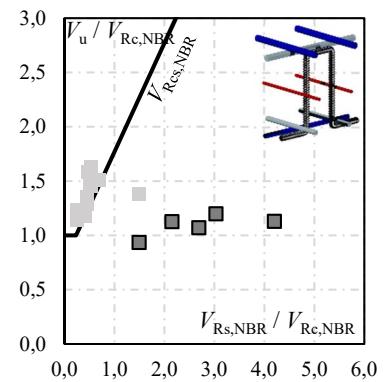
Figura 5.17 – Segurança dos estribos fechados verificada pelas equações da ABNT NBR 6118 (2014).



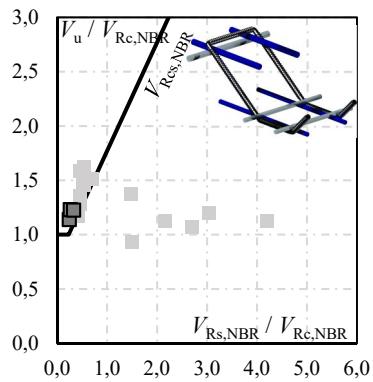
a) Ramos verticais cujas dobras envolvem as barras da armadura de flexão superior e inferior



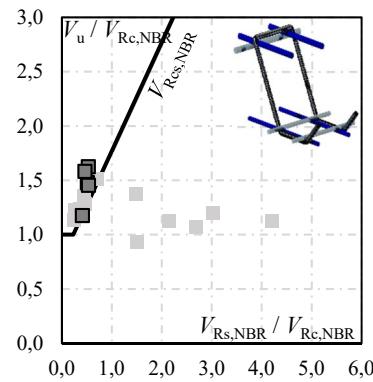
b) Ramos verticais cujas dobras envolvem as barras da armadura de flexão superior e inferior (ortogonalmente ao plano dos ramos)



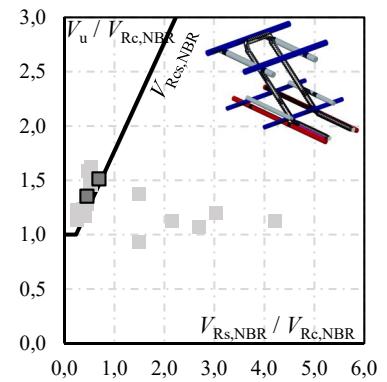
c) Ramos verticais cujas dobras envolvem somente as barras da armadura de flexão inferior



d) Ramos inclinados a 45° cujas dobras envolvem as barras da armadura de flexão superior e inferior

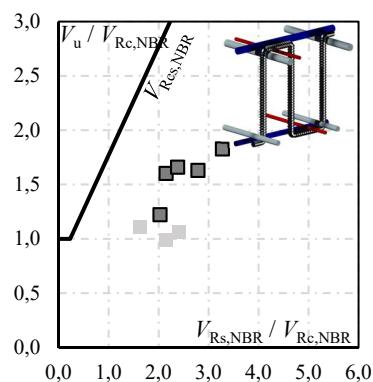


e) Ramos inclinados a 60° cujas dobras envolvem as barras da armadura de flexão superior e inferior

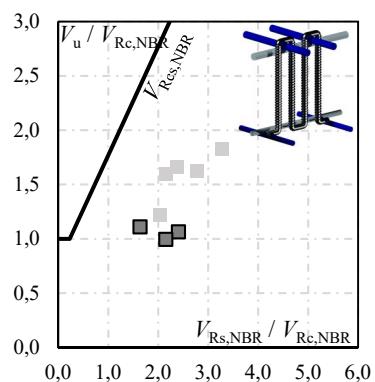


f) Ramos inclinados a 35° soldados na parte inferior em barras longitudinais

Figura 5.18 – Segurança dos estribos abertos verificada pelas equações da ABNT NBR 6118 (2014).



a) Dobras envolvem as barras da armadura de flexão superior e inferior



b) Dobras envolvem somente as barras da armadura de flexão superior

Figura 5.19 – Segurança dos estribos contínuos verificada pelas equações da ABNT NBR 6118 (2014).

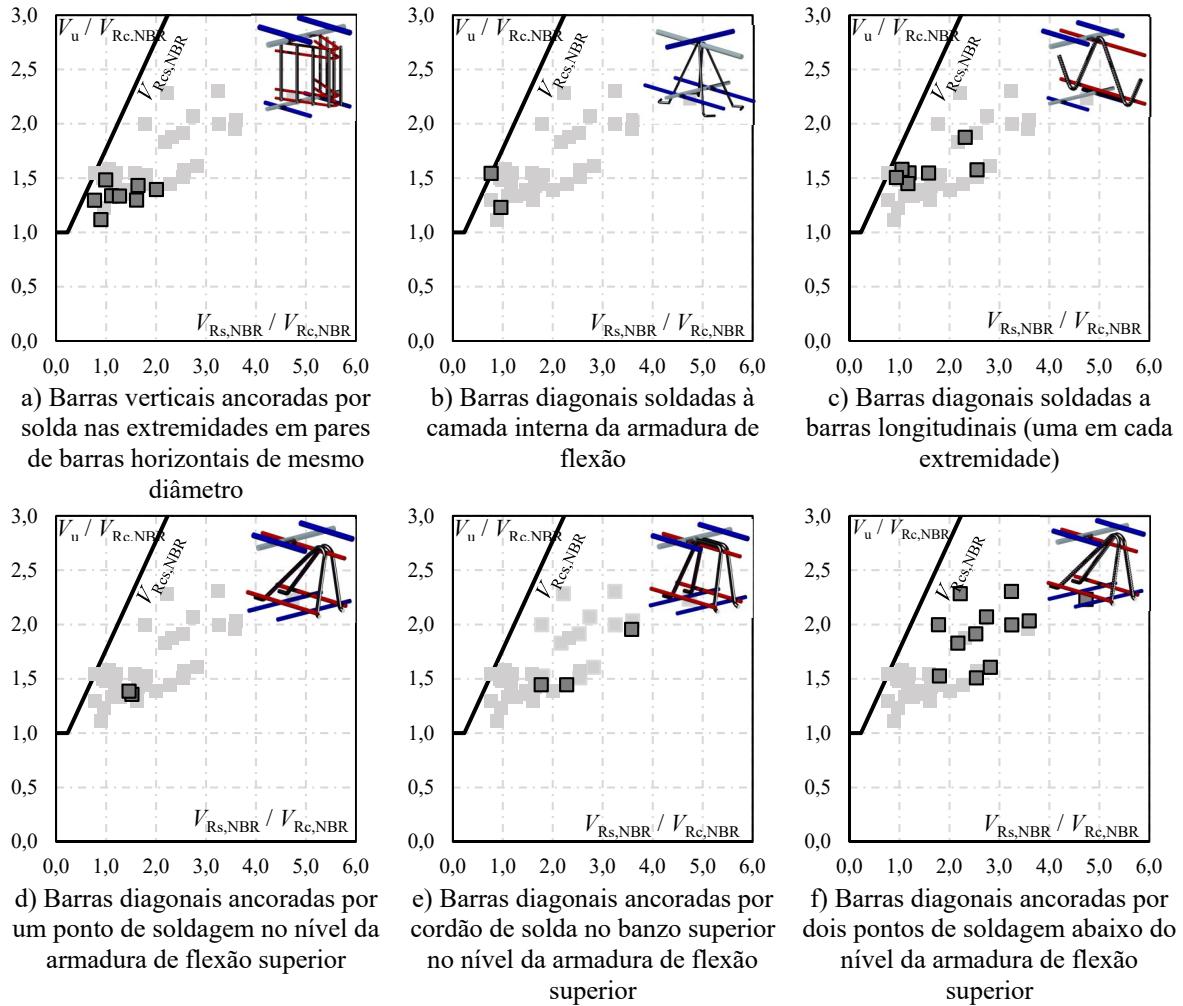


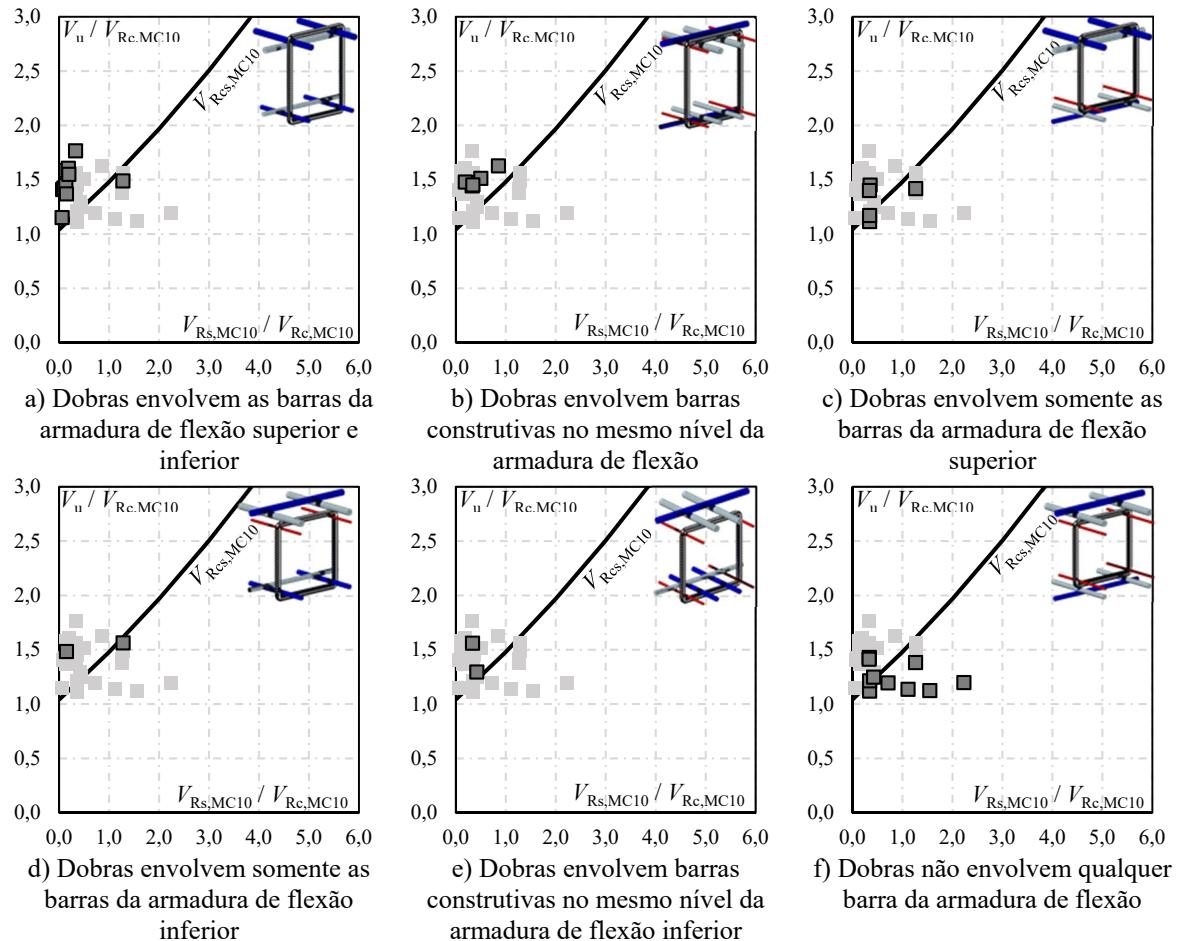
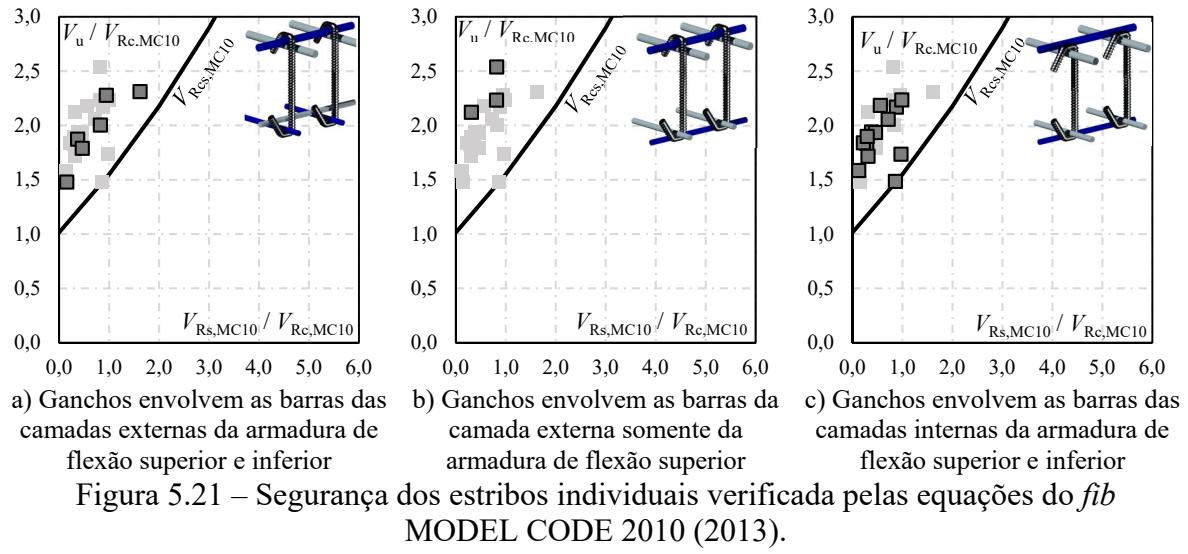
Figura 5.20 – Segurança dos estribos treliçados verificada pelas equações da ABNT NBR 6118 (2014).

5.2.4. *fib* MODEL CODE 2010 (2013)

Para dimensionamentos feitos com as equações do *fib* MODEL CODE 2010 (2013), os resultados apresentados da Figura 5.21 a Figura 5.25, revelam que somente os detalhamentos que comprometeram parcial ou totalmente a ancoragem dos estribos em torno das barras da armadura de flexão geraram resultados inseguros, não alcançando a linha cheia que representa o limite inferior de segurança.

São os detalhamentos que também não estão contemplados nas recomendações desta norma, como os estribos fechados testados por CALDENTEY *et al.* (2013), MABROUK e HEGAB (2017) e LIMA (2021) (ver Figura 5.22f), os abertos testados por YAMADA *et al.* (1992) (ver Figura 5.23c), os contínuos avaliados em BROMS (1990) (ver Figura 5.24b) e os treliçados

encontrados em REGAN e SAMADIAN (2001), WICKE (1984) e ANON (1994) (ver Figura 5.25a).



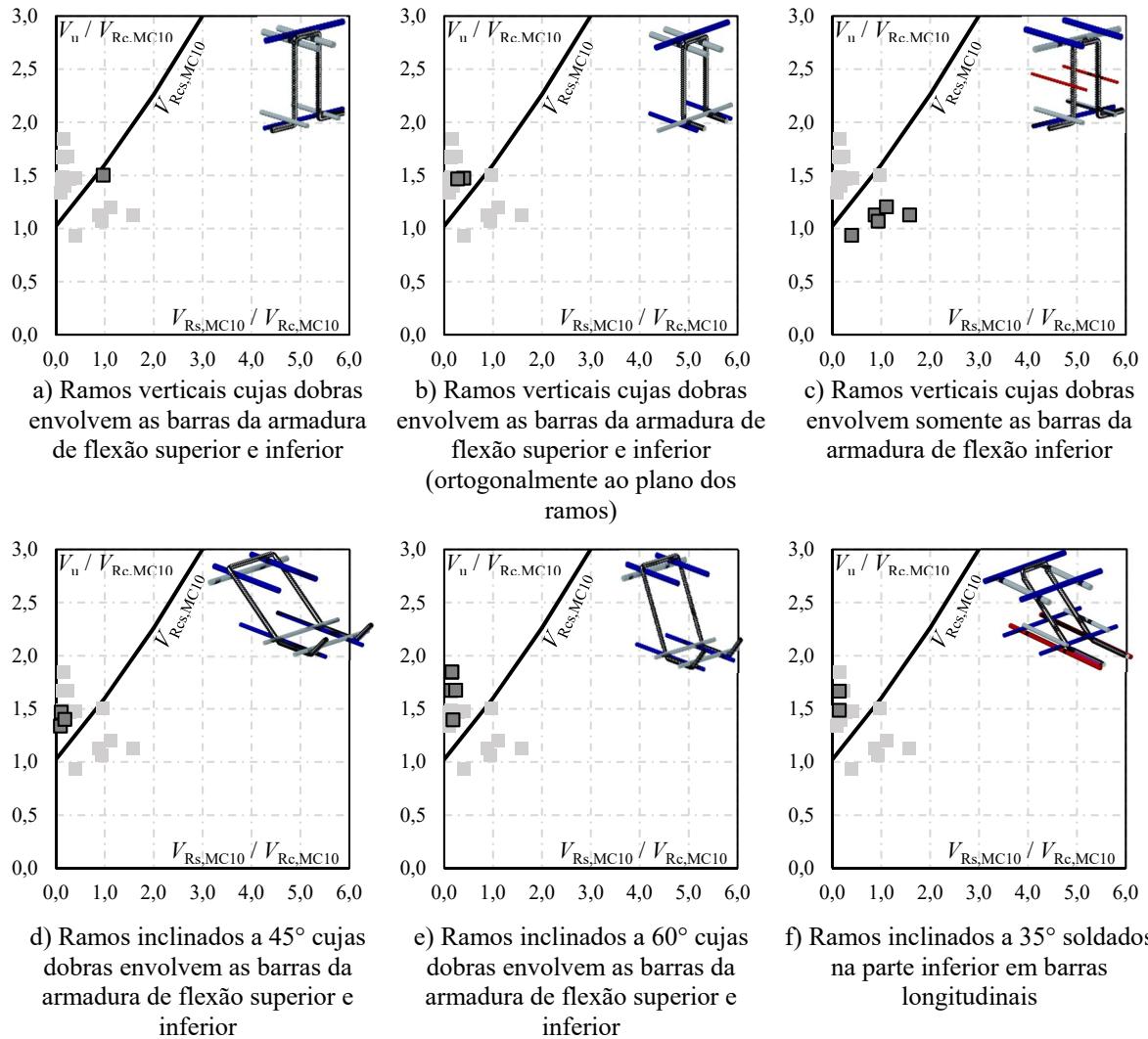


Figura 5.23 – Segurança dos estribos abertos verificada pelas equações do *fib MODEL CODE 2010 (2013)*.

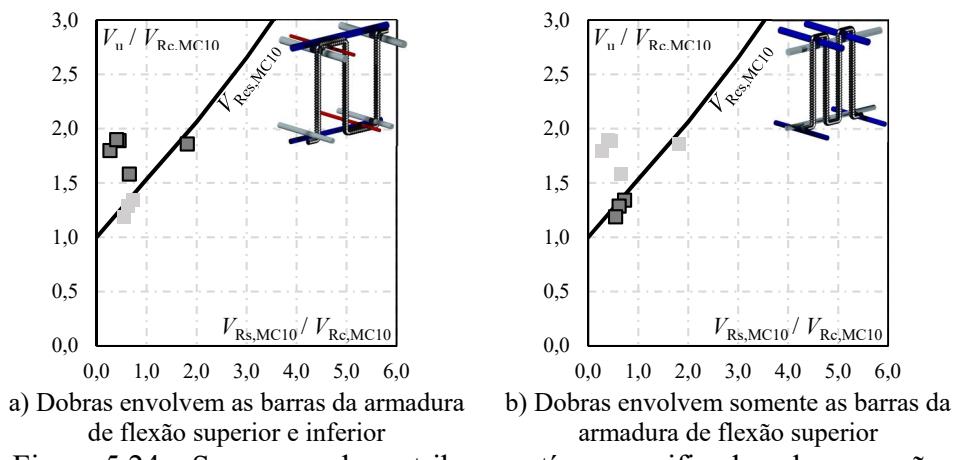


Figura 5.24 – Segurança dos estribos contínuos verificada pelas equações do *fib MODEL CODE 2010 (2013)*.

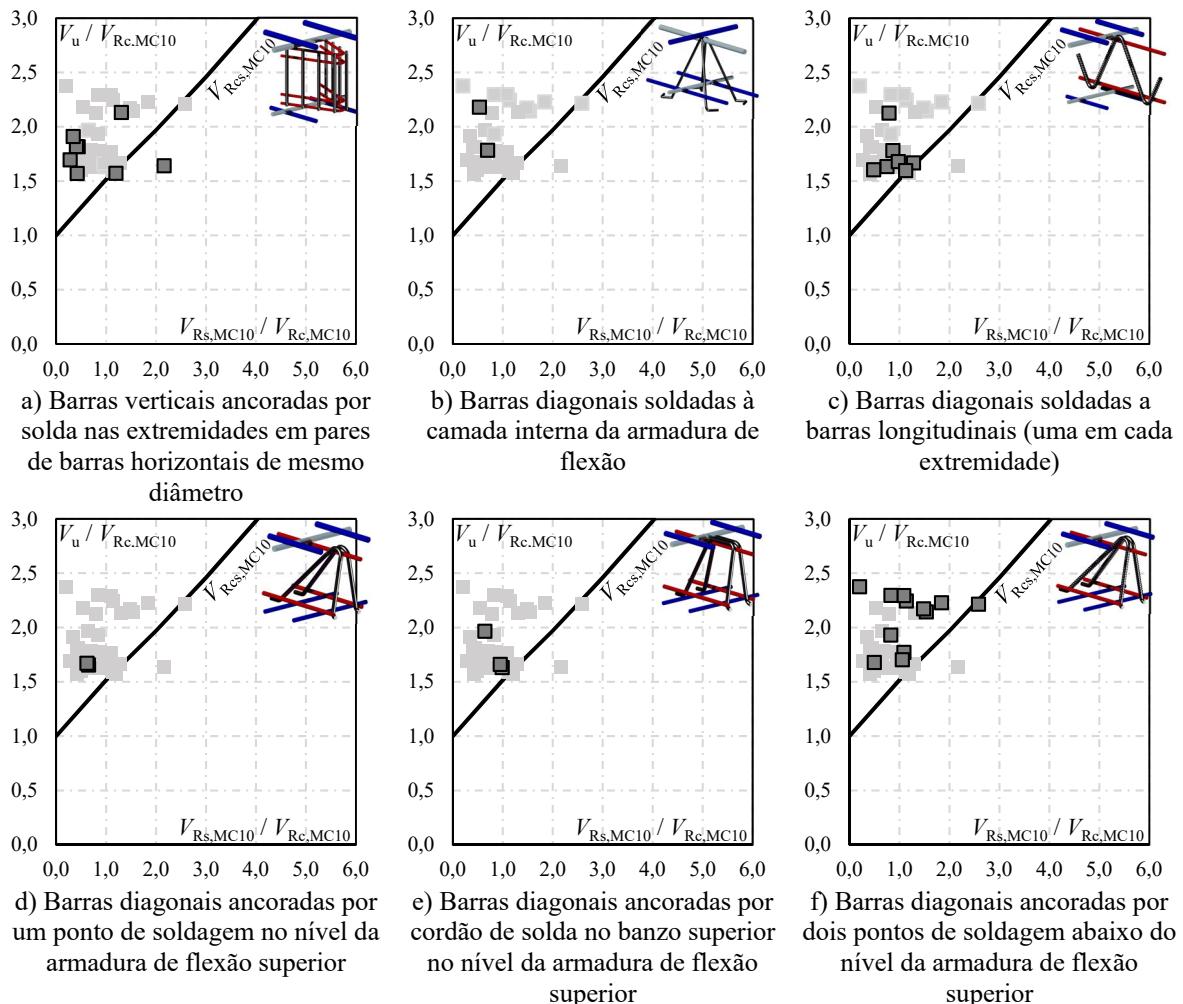


Figura 5.25 – Segurança dos estribos treliçados verificada pelas equações do *fib MODEL CODE 2010* (2013).

5.3. PROPOSTAS DE DETALHAMENTO E INSTALAÇÃO

Com base nos resultados apresentados nos itens 5.1 e 5.2, foi possível eleger os detalhamentos mais eficientes empregados para cada tipo de estribo (individual, fechado, aberto, contínuo e treliçado), ou seja, que proporcionam os maiores acréscimos de resistência à punção e que na avaliação da segurança seus resultados estivessem dentro dos limites avaliados por meio das verificações feitas com as equações normativas. Sobretudo, para tal julgamento, ponderou-se também o grau de praticidade associado a execução de cada tipo de estribo. Dessa forma, por meio dos gráficos da Figura 5.26, análises preliminares de viabilidade técnica e econômica podem ser feitas através da relação entre o limite superior de acréscimo de resistência que os estribos proporcionaram dentro dos intervalos de taxa de amadura de cisalhamento em que foram empregados.

A Figura 5.26a destaca os resultados dos estribos individuais que alcançam incrementos de resistência da ordem de 75% empregando baixas taxas de armadura de cisalhamento. Ao garantir o envolvimento dos ganchos nas barras das camadas internas da armadura de flexão, obedecem às recomendações de detalhamentos de todas as normas avaliadas neste trabalho, proporcionando resultados seguros quando dimensionados pelo ACI 318 (2019) e pelo *fib* MODEL CODE 2010 (2013).

Os resultados destacados na Figura 5.26b pertencem aos estribos fechados cujas dobras envolvem as barras da armadura de flexão ou barras construtivas localizadas no mesmo nível da armadura de flexão, que, empregando baixas taxas de armadura de cisalhamento, proporcionam incrementos de resistência de até 50%. Novamente, é recomendável, por questão de segurança, que seus dimensionamentos sejam feitos com as equações do ACI 318 (2019) e do *fib* MODEL CODE 2010 (2013).

Na Figura 5.26c estão em destaque os resultados obtidos pelos estribos abertos de ramos inclinados que são soldados na parte inferior em barras longitudinais pois, além de fornecerem acréscimos de resistência da ordem de 50% para as menores taxas de armadura de cisalhamento empregadas neste grupo de estribo, sempre acima do limite inferior de segurança para quando dimensionados tanto pelo ACI 318 (2019) quanto pelo EUROCODE 2 (2014), ABNT NBR 6118 (2014) e *fib* MODEL CODE 2010 (2013), são a melhor alternativa de incluir a pré-fabricação no processo construtivo desse tipo de estribo.

Para a utilização de taxas de armadura de cisalhamento consideradas médias, os estribos contínuos com dobras envolvendo as barras da armadura de flexão superior e inferior têm seus resultados destacados na Figura 5.26d, pois proporcionam acréscimos de resistência de até 80%. Apesar de não garantirem a presença das barras de flexão no interior de todas as dobras, apresentam resultados seguros se dimensionados pelas equações do ACI 318 (2019) e do *fib* MODEL CODE 2010 (2013).

Por fim, com o emprego em médias e altas taxas de armadura de cisalhamento, os estribos treliçados destacados na Figura 5.26e e 5.26f, são consideradas as alternativas mais eficientes do grupo em razão de aliarem acréscimos de resistência de 50% a 100% à praticidade da pré-fabricação. Ainda é preciso ser destacado que, apesar de não estarem contemplados em nenhuma recomendação normativa, ao serem dimensionados pelas equações do ACI 318

(2019), EUROCODE 2 (2014) e *fib* MODEL CODE 2010 (2013) promoveram resultados seguros.

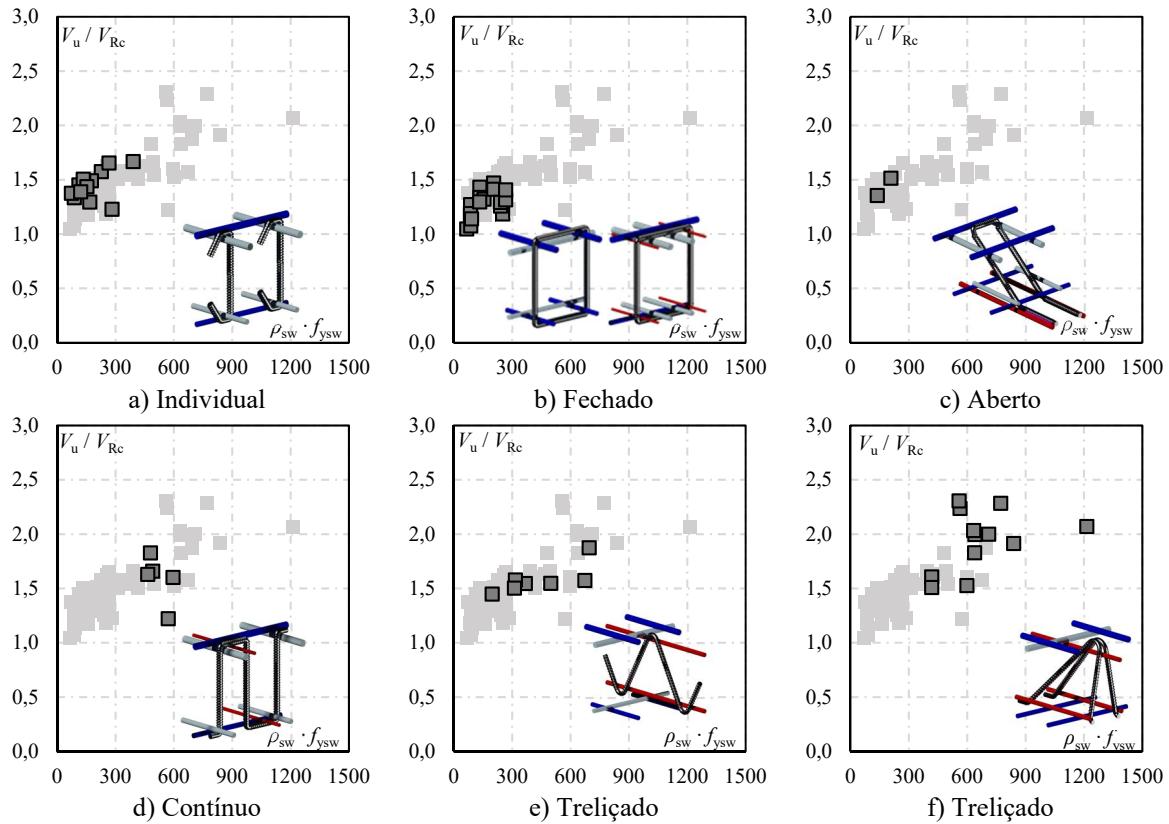


Figura 5.26 – Eficiência dos estribos na resistência à punção.

A Tabela 5.1 apresenta as regras de detalhamento que asseguram o devido posicionamento dos ramos e a ancoragem das extremidades dos estribos mais eficientes dentro dos grupos analisados neste trabalho (mostrados na Figura 5.26). Na Tabela 5.1, para cada tipo de estribo, optou-se por sugerir o arranjo cruciforme em virtude de apresentar menos chances de conflitos entre barras para os casos dos estribos que envolvem as barras da armadura de flexão, embora a variedade de arranjos em que foram empregados os estribos avaliados neste trabalho ainda não permita relacionar diretamente à eficiência de uma armadura de cisalhamento ao arranjo utilizado por ela. Os diâmetros internos da dobra, comprimentos da extensão reta e espaçamentos entre os ramos que estão indicados na Tabela 5.1 contemplam os valores que foram utilizados pelos próprios autores que testaram tais estribos, porém, em grande parte, baseiam-se ao recomendado pelo ACI 318 (2019), principalmente para os estribos individuais, fechados e contínuos, exceto para o estribo treliçado apresentado na última linha, para o qual os critérios mostrados foram retirados de um relatório técnico (EOTA, 2017), que atualmente orienta seu detalhamento, arranjo e metodologia de cálculo.

Tabela 5.1 – Propostas de detalhamento de estribos para reforço à punção de ligação laje-pilar interno.

Tipo	Arranjo	Diâmetro interno da dobra e comprimento de extensão reta	Espaçamento entre ramos (paralelo a face do pilar)
Individuais			
Fechados			
Fechados			
Abertos			
Contínuos			
Treliçados			
Treliçados			

As Figuras 5.27, 5.28 e 5.29 apresentam propostas de montagem e instalação dos estribos presentes na Tabela 5.1. Buscou-se garantir a praticidade nos processos por meio da confecção de módulos. Também são mostradas as opções de arranjos que são viáveis para cada tipo de estribo.

Individuais	1		2		3	
	4	As barras da camada externa da armadura de flexão comprimida são posicionadas na forma;	5	Os módulos formados por estribos cujas dobras superiores e inferiores envolvem as barras das camadas internas da armadura de flexão são instalados;	6	As barras da camada externa da armadura de flexão tracionada são colocadas.
Fechados	1		2		3	
	4	Os módulos formados por estribos que, nas dobras inferiores, envolvem as barras da camada externa da armadura de flexão comprimida e, nas dobras superiores, envolvem as barras da camada interna da armadura de flexão tracionada são colocados;	5	As barras da camada interna da armadura de flexão comprimida são colocadas;	6	As demais barras da camada externa da armadura de flexão comprimida são colocadas;
Fechados	1		2		3	
	4	Os módulos formados por estribos amarrados em barras construtivas no interior das suas dobras são instalados;	5	As barras da camada interna da armadura de flexão comprimida são colocadas;	6	As barras da camada externa da armadura de flexão tracionada são instaladas.
Fechados	1		2		3	
	4	Os módulos formados por estribos amarrados em barras construtivas no interior das suas dobras superiores são posicionados ortogonalmente aos módulos colocados no passo 1;	5	As barras da camada externa da armadura de flexão comprimida são posicionadas;	6	As barras da camada interna da armadura de flexão comprimida são colocadas;

Figura 5.27 – Propostas de montagem de estribos para reforço à punção de ligação laje-pilar interno.

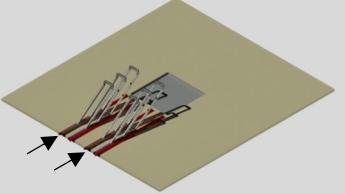
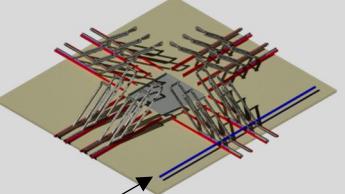
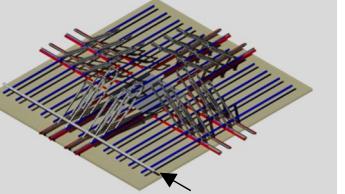
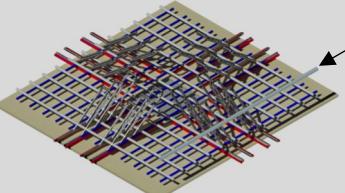
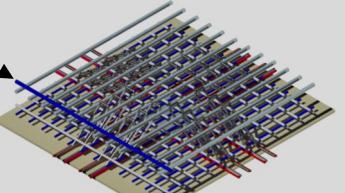
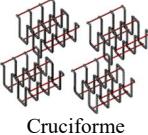
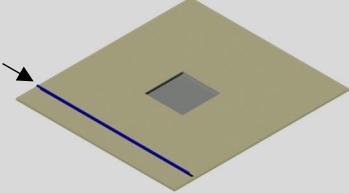
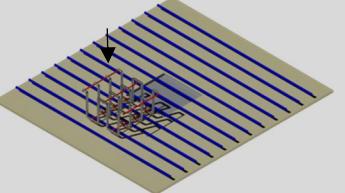
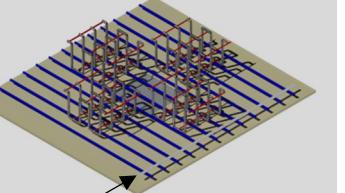
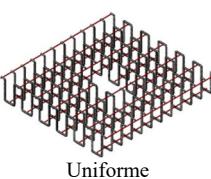
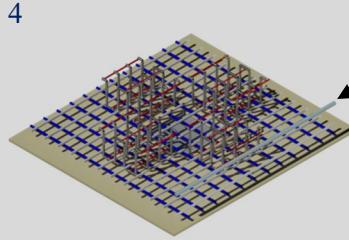
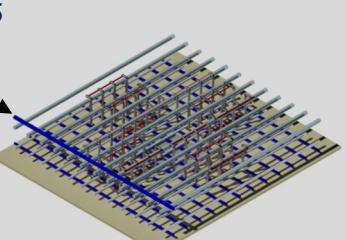
Abertos	1	2	3
 Cruciforme	 Os módulos formados por estribos soldados em guias horizontais de aço são instalados;	 As barras da camada externa da armadura de flexão comprimida são colocadas;	 As barras da camada interna da armadura de flexão comprimida são posicionados;
 Circunferencial	 As barras da camada interna da armadura de flexão tracionada são colocadas;	 As barras da camada externa da armadura de flexão tracionada são posicionadas.	
Contínuos	1	2	3
 Cruciforme	 As barras da camada externa da armadura de flexão comprimida são colocadas;	 Os módulos formados pelos estribos soldados à guias horizontais de aço são instalados paralelamente à camada externa da armadura de flexão comprimida;	 As barras da camada interna da armadura de flexão comprimida são colocadas;
 Uniforme	 As barras da camada interna da armadura de flexão tracionada são posicionadas ortogonalmente ao alinhamento dos ramos dos estribos;	 As barras da camada externa da armadura de flexão tracionada são colocadas.	

Figura 5.28 – Propostas de montagem de estribos para reforço à punção de pilar interno (Continuação).

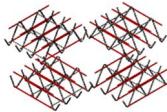
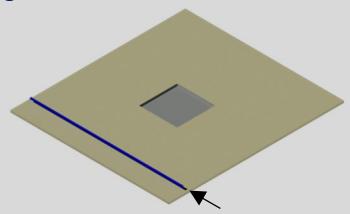
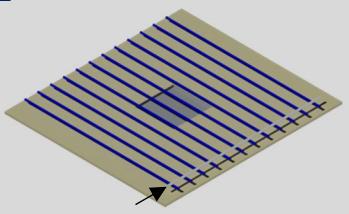
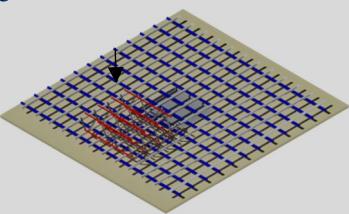
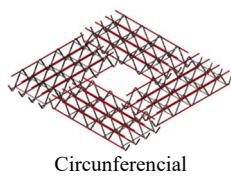
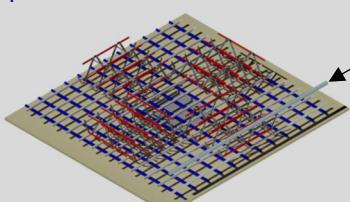
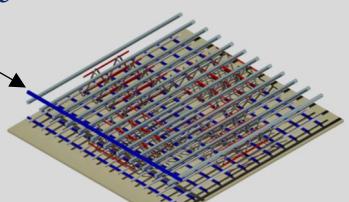
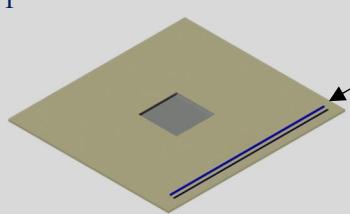
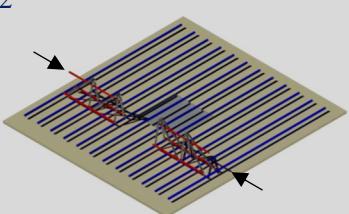
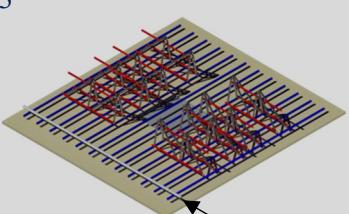
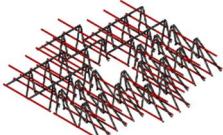
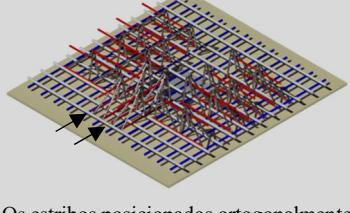
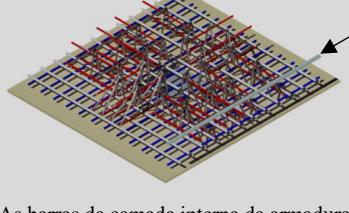
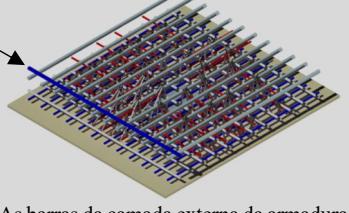
Treliçados		1	2	3
 Cruciforme	 As barras da camada externa da armadura de flexão comprimida são posicionadas;	 As barras da camada interna da armadura de flexão comprimida são colocadas;	 Os módulos formados pelas treliças planas são instalados paralelamente aos lados do pilar;	
		4	5	
 Circunferencial	 As barras da camada interna da armadura de flexão tracionada são colocadas diretamente sobre as barras horizontais superiores das treliças;	 As barras da camada externa da armadura de flexão tracionada são posicionadas.		
Treliçados		1	2	3
 Cruciforme	 As barras da camada externa da armadura de flexão comprimida são colocadas;	 Os estribos posicionados ortogonalmente à armadura de flexão já instalada são instalados; as diagonais devem ser orientadas em direção ao pilar;	 As barras da camada interna da armadura de flexão comprimida são colocadas;	
		4	5	6
 Paralelo	 Os estribos posicionados ortogonalmente aos já instalados são colocados sobre as barras da armadura de flexão comprimida; A altura desses estribos deve ser menor que os estribos colocados no passo 2. Essa diferença de altura deve ser igual ao diâmetro das barras da camada interna da armadura de flexão comprimida para que as barras horizontais superiores de todas as treliças estejam na mesma altura.	 As barras da camada interna da armadura de flexão tracionada são colocadas diretamente sobre as barras horizontais superiores das treliças;	 As barras da camada externa da armadura de flexão tracionada são posicionadas;	

Figura 5.29 – Propostas de montagem de estribos para reforço à punção de pilar interno (Continuação).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma extensa revisão da literatura científica sobre armaduras de cisalhamento do tipo estribo com o objetivo de analisar a eficiência de diferentes alternativas para ancoragem de estribos utilizados como armadura de punção.

Sobre um banco de dados com 119 resultados de ensaios de punção simétrica foi feita a avaliação da influência das variações da ancoragem desse tipo de reforço sobre sua capacidade de proporcionar acréscimos de carga última. Considerou-se, ainda, a avaliação da segurança de lajes dimensionadas pelas propostas de cálculo para estimativa de resistência à punção do ACI 318 (2019), EUROCODE 2 (2014), ABNT NBR 6118 (2014) e *fib* MODEL CODE 2010 (2013), considerando a utilização das variações da ancoragem dos estribos que fogem às regras de detalhamento dessas normas.

As principais conclusões sobre como assegurar a eficiência dos diversos tipos de estribo são:

- As dobras de ancoragem de estribos individuais devem envolver ao menos as barras das camadas internas da armadura de flexão, respeitando os limites preconizados pelas normas técnicas para os diâmetros internos da dobra e comprimentos da extensão reta;
- Esteribos fechados cujas dobras posicionam-se afastadas das barras de flexão (ou seja, quando não há contato mecânico das barras longitudinais com os cantos dos estribos) apresentam desempenho semelhante aos que as possuem no interior das dobras, porém, em ambos os casos, devem possuir tanto nas dobras de ancoragem superiores quanto inferiores;
- Esteribos abertos com ramos inclinados são mais eficientes que aqueles cujos ramos são verticais e, quando inclinados a 60°, apresentam rendimento superior aos inclinados a 45°, para quando os mecanismos de ancoragem envolvidos são dobras em torno das barras da armadura de flexão superior e inferior;
- A capacidade de ancoragem dos estribos abertos com ramos inclinados em 35° que não envolvem as barras de flexão na zona tracionada da laje está predominantemente na

parte inferior desempenhada pelos cordões de solda feitos em trilhos de barras longitudinais posicionados abaixo da armadura de flexão comprimida.

- Na parte interna dos segmentos horizontais dos estribos contínuos deve constar ao menos uma barra de flexão posicionada em qualquer ponto entre duas dobras de ancoragem consecutivas, tanto na parte superior quanto na parte inferior;
- Os estribos formados por módulos pré-fabricados de barras treliçadas planas inclinadas a 60º apresentam eficiência superior as inclinadas à 90º, sem qualquer envolvimento nas barras da armadura de flexão em ambos os casos;
- A capacidade de ancoragem das extremidades superiores dos estribos formados por barras treliçadas espaciais cujas diagonais soldadas ao banho superior se estendem até a borda superior da armadura de flexão é mais relevante para o aumento da eficiência dessa armadura.

Ao final, a partir da definição dos critérios de detalhamento para a ancoragem dos estribos utilizados como armadura de punção, foram propostos processos de montagem e instalação para a construção de lajes lisas com pilar interno utilizando os estribos que proporcionaram níveis satisfatórios de eficiência de acordo com a avaliação feita neste trabalho para que também fosse garantida a praticidade no processo construtivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14) and Commentary**. Farmington Hills, EUA, 2014.

ANDERSON, J. L. **Punching of Concrete Slabs with Shear Reinforcement**. Royal Institute of Tecnology, Bulletin Nº 212, KTH Estocolmo. Suíça, 1963.

ANDRADE, J. L. S. **Estudo Experimental da Inclinação de Estripos Abertos em Lajes Cogumelo de Concreto Armado**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Pp 142, 2000.

ANDRADE, M. A. S. **Punção em Lajes Cogumelo - Estudo do Posicionamento da Armadura de Cisalhamento em relação à Armadura de Flexão**. 1999. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.

ANON, **Durchstanzversuch an Einem Stahlbetonplatte aus B25 bewehrt mit ano plus Durchstanzbewehrung**. Lehrstuhl fur Massivbau, Technische Universitat Munchen, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro, 2014.

BEUTEL, R.; HEGGER, J. **The Effect of anchorage on the Effectiveness of the Shear Reinforcement in the Punching Zone**. Cement and Concrete Composite. v. 24, n. 6, p.539-549, dez. 2002.

BRANTSCHEN, F. **Influence of Bond and Anchorage Conditions of the Shear Reinforcement on the Punching Strength of RC Slabs**. 2016. 227 f. Tese de doutorado. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2016.

BRANTSCHEN, F., FARIA, D. M. V., RUIZ, M. F., MUTTONI, A. **Bond Behaviour of Straight, Hooked, U-Shaped and Headed Bars in Cracked Concrete**. Structural Concrete. 2016. doi: 10.1002/suco.201500199

BROMS, A. R. **Cages of Inclined Stirrups as Shear Reinforcement for Ductility of Flat Slabs.** ACI Structural Journal, n. 116, p. 83–92, 2019.

BROMS, C. E., **Shear Reinforcement for Deflection Ductility of Flat Plates.** ACI Structural Journal, V. 87, No. 6, Nov.-Dec. 1990, pp. 696-705.

CALDENTEY, A. P.; LAVASELLI, P. P.; PEIRETTI, H. C. e FERNÁNDEZ, F. A. **Influence of Stirrup Detailing on Punching Shear Strength of Flat Slabs.** Engineering Structures, v. 49, p.855-865, 2013.

CEN EN 1992-1-1. **Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings.** CEN, EN 1992-1-1, Brussels, Belgium, 2004.

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

CEN EN 1992-1-1:2004/prA1:2013. **Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1 General Rules and Rules for Buildings.** Brussels, Belgium. 2014.

CHAN, P.S.; DESAI, S.B., **Design of Shear Reinforcement Against Punching.** The Structural Engineer, Vol.70, No.9, 5 May, pp.159-164, 1992.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 1990.** London, Thomas Telford, 1993.

EINPAUL, J., BRANTSCHEN, F., RUIZ, M. F., MUTTONI, A. **Performance of Punching Shear Reinforcement under Gravity Loading: Influence of Type and Detailing.** ACI Structural Journal, n. 113, p. 827-838, 2016.

ELIGEHAUSEN R., MALLÉE R. AND SILVA J. F., **Anchorage in Concrete Construction,** Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Mar. 2006, 391 p.

ELIGEHAUSEN, R., VOCKE, H., CLAUSS, A., FURCHE, J., BAUERMEISTER, U. **Neue Durchstanzbewehrung für Elementdecken. Beton und Stahlbetonbau**, v. 98, n. 6, 2003.

ELSTNER, R. C. e HOGESTARD, E. **Shearing Strength as Reinforced Concrete Slabs**. Journal of the American Concrete Institute, Proceedings, Vol. 53, N. 1, p. 22-58, Jul. 1956.

EOM, T. S., KANG, S. M., CHOI, T. W., PARK, H. G. **Punching Shear Tests of Slabs with High-Strength Continuous Hoop Reinforcement**. ACI Structural Journal, n. 115, p. 1295-1305, 2018.

EOTA TECHNICAL REPORT. **Increase of Punching Shear Resistance of Flat Slabs or Footing and Ground Slabs – Lattice Girders**. TR 058, 2017.

ERX ENGENHARIA. **Portfolio**. Disponível em: <<https://www.erx.eng.br/portfolio>>. Acesso em: 05 de novembro de 2020.

FERREIRA, M. P. **Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Armaduras de Cisalhamento e Momentos Desbalanceados**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2010.

FIB MODEL CODE 2010. **Model Code 2010: Model code for concrete structures 2010**. Lausanne: Special Activity Group 5, 2013. 390 p.

FUCHS, W.; ELIGEHAUSEN, R.; BREEN, J.E.: **Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete, Authors' Closure to Discussion**. ACI Structural Journal, Vol. 92, No. 6, S. 794-802, 1995.

FURCHE, J., SCHIMIDT, P. **Orthogonal Arrangement of Effective Lattice Punching Shear Reinforcement**. Fib Symposium, 2019.

GLIKMAN, M., POLO, G., BAYRAK, O., HRYNYK, T. D. **Application of an Inclined Shear Reinforcing Assembly for Slab-Column Connections**. Publicação Especial, ACI v. 321 p.1-20, 2018.

GOMES, R. B. e REGAN, P. E. **Punching Resistance of RC Flat Slabs with Shear Reinforcement.** Journal of Structural Engineering. 684-692, 1999.

GOSAV, A. V., KISS, Z. I., ONET, T., BOMPA, C. V. **Failure Assessment of Flat Slab-to-Column Members.** Magazine of Concrete Research. 2015.

HAEUSLER, F. S. **Zum maximalen Durchstanzwiderstand von Flachdecken mit und ohne Vorspannung.** Dissertação de Mestrado. 02/09/2009.

HAMAD, B. S., JIRSA, J. O., AND D'ABREU DE PAULO, N. I., **Effect of Epoxy Coating on Bond Anchorage of Reinforcing in Concrete Structures.** ACI Structural Journal, v. 90, n. 1, jan/fev., p. 77-88, 1993.

HEGGER, J.; HAUSLER, F.; RICKER, M. **Zur maximalen Durchstanztragfähigkeit von Flachdecken.** Beton und Stahlbetonbau, v 102, Nº.11, pp. 770-777, 2007.

JANG, J. I., KANG, S.M. **Punching Shear Behavior of Shear Reinforced Slab–Column Connection with Varying Flexural Reinforcement.** International Journal of Concrete Structures and Materials 13, 29 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0341-4>.

KOPPITZ, R. KENEL, A. KELLER, T. **Effect of Punching Shear on Load–Deformation Behavior of Flat Slabs.** Engineering Structures, [s.l.], v. 103, p.444-457, sep. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.023>.

KUERES, D.; SIBRUG, C.; HEGGER, J.; FURCHE, J.; SIPPEL, T. **Zur Konstruktiven Durchbildung des Decke-Stütze-Knotens in Flachdecken aus Elementplatten. Bautechnik.** Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau. Vol. 93. Nº 6. Pp. 356-365. 2016.

LEE, J., AND PARK, H. **Bending - Applicability Study of Ultra-Bar (SD 600) and UltraBar for Rebar Stirrups and Ties (SD 500 and 600) for Compression Rebar,** (Traduzido do Coreano). Korea Concrete Institute, ago., 504 pp, 2010.

LEONHARDT F. AND WALTER R. **Eesctiweisste Bewehrungsmatten als Bügelbewehrung – Schubversuche an Plattenbalken und Verankerungsversuche**, Dr. Bautechnik 42J, Heft 10, Oct. 1965, pp. 3-15.

LIMA, H. J. N. **Análise Experimental da Punção de Lajes Lisas com Armadura De Punção Parcialmente Ancorada**. Tese de Doutorado, Universidade de Brasilia, 2020.

LIPS, S. **Punching of Flat Slabs with Large Amounts of Shear Reinforcement**. Tese de Doutorado. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suíça, 2012.

LIPS, S., MUTTONI, A., AND FERNÁNDEZ-RUIZ, M. **Durchstanzversuche an Deckenausschnitten mit FIDECA Durchstanzbewehrung**, EPFL-IBéton, 55 pp., Lausanne, Switzerland, 2010.

MABROUK, R. T. S.; HEGAB, A. A. **Analysis of the Punching Behavior of RC Flat Slabs with Horizontal and Vertical Shear Reinforcement**. MATEC Web of Conferences 120, 2017.

MENETREY, P. H. **Synthesis of punching failure in reinforced concrete**. Cement & Concrete Composites, Vol. 24. Pp. 497-507, 2002.

MUELLER, F. X., MUTTONI, A., THURLIMANN, B. **Durchstanzversuche na Flachdecken mit Aussparungen**. IBK – Bericht (ETHZ), Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Birkhäuser Verlag. Zürich, Switzerland, 1984.

MUTTONI A., FÜRST A., HUNKELER F., **Deckeneinsturz der Tiefgarage am Staldenacker in Gretzenbach**, Medieninformation vom 15.11.2005, Solothurn, Switzerland, 2005, 14 p.

MUTTONI, A. e RUIZ, M. F. **Performance and Design of Punching Shear Reinforcing Systems**. 3rd fib International Congress, 2010.

MUTTONI, A. e SCHWARTZ, J. **Behavior of Beams and Punching in Slabs Without Shear Reinforcement**. IABSE Colloquium, v. 62, Zurique, Suíça. pp 485-491, 1991.

MUTTONI, A. **Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Flat Slabs without Transverse Reinforcement.** ACI Structural Journal, v. 105, n. 4, p. 440-450, 2008.

NORCALC ESTRUTURAL. Disponível em: <<https://www.norcacalc.com.br/>>. Acesso em: 20 de novembro de 2020.

OLIVEIRA, D.R.C., MELO, G.S. AND REGAN, P.E. **Punching Strengths of Flat Slabs with Vertical or Inclined Stirrups.** ACI Structural Journal, Vol.97, nº. S52, Pp.485-491. 2000.

PARK, H.G., AHN, K.S., CHOI, K.K., CHUNG, L. **Lattice Shear Reinforcement for Slab-Column Connections.** ACI Structural Journal, v. 104, n. 4, p.294-303, 2007.

PEREIRA FILHO, M. J. M. **Resistência à Punção de Lajes Lisas Armadas ao Cisalhamento com Estripes Treliçados Pré-Fabricados.** Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2020.

PEREIRA FILHO, M. J. M.; FREITAS, M. V. P.; SANTOS, D. F. A.; NASCIMENTO, A. J. C.; FERREIRA, M. P. **Slabs Strengthened for Punching Shear with Post-Installed Steel and CFRP Connectors.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 12, n. 3, p. 445–478, 2019.

RAMIREZ, J. A., AND RUSSELL, B. W., **Transfer, Development, and Splice Length for Strand/reinforcement in High-strength Concrete.** Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, p. 99-120, 2008.

REGAN, P. E. **Shear Reinforcement of Flat Slabs.** International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Slabs - Proceedings, TRITA-BKN, Bulletin 57, pp. 99-107, 2000.

REGAN, P. E., **Shear Reinforcement Against Punching in Flat Slabs Development of Design Recommendations.** 2001.

REGAN, P. E., **Single-Legged Stirrups as Shear Reinforcement in Reinforced Concrete Flat Slabs.** School of the Environment, Polytechnic of Central London, 1980.

REGAN, P. E.; SAMADIAN, F. **Shear Reinforcement Against Punching in Reinforced Concrete Flat Slabs**. Structural Engineer, v. 79, n. 10, p. 24–31, 2001.

REGAN, P.E. **Shear Combs, Reinforcement Against Punching**. The Structural Engineer. Vol. 63, p.76-84, dez. 1985.

RUIZ, M. F.; MUTTONI, A. **Applications of Critical Shear Crack Theory to Punching of Reinforced Concrete Slabs with Transverse Reinforcement**. ACI Structural Journal, v. 106, n. 4, p. 485–494, 2009.

SCHMIDT, P., KUERES, D. e HEGGER, K. **Punching Shear Behavior of Reinforced Concrete Flat Slabs with a Varying Amount of Shear Reinforcement**. Structural Concrete, pp. 1-12, 2019.

SIBURG, C.; HEGGER, J.; FURCHE, J.; BAUERMEISTER, U., **Punching Shear Reinforcement for Semi Precast Slabs According to Eurocode 2**. Beton und Stahlbetonbau, V. 109, No. 3, Pp. 170-181. 2014.

SILVA, P. C. S. **Resistência à Tração de Diferentes Tipos de Ancoragens Embutidas em Elementos de Concreto Armado**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasilia, 2018.

SPERRY, JAYNE ET AL. **Anchorage Strength of Conventional and High-Strength Hooked Bars in Concrete**. 115. ed. Lawrence-Kansas: Structural Engineering and Engineering Materials sm Report, 281 p. 2015.

SUBRAMANIAN, N. **Alternative Punching Shear Reinforcement for RC Flat Slabs**. The Indian Concrete Journal, [s. l.], p.33-44, jan. 2014.

TRAUTWEIN, L. M. **Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento tipo “Stud” Interno e Tipo Estribo Inclinado**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasilia. Pp 185, 2001.

TRAUTWEIN, L. M. **Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado: Análise Experimental e Numérica.** 2006. 350 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

VERTIKO ENGENHARIA ESTRUTURAL. Disponível em:
<<http://www.vertiko.com.br/index.html>>. Acesso em: 08 de novembro de 2020.

VOLLUM, R. L., ABDEL FATTAH, T. EDER, M., ELGHAZOULI, A. Y. **Design of ACI Type Punching Shear Reinforcement to Eurocode 2.** Magazine of Concrete Research. 2010. Vol. 62, pp 3-16, 2010.

WICKE, M. **Durchstanzversuche an AVI-Bewehrungselementen. Institut fur Stahlbeton und Massivbau,** Leopld Franzens Universitat, Innsbruck, 1984.

WOOD, G. M., **Piper Row Car Park, Wolverhampton, Quantitative Study of the Causes of the Partial Collapse on 20th March 1997,** Structural Studies & Design Ltd, Surrey, England, 2001, 209 p.

YAMADA, T.; NANNI, A.; ENDO, K. **Punching Shear Resistance of Flat Slabs: Influence of Reinforcement Type and Ratio.** ACI Structural Journal, v. 88, n. 4, p.555-563, 1992.