



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

TIAGO DE SOUSA PINTO

INFLUÊNCIA DOS CONECTORES DE CISALHAMENTO NO INCREMENTO DA
RESISTÊNCIA À PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO.

TUCURUÍ – PA
2026

TIAGO DE SOUSA PINTO

INFLUÊNCIA DOS CONECTORES DE CISALHAMENTO NO INCREMENTO DA
RESISTÊNCIA À PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO.

Trabalho de Curso apresentado à Faculdade de
Engenharia Civil, do Campus Universitário de
Tucuruí, da Universidade Federal do Pará,
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Manoel José Mangabeira
Pereira Filho

Coorientador: Eng. Thayson Assunção da Silva
de Freitas

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)

S725i

Sousa, Tiago de Sousa Pinto.
INFLUÊNCIA DOS CONECTORES DE CISALHAMENTO
NO INCREMENTO DA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE
CONCRETO ARMADO / Tiago de Sousa Pinto Sousa.
— 2026.
35 f.: il.

Orientador(a): Prof. Dr. Manoel José Mangabeira Pereira Filho Pereira Filho
Coorientador(a): Prof. Thayson Assunção da Silva de Freitas
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de
Tucuruí, Faculdade de Engenharia Civil, Tucuruí, 2026.

1. Concreto Armado. 2. Lajes Lisas. 3. Punção. 4.
Armadura de cisalhamento. 5. Banco de dados. I. Título.

CDD 016.624

TIAGO DE SOUSA PINTO

INFLUÊNCIA DOS CONECTORES DE CISALHAMENTO NO INCREMENTO DA
RESISTÊNCIA À PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO.

Trabalho de Curso apresentado à Faculdade de
Engenharia Civil, do Campus Universitário de
Tucuruí, da Universidade Federal do Pará,
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Manoel José Mangabeira
Pereira Filho

Coorientador: Eng. Thayson Assunção da Silva
de Freitas

Data da aprovação: ____/____/____

Conceito: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Manoel José Mangabeira Pereira Filho
Universidade Federal do Pará – UFPA, Campus Tucuruí

Eng. Thayson Assunção da Silva de Freitas
Mestrando pela Universidade Federal do Pará – UFPA, Campus Tucuruí

Prof. Dra Carolina Coelho da Rosa
Universidade Federal do Pará – UFPA, Campus Tucuruí

Prof. Me. Jedson Henryque Corrêa Abrantes
Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, Campus Itaituba

Dedico esse TCC a toda minha família e amigos, aos que fizeram parte dessa conquista todos foram primordiais para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente quero agradecer a Deus que foi quem me concedeu a chance de cursar faculdade, e de sempre me apoiar nos meus melhores e principalmente piores momento, agradeço a Deus por todo dia ele ter me dado a força que eu sempre pedi a ele para não desistir e para honra e glória D'Ele estou finalizando este ciclo em minha vida.

Agradeço também a minha mãe Maria da Conceição Lopes de Sousa por ser uma mulher forte e valente e de ter me ensinado a ser um homem e por ter me guiado pelo caminho certo tudo que faço é para que a senhora sinta orgulho de mim e que essa seja uma das conquistas que deixem a senhora orgulhosa muito obrigado por ser minha força e razão de resiliência durante esses longos 5 anos de graduação, o apoio e motivação da senhora foi essencial para que eu chegasse até aqui, agradeço também aos meus irmãos Jonas de Sousa, Renata Lopes, Rayane Lopes, Raquel Lopes, Wanderson Lopes e Pedro Henrique vocês também foram fundamentais para que essa caminhada fosse concluída com êxito e dedico essa minha conquista a cada um de vocês que sempre seguraram em minha mão.

Agradeço aos meus amigos mais próximos, Matheus, Jhonatha, Lukinhas, Lucilene, Talita e Agatha o apoio de vocês foram incondicionais durante toda essa trajetória compartilho essa minha vitória com cada um de vocês.

Aos meus amigos de turma no qual estiveram comigo durante madrugadas acordados, perdendo sono, que seguraram em minha mão em cada dificuldade enfrentada, que me auxiliaram ao longo desses 5 anos e que foram essenciais para que todos os dias eu tivesse um motivo bom para ir às aulas então muito obrigado, Agatha, Lucas, Igor, Bruno, Jerfeson, Douglas.

Agradeço aos seguintes professores que foram fundamentais nessa minha caminhada gostaria cumprimentar a cada um dos seguintes docentes: Grazielle Tigre de Souza, Manoel José Mangabeira Pereira Filho e ao meu coorientador Thayson Assunção da Silva de Freitas que foi primordial para o desenvolvimento desse trabalho e por todo auxílio, muito obrigado a todos a contribuição e o apoio de cada um foi de suma importância.

RESUMO

O uso de conectores de punção em ligações laje-pilar é considerado a estratégia mais eficiente para aumentar a resistência à punção. No cenário nacional, essas armaduras são produzidas industrialmente apenas no estado de São Paulo, levando as regiões mais afastadas a recorrerem a um elevado custo de transporte ou à produção in loco. Na prática, conectores de punção confeccionados em obra podem apresentar variações relacionadas ao diâmetro e espessura da cabeça, rugosidade da superfície das barras, além do seu comprimento. Com isso, este trabalho busca avaliar o desempenho de ligações laje-pilar armadas ao cisalhamento com conectores de punção de variados processos de fabricação através de resultados experimentais obtidos na literatura organizados em um banco de dados. Este banco de dados é composto por 104 resultados de ensaios em ligações laje-pilar, de lajes lisas armadas à punção por cisalhamento com conectores de punção, selecionadas de 28 autores da literatura. Todas as lajes apresentaram carregamento centrado com pilares circulares ou quadrados e ruptura dentro da região das armaduras, delaminação ou esmagamento do concreto adjacente ao pilar, com altura útil (d) variando 83 mm e 464 mm, taxa de armadura de flexão (ρ_l) entre 0,32% e 2,02%, resistência à compressão do concreto (f_c) entre 17,5 Mpa e 67,0 Mpa, resistência ao escoamento do aço (f_y) entre 420 Mpa e 905 Mpa e taxa de armadura de cisalhamento (ρ_w) entre 0,21% e 1,74%. Conectores de punção com superfície lisa apresentaram desempenho inferior aos conectores com barras de superfície nervuradas.

Palavra-Chave: Concreto Armado, Lajes Lisas, Punção, Armadura de Cisalhamento, Banco de Dados.

ABSTRACT

The use of shear studs in slab-column connections is considered the most efficient strategy to increase punching shear resistance. In the national scenario, these reinforcements are industrially produced only in the state of São Paulo, forcing more distant regions to deal with high transport costs or resort to in situ production. In practice, jobsite-made shear studs may present variations regarding head diameter and thickness, bar surface roughness, and length. Accordingly, this work seeks to evaluate the performance of slab-column connections reinforced for shear with studs from various manufacturing processes using experimental results from the literature organized into a database. This database comprises 104 test results of slab-column connections, specifically flat slabs reinforced for punching shear with studs, selected from 28 authors. All slabs featured centric loading with circular or square columns and exhibited failure within the reinforced region, delamination, or concrete crushing adjacent to the column, with effective depth (d) ranging from 83 mm to 464 mm, flexural reinforcement ratio (ρ_l) between 0.32% and 2.02%, concrete compressive strength (f_c) between 17.5 Mpa and 67.0 Mpa, steel yield strength (f_y) between 420 Mpa and 905 Mpa, and shear reinforcement ratio (ρ_w) between 0.21% and 1.74%. Shear studs with smooth surfaces showed inferior performance compared to connectors with ribbed bars.

Keywords: *Reinforced Concrete, Flat Slabs, Punching Shear, Shear Reinforcement, Database.*

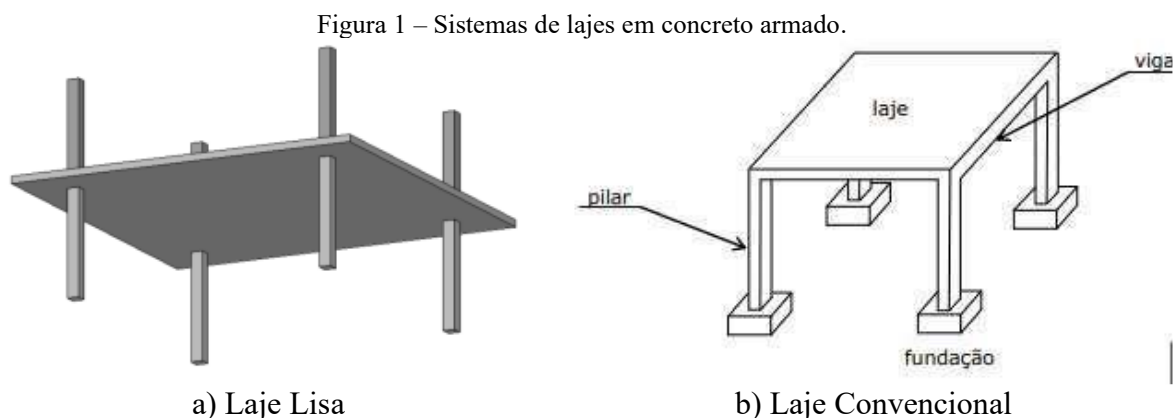
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	09
1.1	Objetivos.....	11
1.1.1	Objetivo geral.....	11
1.1.2	Objetivo específico.....	11
1.3	Justificativa.....	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1	Estudos pioneiros sobre armaduras de cisalhamento em lajes lisas.....	12
2.2	Desenvolvimento e eficiência dos conectores do tipo <i>double headed stud</i>.....	13
2.3	Ductilidade e eficiência dos sistemas de armadura de cisalhamento.....	14
2.4	Armaduras internas de cisalhamento em lajes de concreto armado.....	15
2.5	Comportamento de lajes com armadura de cisalhamento sob punção.....	16
2.6	Comparação entre sistemas de armadura de cisalhamento.....	17
3	METODOLOGIA.....	19
3.1	Coleta do banco de dados.....	19
3.2	Parâmetros de análise.....	19
3.3	Banco de dados.....	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
4.1	Análise da eficiência dos conectores de punção do tipo <i>double headed stud</i>...	24
4.2	Análise da eficiência dos conectores de punção do tipo <i>stud rail</i>.....	26
4.3	Análise da eficiência dos conectores de punção do tipo <i>double rail stud</i>.....	28
5	CONCLUSÃO.....	31
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

A punção em lajes lisas é um fenômeno que ocorre principalmente no interior da ligação laje-pilar devido a altas tensões de cisalhamento e de flexão resultantes da aplicação de carregamentos na estrutura. Este fenômeno é caracterizado pela ruptura frágil da ligação, o que pode levar a estrutura a ruína por meio do colapso progressivo (OLIVEIRA et al., 2013). A nível de projeto, para evitar esse tipo de ruptura indesejável, emprega-se as armaduras de cisalhamento, por ser uma das alternativas mais eficazes para aumentar a ductilidade e a resistência à punção da ligação laje-pilar.

Os sistemas estruturais em lajes de concreto armado podem ser classificados em lajes convencionais e lajes lisas, conforme ilustrado na Figura 1. Enquanto as lajes convencionais transferem os esforços para vigas, que posteriormente os transmitem aos pilares, as lajes lisas descarregam diretamente sobre os pilares, proporcionando maior liberdade arquitetônica e redução da altura total da edificação. Entretanto, essa solução estrutural concentra elevadas tensões na ligação laje-pilar, tornando o fenômeno da punção um dos principais estados limites últimos a serem considerados no dimensionamento.

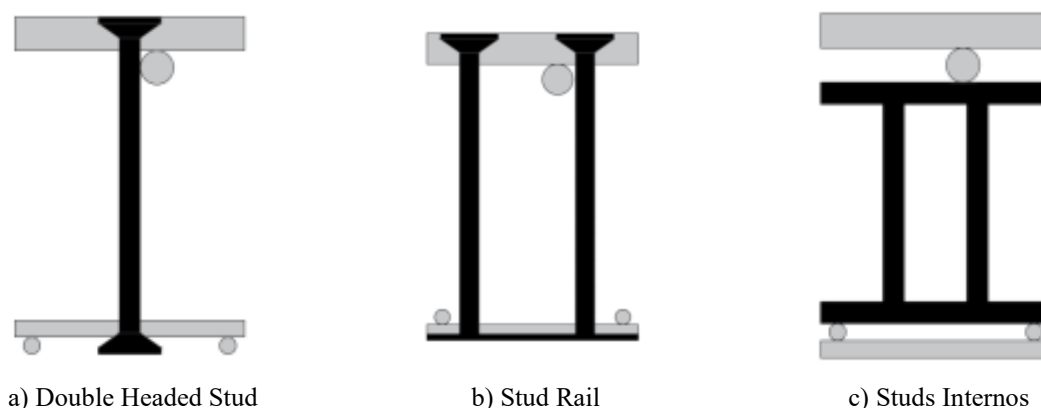


Fonte: Santos (2018;2022)

Comercialmente, diversos tipos de armaduras são empregados em lajes de concreto armado e dentre os diversos tipos de armaduras, os conectores de punção são atualmente populares em construções com lajes lisas, devido a vantagens referentes ao seu emprego, como a sua fácil instalação e por possuírem cabeça de ancoragem mecânica na parte superior e inferior, que são suficientes para desenvolver o escoamento nos pinos de cisalhamento antes da falha, que ocorre de forma dúctil quando esse tipo de reforço é utilizado.

Nos conectores de punção, apresentados na Figura 2, destacam-se os *double headed studs*, que é mais utilizado devido a sua fácil montagem, podendo ser colocado após a montagem da armadura de flexão, os *studs rails*, que consistem em barras de aço soldados em trilhos de aço na extremidade inferior e a cabeça de ancoragem na extremidade superior e os *studs* internos, que são posicionados internamente à armadura de flexão. Estas armaduras são distribuídas próximas da ligação com o intuito de resistir às altas tensões de cisalhamento e de flexão resultantes da aplicação de carregamentos na estrutura.

Figura 2 – Pinos de Cisalhamento



Fonte: Costa *et al.* (2020)

Contudo, a nível comercial, os conectores de punção são fabricados industrialmente majoritariamente no estado de São Paulo, o que leva as demais regiões a recorrerem a um elevado custo de transporte ou à produção in loco por um processo de soldagem manual, o que pode ser desfavorável uma vez que este método de fabricação consome muito tempo e pode resultar em alterações das propriedades mecânicas do aço utilizado nos conectores de punção devido ao processo de aquecimento.

Diante disso, a presente pesquisa analisa a influência dos conectores de punção no incremento da resistência à punção em lajes lisas de concreto armado. A pesquisa analisa o comportamento estrutural desses elementos considerando variáveis relacionadas ao tipo de conector, à sua categoria construtiva (industrial ou Artesanal) e às características da superfície do pino (lisa ou rugosa) que interferem na aderência com o concreto, com o objetivo de verificar como o detalhamento e a configuração geométrica influenciam a eficiência resistente do sistema.

Os resultados serão interpretados com base em banco de dados e comparados entre diferentes configurações de reforço, permitindo avaliar a eficiência relativa dos conectores em distintas condições de aplicação. Espera-se demonstrar a relação entre o detalhamento dos conectores e

o ganho de capacidade resistente, bem como sua contribuição para o aumento da ductilidade estrutural.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a associação dos conectores de cisalhamento no aumento da resistência à punção em lajes lisas de concreto armado, analisando o desempenho de diferentes tipos de conectores, processos de fabricação e características superficiais por meio de um banco de dados experimental

1.1.2 Objetivos específicos

- Comparar o desempenho de conectores de punção industriais e artesanais quanto ao incremento da resistência à punção em lajes lisas de concreto armado;
- Avaliar a influência das características superficiais dos pinos, especialmente a rugosidade, na eficiência dos conectores de punção;
- Investigar a relação entre a taxa mecânica de armadura de cisalhamento e a capacidade resistente das ligações laje-pilar;
- Analisar a ass do detalhamento construtivo e da configuração geométrica dos diferentes sistemas de conectores no comportamento estrutural e na ductilidade das lajes;
- Identificar quais sistemas de conectores apresentam maior eficiência no aumento da resistência à punção e na melhoria do desempenho das ligações laje-pilar.

1.2 JUSTIFICATIVA

A punção é um dos principais mecanismos de ruptura em lajes lisas de concreto armado, podendo provocar falhas bruscas e comprometer a segurança da estrutura. Nesse contexto, torna-se importante avaliar a eficiência dos conectores de cisalhamento, especialmente diante das diferenças existentes entre conectores industriais e artesanais, contribuindo para o aprimoramento do dimensionamento e das recomendações técnicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

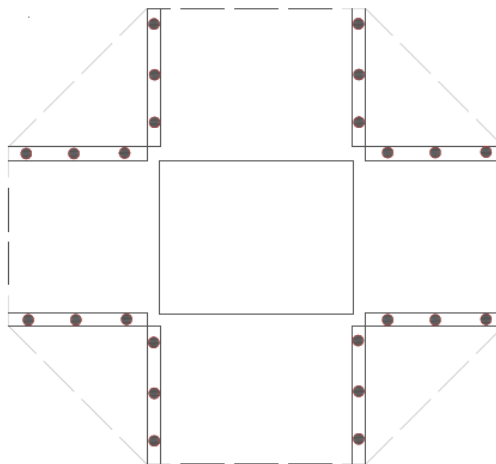
2.1 Estudos pioneiros sobre armaduras de cisalhamento em lajes lisas

As primeiras investigações experimentais acerca das armaduras de cisalhamento em lajes lisas de concreto foram desenvolvidas por Mokhtar, Ghali e Dilger (1985). Os autores demonstraram que a introdução de armaduras transversais na região de ligação laje – pilar é capaz de modificar significativamente o comportamento estrutural da ligação, proporcionando o aumento da resistência à punção e maior capacidade de deformação antes da ruptura.

Os ensaios realizados por Mokhtar, Ghali e Dilger (1985), evidenciaram que os conectores de punção do tipo *stud rail* atuam interceptando as fissuras inclinadas formadas por cisalhamento, permitindo assim uma melhor redistribuição das tensões e retardando o desenvolvimento da superfície crítica de ruptura.

Os testes feitos pelos autores mostraram que o uso de reforço com pinos de cisalhamento aumenta muito a resistência e a ductilidade da conexão laje-pilar, e que o caminho de carga-deflexão é aproximadamente o mesmo para as lajes com e sem reforço de cisalhamento. Entretanto na carga máxima, a deflexão em uma laje com reforço de cisalhamento é de duas a três vezes maior do que a deflexão do corpo de prova sem reforço de cisalhamento. A Figura 3 ilustra a disposição típica do sistema de armadura de cisalhamento do tipo *Stud Rail* ao redor do pilar, destacando o posicionamento dos conectores na região sujeita à ruptura por punção.

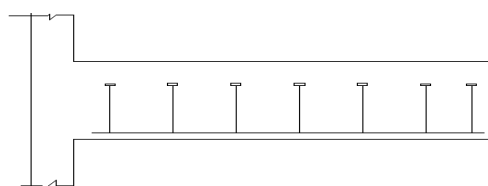
Figura 3 - Configuração típica do sistema de armadura de cisalhamento do tipo Stud Rail em torno do pilar



Fonte: Adaptado de Mokhtar, Ghali e Dilger (1985).

Os ensaios também evidenciaram que a eficiência do sistema está diretamente relacionada às condições de ancoragem e ao posicionamento dos conectores. Verificou-se que os pinos mais próximos à face do pilar como ilustrado na Figura 4 são os mais solicitados, indicando que a distribuição das tensões de cisalhamento não é uniforme ao longo da região reforçada.

Figura 4 – Distribuição das forças nos pinos de cisalhamento ao longo das linhas de Stud Rail.



Fonte: Adaptado de Mokhtar, Ghali e Dilger (1985).

Outra importante conclusão apresentada pelos autores foi que o aumento da quantidade de armadura de cisalhamento não produz ganhos ilimitados de resistência, uma vez que para elevadas taxas de armadura a ruptura passa a ser governada pelo esmagamento da biela comprimida de concreto adjacente ao pilar.

2.2 Desenvolvimento e eficiência dos conectores do tipo *double headed stud*

Com o avanço das pesquisas sobre resistência à punção em lajes lisas, surgiu a necessidade de desenvolver sistemas de armadura de cisalhamento que apresentassem maior eficiência resistente e melhores condições de ancoragem. Nesse contexto, Beutel (2002) realizou um dos mais importantes programas experimentais sobre conectores do tipo *Double Headed Stud*, compostos por pinos com cabeças de ancoragem em ambas as extremidades.

Os ensaios desenvolvidos pelo autor demonstraram que os *Double Headed Studs* são capazes de proporcionar aumentos significativos na resistência à punção, em alguns casos superiores ao dobro da resistência de lajes sem armadura de cisalhamento. Esse desempenho é atribuído à capacidade dos studs de interceptar as fissuras inclinadas de cisalhamento e transferir parte dos esforços de tração desenvolvidos na região da ligação laje-pilar.

Beutel (2002) também verificou que as lajes reforçadas com *Double Headed Studs* apresentam comportamento mais dúctil quando comparadas às lajes sem armadura de cisalhamento,

permitindo maiores deformações antes da ruptura e reduzindo o caráter abrupto do colapso por punção.

As investigações de Beutel (2002) tornaram-se referência para o desenvolvimento de recomendações normativas internacionais, sendo posteriormente incorporadas às formulações adotadas pelo Eurocode 2 (2023) e pelo *fib* Model Code 2020 (2024), além de servirem de base para diversas pesquisas sobre resistência à punção em lajes lisas de concreto armado.

2.3 Ductilidade e eficiência dos sistemas de armadura de cisalhamento (BROMS, 2007)

Com o avanço das pesquisas sobre resistência à punção, verificou-se que o aumento da capacidade resistente das ligações laje-pilar, isoladamente, não era suficiente para garantir maior segurança estrutural. Nesse contexto, Broms (2007) desenvolveu importantes estudos experimentais com o objetivo de avaliar não apenas a resistência, mas também a ductilidade de diferentes sistemas de armadura de cisalhamento empregados em lajes lisas de concreto armado.

Os resultados obtidos demonstraram que a utilização de armaduras de cisalhamento proporciona aumentos significativos na resistência à punção e melhora o comportamento pós-fissuração das ligações. Entretanto, o autor verificou que o desempenho dos diferentes sistemas não é equivalente, sendo observadas diferenças significativas quanto à capacidade de deformação e à eficiência na transferência de esforços.

Entre os sistemas estudados, os *Double Headed Studs* apresentaram um dos melhores desempenhos, proporcionando maiores deformações antes da ruptura e reduzindo o caráter frágil associado ao colapso por punção. Segundo Broms (2007), a elevada eficiência desse sistema está relacionada às condições de ancoragem proporcionadas pelas cabeças presentes nas extremidades dos pinos. Dessa forma, a eficiência dos sistemas de armadura de cisalhamento deve ser avaliada conjuntamente em termos de resistência, ductilidade e detalhamento construtivo.

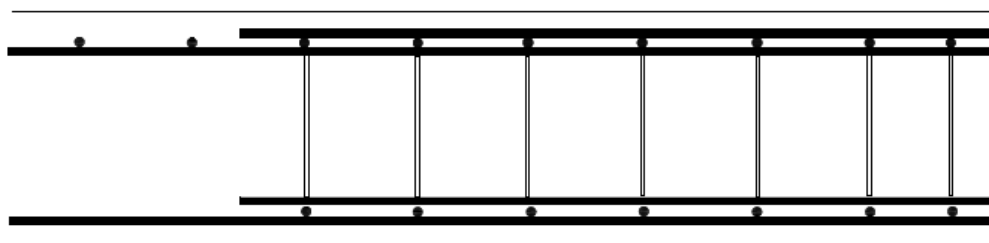
As contribuições de Broms (2007) foram fundamentais para o desenvolvimento de critérios modernos de dimensionamento à punção e influenciaram diversos estudos posteriores, além de servirem de base para recomendações presentes no *fib* Model Code 2020 (2024).

2.4 Armaduras internas de cisalhamento em lajes de concreto armado

Embora os sistemas industrializados, como os conectores do tipo *Stud Rail* e *Double Headed Stud*, tenham demonstrado elevada eficiência no aumento da resistência à punção, seu emprego nem sempre é viável sob os aspectos econômico e construtivo, especialmente em países onde a produção desses sistemas ainda é limitada. Nesse contexto, surgiram pesquisas voltadas ao desenvolvimento de sistemas alternativos de armadura de cisalhamento, destacando-se os estudos desenvolvidos por Trautwein *et al.* (2011) e posteriormente por Trautwein, Gomes e Melo (2013).

Os autores investigaram experimentalmente o comportamento de lajes lisas reforçadas com diferentes tipos de armaduras internas de cisalhamento, incluindo estribos fechados, ganchos em "U", ganchos em "U" invertidos e pinos antifissuração. O principal objetivo das pesquisas foi avaliar a eficiência desses sistemas no aumento da resistência à punção e compreender a influência das condições de ancoragem e do detalhamento construtivo sobre o comportamento estrutural das ligações laje-pilar.

Figura 5 - Detalhes da armadura de cisalhamento interna utilizada por Trautwein *et al.* (2011)



Fonte: Adaptado de Trautwein *et al.* (2011).

Os resultados experimentais demonstraram que a utilização de armaduras internas ilustrada na Figura 5 promove aumento significativo na resistência à punção e melhora o comportamento pós-fissuração das lajes. Entretanto, verificou-se que a eficiência resistente depende fortemente do tipo de armadura empregada e, principalmente, das condições de ancoragem dos conectores. Sistemas que apresentaram deficiências de ancoragem não conseguiram desenvolver plenamente as tensões de escoamento do aço, resultando em menores incrementos de resistência.

Trautwein, Gomes e Melo (2013) também destacaram que o detalhamento geométrico das armaduras internas exerce influência direta sobre o desempenho estrutural do sistema. O espaçamento entre as linhas de armadura, a distância da primeira linha em relação à face do pilar e a quantidade de elementos resistentes são parâmetros que influenciam significativamente a capacidade resistente das ligações.

As contribuições desses autores possuem grande relevância para o presente trabalho, pois demonstram que sistemas alternativos de armadura de cisalhamento podem apresentar desempenho satisfatório quando adequadamente detalhados, além de fornecerem importantes subsídios para a avaliação de conectores produzidos de forma artesanal e de soluções de reforço economicamente mais viáveis.

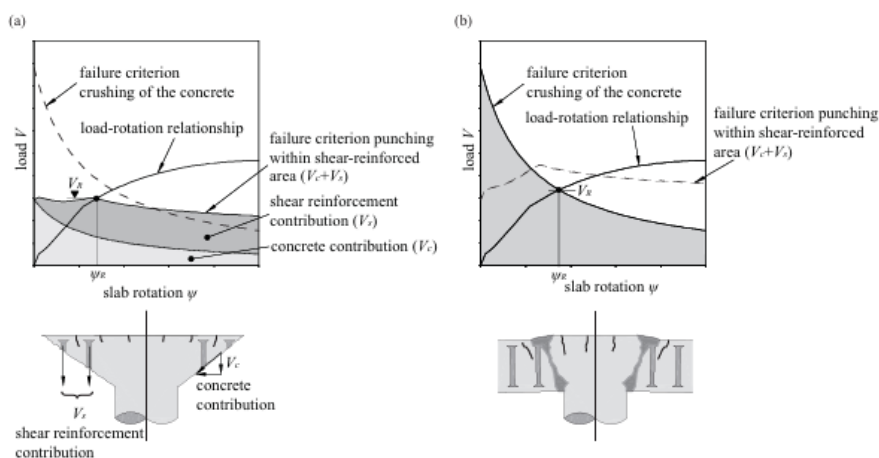
2.5 Comportamento de lajes com armadura de cisalhamento sob punção

Lips, Ruiz e Muttoni (2012) realizaram uma investigação experimental com o objetivo de avaliar o comportamento de lajes lisas de concreto armado reforçadas com armaduras de cisalhamento, analisando simultaneamente a resistência à punção, a capacidade de deformação como está mostrando a figura 6 das ligações e os mecanismos de ruptura. Os autores compararam os resultados experimentais com as previsões fornecidas pelo ACI 318-11 (2011), Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) e pela *Critical Shear Crack Theory (CSCT)*, proposta por Muttoni (2008), buscando verificar a confiabilidade desses modelos de dimensionamento.

Os resultados demonstraram que a presença de armaduras de cisalhamento aumenta significativamente a resistência das ligações laje-pilar e proporciona maior capacidade de deformação antes da ruptura. Entretanto, verificou-se que o comportamento estrutural depende não apenas da quantidade de armadura, mas também das condições de ancoragem dos conectores e da interação entre o concreto e a armadura transversal.

Outro aspecto importante do estudo foi a identificação de dois modos principais de ruptura: a ruptura por punção dentro da região armada e a ruptura por esmagamento das bielas comprimidas de concreto próximas ao pilar. Os autores demonstraram que a CSCT representa de forma mais consistente esses mecanismos por considerar a abertura da fissura crítica e a rotação da laje, enquanto os modelos do ACI 318-11 (2011) e da Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) utilizam abordagens baseadas na soma das contribuições do concreto e da armadura de cisalhamento.

Figura 6 - Curva de carga-rotação e critérios de falha de acordo com a CSCT2: (a) punção dentro da zona reforçada contra cisalhamento predominando; e (b) esmagamento das vigas de concreto predominando



Fonte: Lips, Ruiz e Muttoni (2012)

2.6 Comparação entre Sistemas de Armadura de Cisalhamento

Com o desenvolvimento de diferentes soluções para o reforço à punção em lajes lisas, tornou-se necessário comparar o desempenho estrutural dos diversos sistemas de armadura de cisalhamento disponíveis. Nesse contexto, Hegger *et al.* (2017) realizaram um amplo estudo experimental para avaliar a eficiência de diferentes tipos de conectores empregados em ligações laje-pilar, considerando não apenas a resistência última, mas também a ductilidade, os modos de ruptura e os aspectos construtivos associados à sua utilização.

Os autores analisaram lajes reforçadas com diferentes configurações de armaduras de cisalhamento, comparando sistemas compostos por *Double Headed Studs*, estribos convencionais e outros conectores utilizados internacionalmente. Os ensaios demonstraram que todos os sistemas proporcionaram aumento da resistência à punção em relação às lajes sem armadura de cisalhamento, porém com níveis distintos de eficiência, evidenciando que o comportamento estrutural depende das características de cada solução adotada.

Entre os sistemas avaliados, os *Double Headed Studs* apresentaram um dos melhores desempenhos. Segundo Hegger *et al.* (2017), esse resultado está relacionado à elevada eficiência das cabeças de ancoragem, que favorecem a transferência de esforços entre o

concreto e a armadura, permitindo maior aproveitamento da resistência do aço e reduzindo a possibilidade de arrancamento dos conectores.

Os autores também verificaram que o desempenho das ligações não depende exclusivamente do tipo de armadura empregado, mas também do seu detalhamento geométrico. Parâmetros como o espaçamento entre as linhas de conectores, a distância da primeira linha em relação ao pilar e a distribuição das armaduras ao redor da região crítica influenciam diretamente a resistência e o modo de ruptura das lajes.

3 METODOLOGIA

3.1 Coleta do banco de dados

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram coletados resultados de 163 ensaios em ligações laje-pilar de lajes lisas armadas à punção por cisalhamento com conectores de punção (*double headed stud*, *stud rail* e os *studs internos* que a partir daqui serão chamados de *double rails stud*, devido ao fato de estas armaduras serem fabricadas com a barra de aço soldada a dois trilhos de aço na parte superior e inferior), selecionadas de 28 autores da literatura científica disponível entre 1985 e 2024. Todas as lajes selecionadas para compor o banco de dados obedeceram a dois critérios de filtragem: o tipo de carregamento e o modo de ruptura. Portanto, estão contidas no banco de dados somente lajes que foram ensaiadas submetidas a carregamento centrado e apresentaram o modo de ruptura por punção a tração diagonal dentro da região armada, esmagamento da biela comprimida adjacente ao pilar e a ruptura por delaminação devido a esforços de flexão.

3.2 Parâmetros de análise

O desempenho da armadura de cisalhamento com conectores de punção foi utilizado por meio da razão entre a carga última de ruptura obtida experimentalmente e a resistência teórica calculada (V_w/V_{RC}). Para esta análise, a resistência à punção teórica calculada (V_{RC}) foi estimada utilizando a fórmula apresentada no Eurocode 2 (2023), conforme mostrado na Equação 1.

$$V_{RC} = 0,6 \cdot k_{pb} \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c \cdot \frac{d_{dg}}{d})^{1/3} \cdot u_1 \cdot d \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

d é a altura útil da laje em mm;

u_1 é o perímetro de controle afastado $0,5 \cdot d$ da face do pilar, semelhante ao apresentado pelo *fib* Model Code 2020 (2024) em mm;

k_{pb} é um coeficiente para controlar o incremento de resistência e é definido por:

$$k_{pb} = \sqrt{40 \cdot (d/u_1)} \leq 2,5;$$

d_{dg} é um parâmetro para levar em consideração as propriedades do agregado, definido por $d_{dg} = 16 + d_g \leq 40$, sendo d_g o diâmetro máximo dos agregados;

f_c é a resistência média à compressão do concreto em MPa;

ρ é a média geométrica da taxa de armadura de flexão nas duas direções calculadas por $\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \leq 0,02$, onde ρ_x e ρ_y são taxas de armadura de flexão nas lajes nas direções x e y.

Outro parâmetro para análise do incremento de resistência dos conectores de punção é a taxa mecânica de armadura de cisalhamento (ω), utilizada para caracterizar a quantidade de armadura disponível, conforme mostra a Equação 2.

$$\omega = \frac{\rho_w \cdot f_{yw}}{f_c} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

ω é a taxa de armadura de cisalhamento;

$$\rho_w = \frac{A_{sw1+2}}{2} \cdot s_r \cdot u_1 \quad \text{Equação 3}$$

A_{sw1+2} é a média da área de aço das primeiras duas camadas de armadura

s_r é a distância radial entre tais camadas e o perímetro de controle

u_1 é medido a uma distância de $0,5 \cdot d$ das faces do pilar semelhante ao apresentado pelo *fib* Model Code 2020 (2024);

f_{yw} é a tensão de escoamento do aço utilizado na armadura de cisalhamento.

f_c é a resistência média à compressão do concreto;

3.3 Banco de dados

Com a aplicação dos critérios de filtragem restaram apenas 104 lajes para compor o banco de dados definitivo. As Tabelas 1 a 4 apresentam os espécimes que de fato compõem o banco de dados final deste trabalho, divididos em 3 distintos tipos de armadura de cisalhamento do tipo conectores de punção e por seus respectivos autores. Os tipos de armaduras são o *Double Headed Stud*, *Stud Rail* e *Stud Interno* que a partir deste momento serão chamados de *Double*

Rail Stud, devido ao fato de estas armaduras serem fabricadas de forma artesanal com barras de aço nervuradas, soldadas

Tabela 1 - Resumo das características das lajes que compõem o banco de dados com *Double Headed Studs*.

Autor	Espécimes	r_q (mm)	C (mm)	d (mm)	ρ_l (%)	f_c (Mpa)	Categoria	Superfície	Arranjo	ρ_w (%)	f_{ysw} (Mpa)	Ruptura	V_u/V_{RC}
Regan e Samadian (2001)	A2	1445	200	160	1.64	43.0	Artesanal	Nervurada	Radial	0.40	519	in	1.39
Buetel (2002)	Z1	1200	200	250	0.80	24.8	Industrial	Nervurada	Radial	0.65	580	max	1.68
	Z2	1200	200	250	0.80	26.3	Industrial	Nervurada	Radial	0.65	580	max	1.80
	Z3	1200	200	250	0.80	24.1	Industrial	Nervurada	Radial	0.70	580	max	2.07
	Z4	1200	200	250	0.80	31.5	Industrial	Nervurada	Radial	0.75	580	max	1.93
	Z5	1200	263	250	1.25	28.0	Industrial	Nervurada	Radial	0.80	540	max	1.90
	Z6	1200	200	250	1.25	37.3	Industrial	Nervurada	Radial	0.91	540	max	1.87
	V1	1200	200	250	0.80	30.8	Industrial	Nervurada	Radial	0.57	544	in	1.48
	V2	1200	200	250	0.80	36.2	Industrial	Nervurada	Radial	0.57	544	in	1.59
	V3	1200	200	250	0.80	23.2	Industrial	Nervurada	Radial	0.57	544	in	1.53
	V4	1200	200	350	0.50	26.0	Industrial	Nervurada	Radial	0.44	544	in	1.52
	18B	1215	300	151	1.21	38.8	Industrial	Nervurada	Radial	0.74	500	in	1.55
Brikle e Dilger (2008)	S2	1000	250	124	1.54	29.0	Industrial	Lisa	Cruciforme	0.45	393	in	1.29
	S3	1000	250	124	1.54	31.6	Industrial	Lisa	Radial	0.45	393	in	1.25
	S5	1000	250	124	1.54	36.3	Industrial	Lisa	Cruciforme	0.68	465	in	1.30
	S6	1000	250	124	1.54	33.4	Industrial	Lisa	Radial	0.68	465	in	1.32
	S8	1500	300	190	1.30	35.0	Industrial	Lisa	Cruciforme	0.32	460	in	1.25
	S9	1500	300	190	1.30	35.2	Industrial	Lisa	Cruciforme	0.21	460	in	1.30
	S11	1900	350	260	1.10	30.0	Industrial	Lisa	Cruciforme	0.35	409	in	1.32
	S12	1900	350	260	1.10	33.5	Industrial	Lisa	Cruciforme	0.24	409	in	1.20
Regan (2009)	1	1378	300	150	2.00	33.1	Industrial	Nervurada	Radial	0.39	500	in	1.27
	2	1378	300	150	2.00	29.7	Industrial	Nervurada	Radial	0.56	500	max	1.70
	3	1378	300	150	2.00	25.6	Industrial	Nervurada	Radial	0.56	500	max/	1.64
Lips, Ruiz e Muttoni (2012)	PL6	1380	130	198	1.60	36.6	Industrial	Nervurada	Radial	1.01	519	max	1.99
	PL7	1380	260	197	1.60	35.9	Industrial	Nervurada	Radial	0.93	519	max	1.91
	PL9	1380	340	266	1.60	32.1	Industrial	Nervurada	Radial	0.93	516	max	2.04
	PL10	1380	440	343	1.60	33.0	Industrial	Nervurada	Radial	0.82	563	max	2.10
	PL11	1380	260	201	1.60	34.2	Industrial	Nervurada	Radial	0.23	592	in	1.25
	P12	1380	260	201	1.60	34.6	Industrial	Nervurada	Radial	0.47	592	in	1.73
Ferreira <i>et al.</i> (2014)	C2	1124	360	140	1.52	46.9	Artesanal	Nervurada	Radial	0.50	535	in	1.62
	C3	1124	450	142	1.49	48.9	Artesanal	Nervurada	Radial	0.42	535	in	1.63
	C4	1124	360	140	1.52	47.9	Artesanal	Nervurada	Cruciforme	0.94	518	in	1.89
	C5	1124	360	140	2.00	49.7	Artesanal	Nervurada	Radial	0.50	535	in	1.69
	C6	1124	360	143	1.48	48.6	Artesanal	Nervurada	Radial	0.50	535	in	1.76
	C7	1124	360	144	1.47	49.0	Artesanal	Nervurada	Radial	0.62	535	in	1.80
	C8	1124	360	144	1.47	48.1	Artesanal	Nervurada	Radial	0.93	518	in	1.73
	S2	1124	300	143	1.48	49.4	Artesanal	Nervurada	Radial	0.89	518	in	1.80
Gosav <i>et al.</i> (2016)	AG4	1000	300	157	1.25	21.6	Industrial	Nervurada	Radial	0.25	525	in	1.28
	AG5	1000	300	187	1.24	23.8	Industrial	Nervurada	Radial	0.23	525	in	1.33
	AG6	1000	300	217	1.24	22.6	Industrial	Nervurada	Radial	0.22	525	in	1.42

Fonte: Autores, 2026.

Tabela 2 - Resumo das características das lajes que compõem o banco de dados com *Double Headed Studs*.
(Continuação)

Autor	Espécimes	r_q (mm)	C (mm)	d (mm)	ρ_l (%)	f_c (Mpa)	Categoria	Superfície	Arranjo	ρ_w (%)	f_{ysw} (Mpa)	Ruptura	V_u/V_{RC}
Einpaul <i>et al.</i> (2016.1)	PP4	765	260	211	1.49	30.9	Industrial	Nervurada	Radial	0.94	560	max	2.08
	PP5	1120	260	205	1.53	31.5	Industrial	Nervurada	Radial	0.96	560	max	1.88
	PP6	1926	260	203	1.55	32.7	Industrial	Nervurada	Radial	0.96	560	max	1.73
Einpal <i>et al.</i> (2016.2)	PR1	1300	260	210	1.50	31.0	Industrial	Lisa	Radial	1.04	580	max	1.72
	PE1	1300	260	200	1.50	36.0	Industrial	Nervurada	Cruciforme	0.92	500	max	1.98
Furche (2017)	DKA-O	1200	263	250	1.25	29.9	Industrial	Lisa	Radial	0.80	500	max	1.89
	DKA-E	1200	263	250	1.25	31.2	Industrial	Lisa	Radial	0.80	500	max	1.76
Hegger <i>et al.</i> (2017)	JD	1200	263	250	1.25	29.9	Industrial	Nervurada	Radial	0.80	594	max	1.89
	AP01	1200	300	135	1.01	23.3	Industrial	Nervurada	Radial	0.70	594	max	1.77
	AP02	1200	300	135	1.45	41.0	Industrial	Nervurada	Radial	1.01	560	max	1.90
	AP03	1200	350	345	0.95	20.5	Industrial	Nervurada	Radial	0.70	521	max	1.91
	AP04	1200	350	365	0.48	43.2	Industrial	Nervurada	Radial	0.67	521	max	2.23
	AP05	1200	200	255	1.03	29.1	Industrial	Nervurada	Radial	0.94	529	max	1.97
Ricker, <i>et al.</i> (2017)	DUHPC1	1200	300	165	1.90	22.9	Industrial	Nervurada	Radial	0.92	597	max	2.04
Halvoník e Majtanová (2018)	S1-1	1180	180	200	1.57	38.2	Industrial	Nervurada	Radial	1.23	500	max	2.06
	S2-1	1180	180	200	1.57	28.1	Industrial	Nervurada	Radial	1.32	500	max	1.98
Cantone <i>et al.</i> (2019)	PC24	1110	260	209	1.50	37.0	Industrial	Nervurada	Radial	1.35	523	max	2.07
	PC26	765	260	204	1.54	31.9	Industrial	Nervurada	Radial	1.37	523	in	2.53
Landler e Fischer (2021)	M0-25-175-D20	1200	300	186	1.85	40.2	Industrial	Nervurada	Radial	1.51	529.7	in	2.16
Gregusova e Halvonik (2024)	S1-1	1185	200	155	1.62	26.1	Industrial	Nervurada	Radial	1.62	500	in	2.18
	S2-1	1185	300	175	1.44	18.6	Industrial	Nervurada	Radial	1.29	500	in	1.70

Fonte: Autores, 2026.

Tabela 3 - Resumo das características das lajes que compõem o banco de dados com *Studs Rails*.

Autor	Espécimes	r_q (mm)	C (mm)	d (mm)	ρ_l (%)	f_c (Mpa)	Categoria	Superfície	Arranjo	ρ_w (%)	f_{ysw} (Mpa)	Ruptura	V_u/V_{RC}
Mokhtar <i>et al.</i> (1985)	AB3	900	250	116	1.42	23.0	Artesanal	Lisa	Cruciforme	0.72	278	in	1.47
	AB5	900	250	116	1.42	40.0	Artesanal	Lisa	Cruciforme	0.72	278	in	1.31
	AB7	900	250	116	1.42	35.0	Artesanal	Lisa	Cruciforme	0.72	278	in	1.35
Gomes e Andrade (2000)	L-301	1350	200	164	1.40	37.8	Artesanal	Nervurada	Radial	0.60	602	max	1.27
	L-305	1350	200	154	1.40	29.3	Artesanal	Nervurada	Radial	0.82	602	in	1.47
	L-308	1350	200	154	1.30	37.5	Artesanal	Nervurada	Radial	1.27	678	max	1.75
Regan e Samadian (2001)	R2	1445	200	160	1.26	37.6	Industrial	Lisa	Radial	0.58	442	in	1.54
Dam <i>et al.</i> (2017)	S08O	1525	305	220	0.87	34.8	Artesanal	Lisa	Cruciforme	0.47	490	in	1.44
	S08R	1525	305	220	0.87	37.0	Artesanal	Lisa	Radial	0.47	490	in	1.44
	S12O	1526	305	215	1.25	31.1	Artesanal	Lisa	Cruciforme	0.47	490	in	1.42
	S12R	1527	305	215	1.25	33.0	Artesanal	Lisa	Radial	0.47	490	in	1.44
Pereira Filho (2021)	SR1	1125	400	157	2.01	30.4	Industrial	Nervurada	Radial	1.15	509	in	1.88
	SR2	1125	400	160	1.97	29.7	Industrial	Nervurada	Radial	1.17	590	in	1.79
Polo, Bayrak e Hrynyk (2021)	O10	1524	406	216	1.01	28.5	Industrial	Lisa	Cruciforme	0.43	579	in	1.65
	R10	1524	406	216	1.01	25.0	Industrial	Lisa	Radial	0.43	579	in	1.55
	O14	1524	406	213	1.39	21.4	Industrial	Lisa	Cruciforme	0.43	579	in	1.93
	R14	1524	406	213	1.39	27.5	Industrial	Lisa	Radial	0.43	579	in	1.76

Fonte: Autores, 2026.

Tabela 4 - Resumo das características das lajes que compõem o banco de dados com *Double Rails Studs*.

Autor	Espécimes	r_q (mm)	C (mm)	d (mm)	ρ_l (%)	f_c (Mpa)	Categoria	Superfície	Arranjo	ρ_w (%)	f_{ysw} (Mpa)	Ruptura	V_u/V_{RC}
Gomes e Andrade (2000)	L-302	1350	200	164	1.40	34.2	Artesanal	Nervurada	Radial	1.19	602	del	1.25
	L-303	1350	200	154	1.40	42.4	Artesanal	Nervurada	Radial	1.22	602	del	1.55
	L-304	1350	200	164	1.40	36.1	Artesanal	Nervurada	Radial	1.19	602	in	1.48
	L-306	1350	200	164	1.40	37.4	Artesanal	Nervurada	Radial	1.19	602	in	1.46
Vaz, Gomes e Shehata (2009)	L6	825	150	91	1.38	38.9	Artesanal	Nervurada	Cruciforme	0.11	708	in	1.40
	L7	825	150	89	1.38	39.1	Artesanal	Nervurada	Radial	0.22	708	in	1.45
	L8	825	150	90	1.38	39.2	Artesanal	Nervurada	Radial	0.14	708	in	1.45
	L9	825	150	91	1.38	39.4	Artesanal	Nervurada	Radial	0.16	708	in	1.46
Trautwein <i>et al.</i> (2011)	E2	1350	200	159	1.30	36.6	Artesanal	Nervurada	Radial	1.21	575	in	1.64
	I6	1350	200	159	1.30	39.1	Artesanal	Nervurada	Radial	0.32	601	in	1.34
	I7	1350	200	159	1.30	39.6	Artesanal	Nervurada	Radial	0.52	575	in	1.57
	I8	1350	200	159	1.30	35.4	Artesanal	Nervurada	Radial	0.81	615	in	1.43
	I9	1350	200	161	1.30	43.6	Artesanal	Nervurada	Radial	0.15	674	in	1.31
	I10	1350	200	161	1.30	44.4	Artesanal	Nervurada	Radial	0.38	615	in	1.48
	I11	1350	200	161	1.30	41.4	Artesanal	Nervurada	Radial	0.24	601	in	1.47
Trautwein, Gomes e Melo (2013)	1	1350	200	159	1.30	35.8	Artesanal	Nervurada	Radial	1.26	545	max	1.75
	4	1350	200	164	1.30	43.4	Artesanal	Nervurada	Radial	2.04	350	max	1.55
	9	1350	200	154	1.30	39.4	Artesanal	Nervurada	Radial	0.82	377	in	1.57
Ferreira (2023)	L-5-5	1200	150	98	1.73	45.4	Artesanal	Nervurada	Radial	1.82	584	in	1.96
	L-6-5	1200	150	103	1.81	48.9	Artesanal	Nervurada	Radial	1.79	584	in	1.52
	L-5-6	1200	150	101	1.73	44.3	Artesanal	Nervurada	Radial	1.80	584	in	1.62
	L-5-9	1200	150	98	1.65	44.3	Artesanal	Nervurada	Radial	1.82	584	in	1.93
	Lref-AC-I	1200	150	102	1.73	46.5	Artesanal	Nervurada	Radial	0.20	605	in	1.72
	L-5-6-I	1200	150	102	1.73	46.7	Artesanal	Nervurada	Radial	0.20	605	in	1.40
	L-5-9-I	1200	150	102	1.73	47.2	Artesanal	Nervurada	Radial	0.20	605	in	1.48
	L-5-13-I	1200	150	105	1.65	46.4	Artesanal	Nervurada	Radial	0.20	605	in	1.58
Procópio <i>et al.</i> (2024)	L50C	960	150	106	1.58	48.5	Artesanal	Nervurada	Radial	0.30	600	in	1.50
	L63C	960	150	109	1.54	49.9	Artesanal	Nervurada	Radial	0.31	600	in	1.52

Fonte: Autores, 2026.

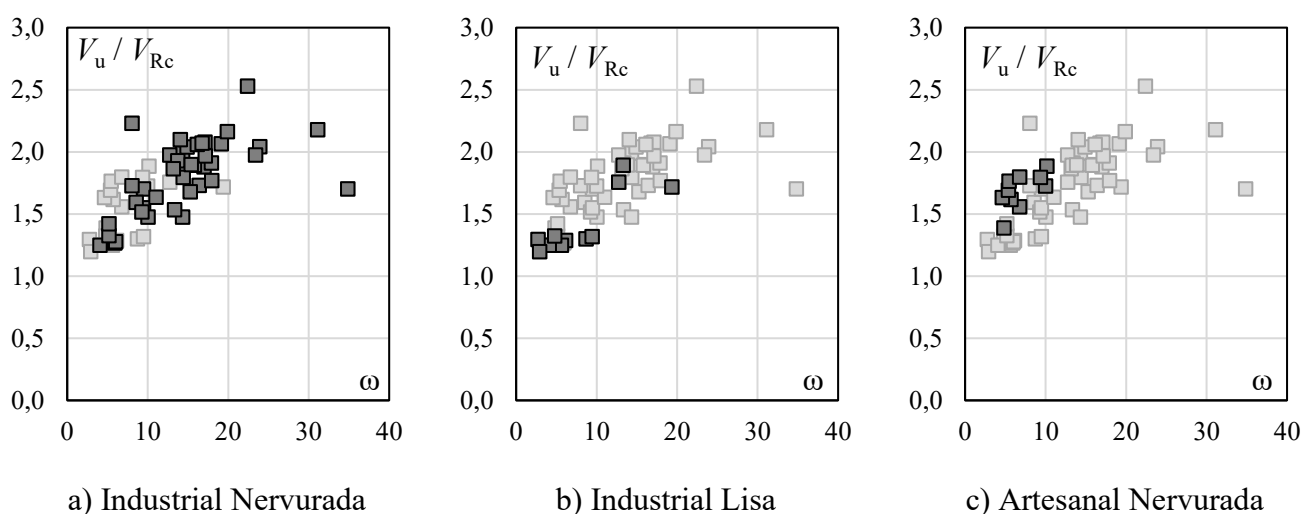
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os resultados obtidos gerou-se gráficos com duas séries de dados para a análise. A primeira série de dados foi gerada como uma nuvem de quadrados brancos com todos os resultados para as lajes com os diferentes tipos de conectores (*double headed stud*, *stud rail* e *double rail stud*) e uma segunda série de dados foi gerada em quadrados cinzas para representar os distintos grupos analisados na pesquisa (industrial-nervurada, industrial-lisa, artesanal-nervurada e artesanal-lisa) de forma a evidenciar os diferentes comportamentos estruturais das lajes do banco de dados em virtude das diferenças construtivas e geométricas das armaduras de cisalhamento.

4.1 Análise da eficiência dos conectores de punção do tipo *double headed stud*

A Figura 7 a seguir apresenta o desempenho das armaduras de cisalhamento com conectores de punção do tipo *double headed stud* para as conexões lajes-pilar contidas no banco de dados.

Figura 7 – Desempenho das conexões laje-pilar com armadura de cisalhamento do tipo *Double Headed Stud*.



Fonte: Autores, 2026.

Em todos os três cenários analisados, constata-se a eficácia da armadura transversal no controle do mecanismo de punção. A correlação positiva entre a taxa mecânica da armadura de cisalhamento (ω) e o fator de incremento de resistência (V_u/V_{Rc}) reflete a mobilização progressiva do aço interseccionando a fissura diagonal. O ganho de capacidade portanto evidencia que o trabalho conjunto dos materiais, postergando a ruptura frágil da laje lisa não armada para estágios de carga significativamente superiores

A Figura 7a apresenta os resultados obtidos para os *double headed stud* com armaduras de cisalhamento industrial-nervurada utilizados por Buetel (2002), Regan (2009), Lips, Ruiz e Muttoni (2012), Gosav (2016), Einpaul *et al.* (2016.1), Einpaul *et al.* (2016.2), Hegger *et al.* (2017), Ricker, Hausler e Handl (2017), Halvonik e Majtanová (2018), Cantone *et al.* (2019), Landler e Fischer (2021) e Gregusova e Halvonik (2024), sendo este o grupo com a maior concentração de dados. Analisando o gráfico, vê-se uma concentração de lajes com uma tendência de crescimento linear que indica o pleno escoamento dos conectores empregados. Contudo, as lajes AP04 de Hegger *et al.* (2017), PC24 de Cantone *et al.* (2019), S1-1 e S2-1 ambas de Gregusova e Halvonik (2024) apresentam-se de forma dispersa no gráfico, denotando a complexidade das variáveis de ensaio, mas não descaracterizam a tendência global do grupo em empurrar a capacidade da laje em direção ao limite de esmagamento das bielas de compressão do concreto. Os resultados sugerem que a sinergia entre a aderência distribuída das nervuradas e a ancoragem mecânica rígida das cabeças forjadas industrialmente permite que a ligação alcance ganhos expressivos, frequentemente ultrapassando o dobro da resistência original ($V_u/V_{Rc} > 2.0$) em taxas mecânicas elevadas ($\omega > 15$).

Na Figura 7b que avalia os *double headed stud* com armaduras de cisalhamento industrial-lisa utilizados por Brickle e Dilger (2008), Einpaul *et al.* (2016.2) e Furche (2017) observa-se uma concentração de dados na região inferior esquerda do gráfico. Esse confinamento reflete a concepção dessas campanhas experimentais específicas, majoritariamente projetadas com baixas taxas mecânicas ($10 \leq \omega$). Contudo, espécimes com maior taxa de armadura de cisalhamento DKA-E e DKA-O ambas de Furche (2017) e PR1 de Einpaul *et al.* (2016.2) rompeu a barreira de 1,5 de incremento de resistência. Isso demonstra que, mesmo ausente a aderência das nervuras, a presença da cabeça industrial forjada confere ancoragem suficiente para justificar ganhos de resistência estrutural com o aumento da taxa mecânica.

Por fim, a Figura 7c ilustra o desempenho dos *double headed stud* com armaduras de cisalhamento artesanal-nervurada utilizados por Regan e Samadian (2001) e Ferreira *et al.* (2014). Embora todas as lajes contidas no gráfico apresentaram ruptura dentro da região armada a punção, nota-se uma estagnação do incremento de resistência entre 1,5 e 2,0 para taxas mecânicas inferiores a 10. O comportamento deste grupo é fortemente governado pela qualidade da ancoragem. Um caso emblemático é a laje A2 ensaiada por Regan e Samadian (2001), cujo incremento de resistência limitou-se a 1,39 ficando abaixo das demais lajes por possuir uma razão entre o raio de aplicação da carga (r_q) e altura útil (d) superior a 9 o que é prejudicial pois influencia negativamente no comportamento a flexão da laje, provocando uma

abertura excessiva da fissura crítica de cisalhamento, penalizando drasticamente a aderência de soluções artesanais e induzindo o escorregamento prematuro da armadura. Em contrapartida, os espécimes C4 e C8 de Ferreira *et al.* (2014) atingiram taxas mecânicas superiores a 10, impulsionados unicamente pela maior taxa geométrica da armadura de cisalhamento (ρ_w) inserida na ligação.

4.2 Análise da eficiência dos conectores de punção do tipo *stud rail*

Os gráficos da Figura 8 apresentam o desempenho das armaduras de cisalhamento com conectores de punção do tipo *stud rail* para as conexões lajes-pilar contidas no banco de dados e assim como armaduras de cisalhamento com conectores de punção do tipo *double headed stud* e estas também apresentam uma correlação positiva entre a taxa mecânica da armadura de cisalhamento (ω) e o incremento de resistência (V_u/V_{Rc}).

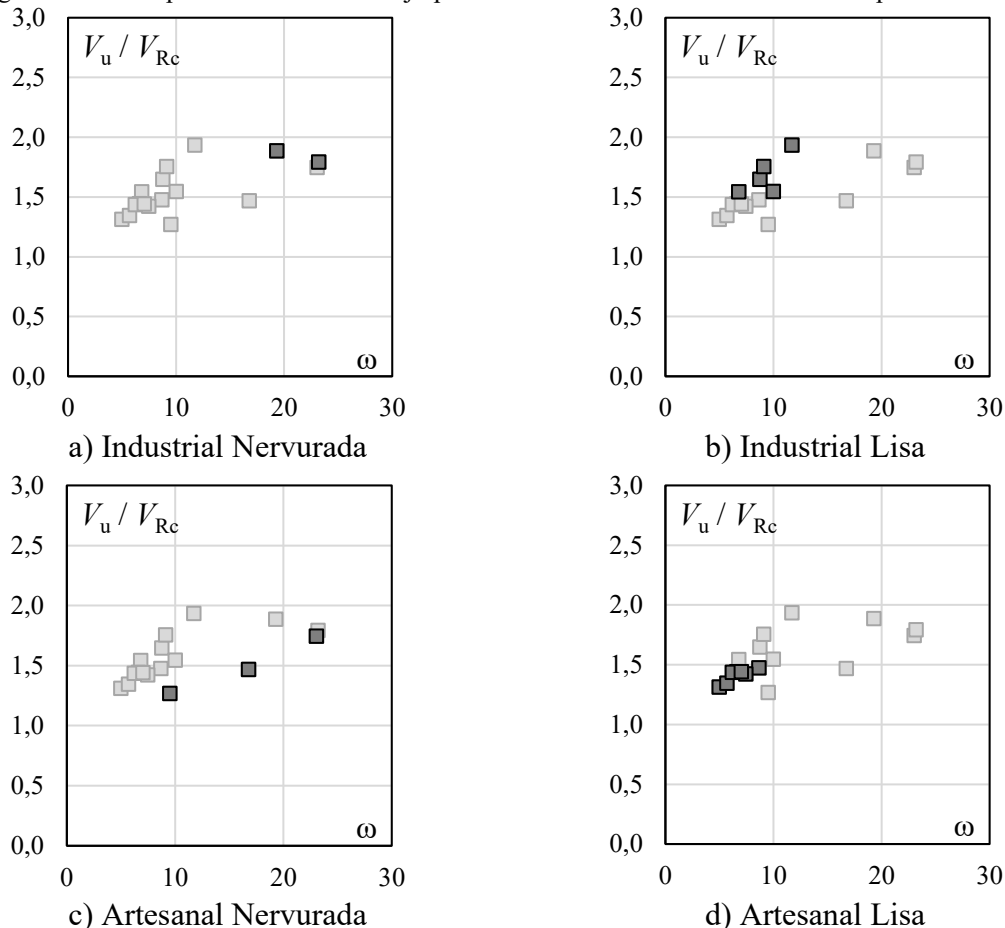
Diferentemente do *double headed stud*, este tipo de armadura de cisalhamento conta com a presença de armaduras de cisalhamento artesanal-lisa e nesse grupo de armadura de cisalhamento não há uma predominância de lajes, possuindo uma quantidade menor de espécimes no banco de dados.

A Figura 8a foca no desempenho das armaduras de cisalhamento industrial-nervurada, contando com apenas dois espécimes: SR1 e SR2 de Pereira Filho (2021). O isolamento dos espécimes revela alta taxas mecânicas ($\omega > 19$) associadas a expressivos incrementos de capacidade portante ($V_u/V_{Rc} \geq 1,8$). Estas lajes por serem do mesmo autor possuem diferenças mínimas entre si, sendo a única diferença considerável o espaçamento radial da face do pilar até o centro do primeiro conector (s_0) e o espaçamento radial entre as camadas de conectores (s_r) que enquanto a laje SR1 variou esses respectivos espaçamentos ($s_0 = 80$ mm, $s_r = 100$ mm) o espécime SR-2 os manteve constante ($s_0 = 60$ mm, $s_r = 60$ mm) o que pode ter influenciado esta diferença de comportamento.

A eficiência da ancoragem em trilhos metálicos consolida-se na Figura 8b, que analisa desempenho das lajes ensaiadas por Regan e Samadian (2001) e Polo, Bayrak e Hrynyk (2021) onde utilizaram armaduras de cisalhamento industriais-lisas. Observa-se uma ascensão de resistência, culminando em incrementos próximos a 2,0, operando com taxas mecânicas notavelmente baixas ($\omega < 12$). Este desempenho atesta que a base contínua do trilho atua como uma ancoragem inferior rígida e irrestrita, compensando integralmente a falta de aderência distribuída das hastes lisas. O travamento mecânico efetivo das fissuras de cisalhamento

permite a plastificação do aço com altíssima eficiência, justificando o crescimento linear da capacidade de carga.

Figura 8 – Desempenho das conexões laje-pilar com armadura de cisalhamento do tipo *Stud Rail*.



Fonte: Autores, 2026.

Um comportamento de crescimento linear também é observado nas armaduras de cisalhamento artesanal-nervurada apresentados na Figura 8c. As lajes L-301, L-305 e L-308 ensaiadas por Gomes e Andrade (2000) possuem as mesmas características geométricas e apresentam uma trajetória de crescimento ditada estritamente pela elevação da taxa geométrica da armadura de cisalhamento (ρ_w) de 0,60, 0,82 e 1,27, respectivamente. A manutenção das demais variáveis geométricas permitiu isolar a correlação mecânica: o incremento contínuo de ρ_w reflete-se na elevação de ω , retardando a propagação da fissura crítica. Embora promova ganhos consistentes de capacidade de carga, nota-se que esta configuração exige taxas mecânicas significativamente superiores às das soluções industriais para atingir patamares de resistência semelhantes.

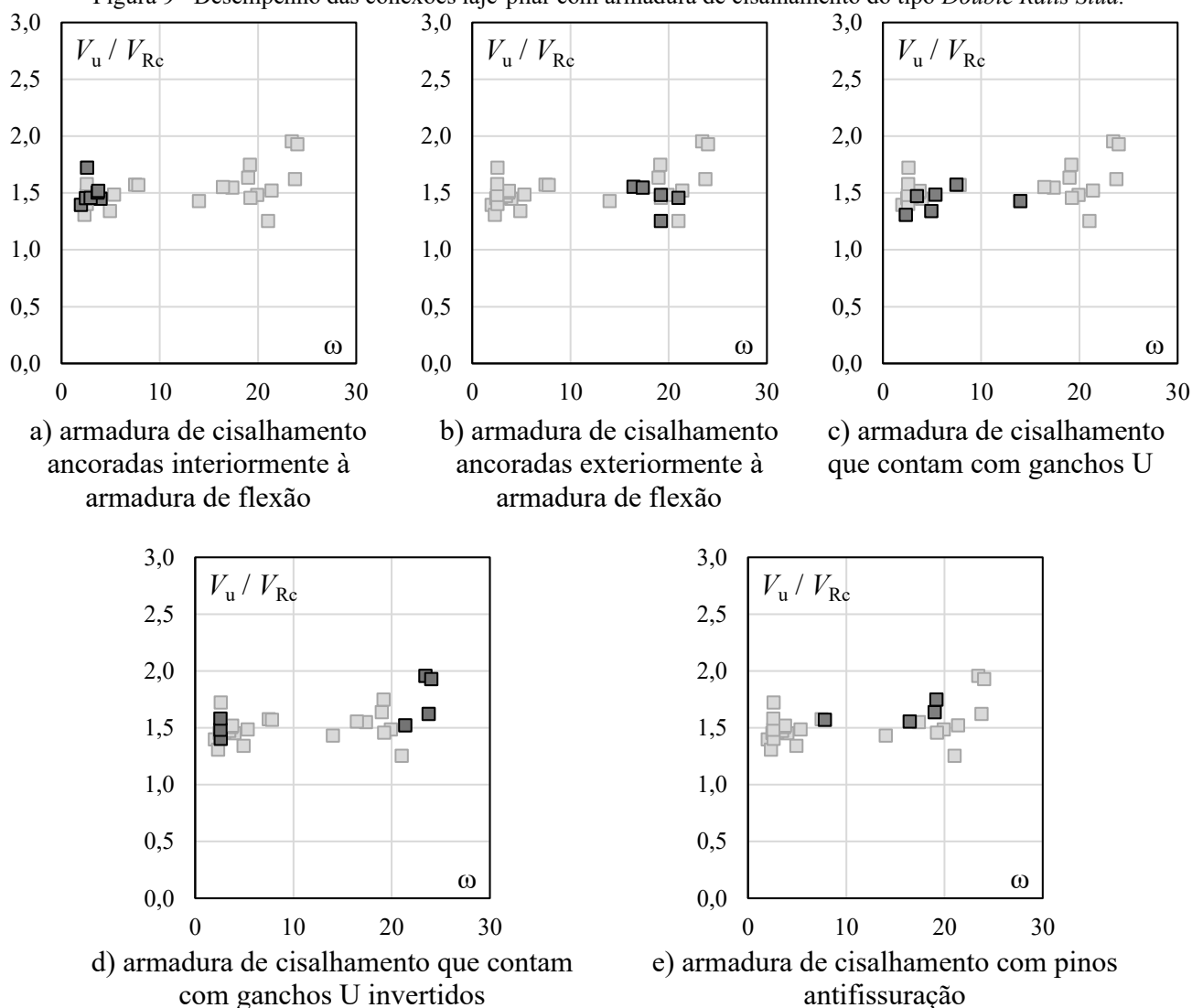
Para as lajes com armaduras de cisalhamento artesanal-lisa na Figura 8d ensaiadas por Mokhtar, Ghali e Dilger (1985) e Dam, Wight e Parra-Montesinos (2017) vê-se um confinamento das lajes na região central a esquerda do domínio ($\omega < 10$), restringindo o incremento de resistência

à faixa de 1,3 a 1,5 A. ausência de nervuras, conjugada à falta do confinamento de extremidade inerente aos trilhos industriais ou cabeças forjadas, precipita o escorregamento dos conectores na matriz cimentícia. O colapso da ligação é governado pela perda de aderência precoce do conector, inviabilizando a mobilização da tensão de escoamento integral do aço e tornando ineficaz a adoção de taxas mecânicas mais robustas nesta tipologia.

4.3 Análise da eficiência dos conectores de punção do tipo *double rail stud*

Para as lajes com conectores do tipo *double rail stud* há apenas o grupo de armaduras de cisalhamento artesanal-nervurada. Tendo isto em vista, a análise dos resultados leva em consideração o posicionamento da armadura de cisalhamento (interna ou externa à armadura de flexão) e os acessórios complementares utilizados nas armaduras (pinos antifissuração, ganchos U e ganchos U invertido). Os resultados estão expressos nos gráficos da Figura 9.

Figura 9– Desempenho das conexões laje-pilar com armadura de cisalhamento do tipo *Double Rails Stud*.



Fonte: Autores, 2026.

As Figuras 9a e 9b analisam a influência do posicionamento da armadura de cisalhamento em relação à armadura longitudinal, fator determinante para a eficácia da ancoragem na zona tracionada da laje. Os gráficos evidenciam uma segregação clara de comportamento, onde os conectores ancorados extremamente à armadura de flexão ensaiadas por Vaz, Gomes e Shehata (2009), Ferreira (2023) e Procópio *et al.* (2024) concentram-se em taxas mecânicas (ω) inferiores a 5,0. Em contrapartida, as lajes com armaduras ancoradas internamente ensaiadas por Gomes e Andrade (2000) operam em taxas mecânicas significativamente superior. Ambos os detalhamentos conseguem mobilizar incrementos de resistência (V_u/V_{Rc}) em torno de 1,5. Contudo, a diferença de comportamento em relação a ω sugere que a ancoragem externa, ao englobar a armadura de flexão, garante o confinamento do nó estrutural mesmo em baixas taxas de armadura transversal. Já a ancoragem interna exige um esforço maior da matriz de concreto para evitar o destacamento do cobrimento, requerendo, portanto, uma taxa mecânica substancialmente maior para atingir o mesmo patamar de ganho de resistência.

As Figuras 9c, 9d e 9e exploram o desempenho para as armaduras de cisalhamento que contam com algum acessório complementar ensaiadas por Trautwein *et al.* (2011), Trautwein, Gomes e Melo (2013) e Ferreira (2023). As armaduras de cisalhamento na Figura 9c atesta o desempenho dos ganchos U na armadura de cisalhamento das lajes ensaiadas por Trautwein *et al.* (2011), apresentando um ganho de resistência moderado e consistente, embora a maior parte dos espécimes opere abaixo de 1,5. No que diz respeito a taxa mecânica apenas a laje I8 também de Trautwein *et al.* (2011) chega a ser superior a 10 alcançando uma taxa mecânica de valor 14, reflexo direto da maior taxa geométrica transversal (ρ_w) adotada na série, demonstrando que o acessório permite a mobilização de maiores quantidades de aço antes do escorregamento da conexão.

A Figura 9d apresenta os resultados para as armaduras de cisalhamento com ganchos U invertido ensaiadas por Ferreira (2023). Observa-se uma polarização entre espécimes pois as lajes L-5-6-I, L-5-9-I e L-5-13-I não chegam a uma taxa mecânica de 2,6, enquanto as lajes L-5-5, L-6-5, L-5-6 e L-5-9 têm uma taxa mecânica superior a 20 alcançando um incremento de resistência superiores a 1,5. Esta dispersão extrema evidencia a sensibilidade deste detalhamento à interação geométrica específica com o cone de punção: a inversão do gancho pode modificar a frente de fissuração, exigindo altas taxas de armadura para engrenar efetivamente a biela de compressão.

Por fim, a Figura 9e apresenta os resultados para as armaduras de cisalhamento com pinos antifissuração, contando com quatro espécimes: E2 de ensaiada por Trautwein *et al.* (2011), 1, 4 e 9 ensaiadas por Trautwein, Gomes e Melo (2013). Todos os espécimes desta configuração registraram incrementos de resistência superiores a 1,5, demonstrando alta eficácia no travamento mecânico das fissuras diagonais e inibindo a ruptura prematura por perda de aderência. Com exceção da laje 9, limitada por sua menor taxa de armadura ($\rho_w < 10$), os demais elementos superaram $\omega = 15$, consolidando esta solução como a mais eficiente entre as alternativas de acessórios complementares analisadas para o aproveitamento integral da capacidade resistente dos conectores.

5 CONCLUSÃO

A análise comparativa do desempenho de diferentes sistemas de reforço ao puncionamento, fundamentada em um robusto banco de dados experimental, permitiu identificar correlações críticas entre a geometria do conector, o processo de fabricação e o incremento de resistência (V_w/V_{RC}). Com base nos resultados expostos, conclui-se que as armaduras industrializadas possuem uma eficiência superior. Os conectores do tipo *Double Headed Stud* (Industrial) demonstraram a maior eficiência absoluta, alcançando incrementos de resistência superiores a 2,5. A forja industrial das cabeças garante uma ancoragem mecânica superior, mitigando o escorregamento prematuro e permitindo que a armadura atinja elevadas taxas de plastificação antes da falha.

O presente trabalho conseguiu evidenciar a influência da rugosidade superficial. A aderência entre o aço e o concreto mostrou-se um fator determinante, especialmente nos modelos de fabricação artesanal. Pinos com superfície nervurada apresentaram um desempenho mais consistente e menor dispersão de resultados em comparação aos pinos lisos, evidenciando que a rugosidade compensa parcialmente eventuais deficiências na rigidez da ancoragem de extremidade.

- Os conectores industrializados apresentaram melhor desempenho e maior incremento de resistência à punção.
- Os conectores do tipo *Double Headed Stud* mostraram-se os mais eficientes entre os sistemas analisados.
- A rugosidade das barras contribuiu significativamente para o aumento da aderência e da capacidade resistente.
- O aumento da taxa de armadura de cisalhamento proporcionou maiores resistências e um comportamento mais dúctil das ligações.
- Os resultados indicam a necessidade de critérios normativos específicos para diferentes tipos de conectores.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar ensaios experimentais com conectores artesanais produzidos por diferentes métodos de fabricação;
- Avaliar o comportamento das ligações sob carregamentos excêntricos e cíclicos;
- Desenvolver modelos numéricos e propostas de dimensionamento para conectores artesanais.

Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2011.
- BEUTEL, Rüdiger Richard Kurt. *Durchstanzen schubbewehrter Flachdecken im Bereich von Innenstützen*. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2002.
- BIRKLE, G.; DILGER, W. H. Influence of slab thickness on punching shear strength. *ACI Structural Journal*, Farmington Hills, v. 105, n. 2, p. 180–188, 2008.
- BROMS, C. E. Ductility of flat plates: Comparison of shear reinforcement systems. In: *ACI Structural Journal*. 2007.
- CANTONE, R.; RUIZ, M. F.; BUJNAK, J.; MUTTONI, A. Enhancing punching strength and deformation capacity of flat slabs. *ACI Structural Journal*, v. 116, n. 5, p. 261–274, 2019.
- COSTA, M. G.; NASCIMENTO, A. J. C.; PEREIRA FILHO, M. J. M.; LIMA NETO, A. F.; FERREIRA, M. P.; MELO, G. S. S. D. A. Avaliação da influência da ancoragem da armadura de cisalhamento em lajes lisas de concreto armado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 62., 2020. *Anais...* São Paulo: IBRACON, 2020.
- DAM, T. X.; WIGHT, J. K.; PARRA-MONTESINOS, G. J. Behavior of monotonically loaded slab-column connections reinforced with shear studs. *ACI Structural Journal*, v. 114, p. 221–232, 2017.
- 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*, v. 113, p. 827–838, 2016a.
- EINPAUL, J.; BUJNAK, J.; RUIZ, M. F.; MUTTONI, A. Study on influence of column size and slab slenderness on punching strength. *ACI Structural Journal*, v. 113, n. 1, 2016b.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1992-1-1:2004: Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1992-1-1:2023 – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2023.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 1992-1-1:2023: Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Brussels: CEN, 2024.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (fib). *Fib Model Code for Concrete Structures 2020*. Berlin: Ernst & Sohn, 2024.

FERREIRA, D. B. *Punção em lajes lisas de concreto armado com armadura de cisalhamento interna*. 2023. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Estruturas, Campinas.

FURCHE, J.; SIBURG, C.; BAUERMEISTER, U. Highly effective lattice punching shear reinforcement. In: *ACI Special Publication*, v. 321, p. 1–12, 2017.

GOSAV, A. V.; KISS, Z. I.; ONET, T.; BOMPA, C. V. Failure assessment of flat slab-to-column members. *Magazine of Concrete Research*, 2015.

GREGUSOVA, K.; HALVONIK, J. Punching shear resistance of reinforced concrete slabs. *Engineering Structures*, Amsterdam, v. 323, p. 119219, 2025. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.119219.

HALVONIK, J.; MAJTANOVÁ, L. Experimental investigation of the maximum punching resistance of slab-column connections. *Slovak Journal of Civil Engineering*, v. 26, n. 3, p. 22–28, 2018.

HEGGER, J.; SHERIF, A. G.; KUERES, D.; SIBURG, C. Efficiency of various punching shear reinforcement systems for flat slabs. In: *ACI Structural Journal*. 2017.

Landler, J.; Fischer, O. *Durchstanztragverhalten stahlfaserverstärkter Flachdecken mit Durchstanzbewehrung*. Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 5, S. 348–359. 2021. <https://doi.org/10.1002/best.202000102>

LIPS, S.; FERNÁNDEZ RUIZ, M.; MUTTONI, A. Experimental investigation on punching strength and deformation capacity of shear-reinforced slabs. *ACI Structural Journal*, Farmington Hills, v. 109, n. 6, p. 889–900, 2012.

MOKHTAR, A. S.; GHALI, A.; DILGER, W. Stud Shear reinforcement for flat concrete plates. *ACI Journal*, p. 676–683, 1985.

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

PEREIRA FILHO, M. J. M. *Resistência à punção de lajes lisas armadas ao cisalhamento com estribos treliçados pré-fabricados*. 2021. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília. Brasília.

POLO, G. E.; BAYRAK, O.; HRYNYK, T. D. Shear-resisting performance of reinforced concrete flat plates with different headed stud layouts. *ACI Structural Journal*, Farmington Hills, v. 118, n. 1, p. 1–14, 2021.

PROCÓPIO, H. B.; MARQUES, M. G.; LIBERATI, E. A. P.; TRAUTWEIN, L. M. Experimental study on the shear reinforcement contribution to punching shear resistance in flat slabs. *Structural Concrete*, v. 26, n. 4, p. 4962–4980, 2024.

REGAN, P. E.; SAMADIAN, F. Shear reinforcement against punching in reinforced concrete flat slabs. *The Structural Engineer*, v. 79, n. 10, p. 24–31, 2001.

REGAN, P. E. Report on test of reinforced concrete flat slabs with double headed studs. Comunicação Pessoal. 2009.

RICKER, M.; HAUSLER, F.; RANDL, N. Punching strength of flat plates reinforced with UHPC and double-headed studs. *Engineering Structures*, v. 136, p. 345–354, 2017.

TRAUTWEIN, L. M.; BITTENCOURT, T. N.; GOMES, R. B.; BELLA, J. C. D. Punching strength of flat slabs with unbraced shear reinforcement. In: *ACI Structural Journal*. 2011.

TRAUTWEIN, L. M.; GOMES, R. B.; MELO, G. S. S. A. Puncionamento em lajes planas de concreto armado com armadura de cisalhamento interna. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 7, n 1, p. 38-49. 2013.

VAZ, A. P. R.; GOMES, R. B.; SHEHATA, L. C. D. Estudo sobre armadura mínima de cisalhamento de lajes-cogumelo de concreto armado. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 2, n. 1, p. 1–24, 2009.