



**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DE LAJES LISAS DE
CONCRETO ARMADO COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE
CONCRETO**

Ma. IANA INGRID ROCHA DAMASCENO PUCCINI

TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DE LAJES LISAS DE
CONCRETO ARMADO COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE
CONCRETO

Ma. IANA INGRID ROCHA DAMASCENO PUCCINI

ORIENTADOR: DR. MARCOS HONORATO DE OLIVEIRA
COORIENTADOR: DR. MAURÍCIO DE PINA FERREIRA

TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

BRASÍLIA/DF – DEZEMBRO/2024

Ma. IANA INGRID ROCHA DAMASCENO PUCCINI

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DE LAJES LISAS DE
CONCRETO ARMADO COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE
CONCRETO

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE
DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcos Honorato de Oliveira, Dr. (UnB)
(Orientador)

Prof. Dr. Maurício de Pina Ferreira
(Coorientador)

Prof. Dr. Rodrigo de Melo Lameiras
(Examinador interno)

Prof. Dr. António Pinho Ramos
(Examinador externo)

Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein
(Examinador externo)

Brasília/DF
Dezembro/2024

Ao meu filho João Vicente, por ter me trazido de volta à vida.

**“Findo mágoa, mano, sou mais que essa merda (bem mais)
Corpo, mente, alma, um, tipo Ayurveda
Estilo água, eu corro no meio das pedra
Na trama, tudo os drama turvo, eu sou um dramaturgo
Conclama a se afastar da lama enquanto inflama o mundo
Sem melodrama, busco grana, isso é hosana em curso
Capulanas, catanas, buscar Nirvana é o recurso
É um mundo cão pra nós, perder não é opção, certo?
De onde o vento faz a curva brota o papo reto
Num deixo quieto, não tem como deixar quieto
A meta é deixar sem chão quem riu de nós sem teto”
(Emicida)**

AGRADECIMENTOS

A Deus que me mostrou o caminho e me deu forças e resiliência para atingir o objetivo final.

Aos meus orientadores, professor Marcos Honorato de Oliveira e professor Maurício de Pina Ferreira por todo conhecimento, disponibilidade, incentivo e paciência.

Ao professor e amigo Manoel Mangabeira Pereira Filho, por todo tempo dedicado e pelo conhecimento compartilhado e construído ao longo desses anos.

Ao professor e amigo Aarão Ferreira de Lima Neto, que ao longo de tantos anos foi meu mentor profissional e grande incentivador.

Aos meus pais Cristina e Damião, por todo amor, paciência e por fazerem dos meus planos os seus. Aos meus irmãos Ísis e Dam por serem meus maiores parceiros nessa vida.

Aos meus amigos, que transformaram os momentos de desespero em paz e me apoiaram incondicionalmente. Ao meu marido, Rodolfo Puccini por toda paciência, amor e companheirismo. Ao meu filho João Vicente, que me mostrou a face do amor verdadeiro e reacendeu no meu coração a coragem e a vontade de viver. À minha família, por todo apoio e incentivo.

Aos amigos do NÚMEA: Layse Furtado, Rodrigo Fernandes, Mayara Costa, Jedson Abrantes, Alex Nascimento e Karoline Dantas, vocês foram essenciais durante toda a jornada. A amizade, o companheirismo e os momentos de descontração jamais serão esquecidos.

Aos colegas da UFPA/CAMTUC: Lana Guta, Francirene Bonfim, Jayron Ribeiro, Shara Portilho, Mayara Sousa, Paulo Ramos e Fellype Santos, o apoio de vocês foi fundamental para o sucesso deste trabalho.

Aos funcionários dos Laboratórios de Engenharia Civil da UFPA, que auxiliaram no desenvolvimento e possibilitaram a realização da produção dos agregados reciclados e dos ensaios experimentais desta pesquisa.

Aos professores Luciana Cordeiro e Paulo Sérgio Souza, pela orientação que possibilitou a compreensão adequada do comportamento mecânico e microestrutural dos materiais aplicados nesta pesquisa.

Ao professor Rodrigo Rodrigues e à Totalmix Controle Tecnológico, pela disponibilidade e doação dos materiais para a produção dos agregados reciclados.

À TREJOR – Soluções Metálicas, Polimix Concreto – Belém, Supermix Concretos e MPA Engenharia e Controle Tecnológico, pela doação de materiais para esta pesquisa.

Ao PECC, à UnB, à UFPA e à Unifesspa, pelo apoio técnico e financeiro para a realização desta pesquisa.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, estiveram comigo ao longo desta caminhada e tornaram possível a conclusão de mais esta etapa da minha vida.

RESUMO

A crescente preocupação ambiental tem impulsionado a adoção de materiais alternativos na construção civil, setor que consome grandes quantidades de recursos naturais não renováveis. A utilização de agregados reciclados de concreto (ARCO) surge como uma solução eficiente, promovendo a reintegração de resíduos de construção e demolição (RCD) no ciclo produtivo e reduzindo a quantidade de resíduos destinados aos aterros sanitários. Pesquisas realizadas ao redor do mundo têm investigado as propriedades mecânicas do ARCO e seu impacto no comportamento estrutural.

Este estudo avaliou o desempenho de 10 modelos de ligação laje-pilar submetidos a carregamento simétrico, divididos em duas séries. A primeira consistiu em 6 modelos sem armaduras de cisalhamento, com variação na taxa de armadura de flexão (0,7% e 1,2%) e no teor de ARCO (0%, 30% e 100%). A segunda série incluiu 4 modelos com armaduras de cisalhamento, mantendo a taxa de armadura de flexão de 1,2% e variando o tipo de armadura de cisalhamento (conector tipo “stud” e estribo tipo “single leg”) e o teor de ARCO (0% e 100%). Todos os modelos foram ensaiados no Laboratório de Estruturas da Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí.

Os resultados experimentais analisaram deslocamentos verticais, deformações do concreto, do aço e das armaduras de cisalhamento, carga última, fissuração e modo de ruptura. Esses dados foram comparados com os métodos teóricos estabelecidos pelas normas ACI 318 (2019), Eurocode 2 (2014), ABNT NBR 6118 (2014) e *fib* Model Code 2010 (2013).

Os resultados indicaram que a substituição de agregados naturais por ARCO teve impacto mínimo nas propriedades do concreto, como trabalhabilidade, resistência à compressão e fissuração, além de não alterar significativamente a resistência à punção das lajes. A rigidez das lajes também não foi substancialmente afetada, com variações observadas relacionadas à qualidade dos agregados reciclados. As comparações com as normas de projeto (ABNT NBR 6118, 2014; ACI 318, 2019; Eurocode 2, 2014) e com o *fib* Model Code 2010 (2013) demonstraram que a resistência à punção das lajes foi mantida. Contudo, é necessário realizar mais testes em escala real para avaliar uma gama maior de variáveis.

Palavras-chave: punção, lajes lisas, ARCO

ABSTRACT

The growing environmental concern has driven the adoption of alternative materials in the construction industry, a sector that consumes large amounts of non-renewable resources. The use of recycled concrete aggregates (RCA) has emerged as an effective solution, promoting the reintegration of construction and demolition waste (CDW) into the production cycle and reducing the amount of waste sent to landfill. Research worldwide has investigated the mechanical properties of RCA and its impact on structural behaviour.

This study evaluated the performance of 10 slab-column connection models subjected to symmetrical loading, divided into two series. The first series consisted of 6 models without shear reinforcement, varying two main characteristics: the bending reinforcement ratio (0.7% and 1.2%) and the RCA content (0%, 30%, and 100%). The second series included 4 models with shear reinforcement, maintaining the bending reinforcement ratio at 1.2%, and varying the type of shear reinforcement (stud connector and single-leg stirrup) and the RCA content (0% and 100%). All models were tested at the Structural Laboratory of the Federal University of Pará – Tucuruí Campus.

The experimental results analyzed vertical displacements, concrete and steel strain, shear reinforcement, ultimate load, cracking, surface behavior, and failure mode. These data were compared with theoretical methods established by the ACI 318 (2019), Eurocode 2 (2014), ABNT NBR 6118 (2014), and *fib* Model Code 2010 (2013).

The results indicated that replacing natural aggregates with RCA had minimal impact on concrete properties, such as workability, compressive strength, and cracking, as well as no significant effect on the punching shear resistance of the slabs. The rigidity of the slabs was also not substantially affected, with variations observed related to the quality of the recycled aggregates. Comparisons with design codes (NBR 6118, 2014; ACI 318, 2019; Eurocode 2, 2014) and the *fib* Model Code 2010 (2013) showed that the punching shear resistance of the slabs was maintained, but further full-scale tests are needed to evaluate a broader range of variable.

Keywords: punching, flat slabs, RCA

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO.....	17
1.2	OBJETIVOS.....	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos.....	19
1.3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	19
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	ASPECTOS GERAIS SOBRE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO .	22
2.1.1	Características do ARCO	24
2.1.2	Resistência à compressão	25
2.1.3	Resistência a tração e módulo de elasticidade	26
2.1.4	Resistência ao cisalhamento.....	27
2.2	ASPECTOS GERAIS SOBRE PUNÇÃO EM LAJES LISAS.....	27
2.2.1	Padrão de fissuração e formação da fissura de punção	28
2.2.2	Fatores que influenciam na resistência à punção	30
2.2.3	Armaduras de cisalhamento	34
2.3	PRESCRIÇÕES NORMATIVAS PARA DIMENSIONAMENTO À PUNÇÃO....	36
2.3.1	ABNT NBR 6118 (2014)	36

2.3.2	ACI 318 (2019)	37
2.3.3	Eurocode 2 (2014)	39
2.3.4	<i>fib</i> Model Code 2010 (2013)	41
2.3.5	Modelo teórico de cálculo para determinação da resistência à flexão das lajes.	43
2.4	PESQUISAS RELACIONADAS	46
2.4.1	Rao <i>et al.</i> (2012)	48
2.4.2	Reis <i>et al.</i> (2015)	49
2.4.3	Francesconi <i>et al.</i> (2016)	51
2.4.4	Mahmoud <i>et al.</i> (2018)	53
2.4.5	Sahoo e Singh (2020)	54
2.4.6	Xiao <i>et. al</i> (2019)	56
2.4.7	Leelatanon <i>et al.</i> (2020)	57
2.4.8	Saadoon <i>et al.</i> (2022)	59
2.4.9	Análise dos estudos prévios sobre o uso de ARCO	60
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	61
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	61
3.2	CARACTERÍSTICAS DAS LAJES	61
3.3	ARMADURAS DE FLEXÃO	64
3.4	ARMADURAS DE CISALHAMENTO	66
3.5	INSTRUMENTAÇÃO	67

3.5.1	Deslocamentos verticais	67
3.5.2	Deformações nas armaduras de flexão e na superfície do concreto.....	68
3.5.3	Deformações nas armaduras de cisalhamento da 2ª Série.....	70
3.6	CONCRETO.....	71
3.6.1	Agregados Naturais	71
3.6.2	Agregados Reciclados	71
3.6.3	Cimento	73
3.6.4	Dosagem e quantidade de materiais	73
3.6.5	Método de produção do concreto	75
3.7	SISTEMA DE ENSAIO	76
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	78
4.1	MATERIAIS	78
4.1.1	Concreto	78
4.1.2	Aço	82
4.2	SÉRIE 1	82
4.2.1	Deslocamentos verticais	82
4.2.2	Deformações no aço e no concreto	84
4.2.3	Padrão de fissuração.....	87
4.3	SÉRIE 2	90
4.3.1	Deslocamentos verticais	90

4.3.2	Deformações nas armaduras de flexão e no concreto	93
4.3.3	Deformações nas armaduras de cisalhamento.....	97
4.3.4	Padrão de fissuração.....	99
4.4	ESTIMATIVAS NORMATIVAS.....	102
4.4.1	Série 1.....	102
4.4.2	Série 2.....	105
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	107
5.1	BANCO DE DADOS DE LAJES SEM ARMADURAS DE CISALHAMENTO.	107
5.1.1	Considerações Gerais	107
5.1.2	Análise Comparativa Dos Resultados Experimentais e Recomendações Normativas	109
5.1.3	Influência de d na Relação $V_u/V_{RC,teo}$	110
5.1.4	Influência de ρ na Relação $V_u/V_{RC,teo}$	111
5.1.5	Influência de r_q/d na Relação $V_u/V_{RC,teo}$	112
5.1.6	Influência de u_0/d na Relação $V_u/V_{RC,teo}$	113
5.2	BANCO DE DADOS DE LAJES COM ARMADURAS DE CISALHAMENTO	115
5.2.1	Considerações Gerais	115
5.2.2	Desempenho as Armaduras De Cisalhamento	118
5.2.3	Desempenho das equações das normas nas estimativas de resistência à punção em lajes armadas ao cisalhamento	119

5.2.4	Análise da precisão das normas na estimativa de resistência à punção para lajes com concreto convencional e com ARCO	122
6	CONCLUSÕES.....	125
6.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	125
6.2	ANÁLISES DAS RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS.....	126
6.3	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	127
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Lajes em concreto armado – (a) sistema estrutural em lajes lisas; (b) Ruptura na ligação laje-pilar (adaptado de Brantschen, 2016)	16
Figura 2.1 - Seção de uma matriz de concreto com agregado reciclado (adaptado de Pamplona, 2018).....	22
Figura 2.2 – Distribuição de esforços no sistema de lajes lisas (adaptado de Eder, 2011).....	28
Figura 2.3 – Padrão de fissuração da laje P22 de Mueller <i>et al.</i> (1984)	29
Figura 2.4 – Desenvolvimento da fissuração em lajes lisas com armadura de cisalhamento (adaptado de Brantschen, 2016).....	30
Figura 2.5 - Intensidade dos mecanismos de resistência à punção (Pereira Filho, 2016).....	31
Figura 2.6 – Fluxo e distribuição das tensões de cisalhamento para diferentes tamanhos e geometria do pilar (Einpaul <i>et al.</i> , 2016)	33
Figura 2.7 – Tipo de armaduras de cisalhamento. (Pereira, 2016).....	34
Figura 2.8 – Tipo de armaduras de cisalhamento (continuação) (Pereira, 2016).....	35
Figura 2.9 – Tipos de arranjos das armaduras de cisalhamento	35
Figura 2.10 – Perímetro de controle em pilares internos de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014).	36
Figura 2.11 – Perímetro de controle segundo o ACI 318 (Pereira Filho, 2021)	37
Figura 2.12 - Perímetro de controle segundo o Eurocode 2 (Pereira Filho, 2021).	39
Figura 2.13 – Perímetro de controle segundo <i>fib</i> Model Code 2010 (2013) (Pereira Filho, 2021).	41
Figura 2.14 – Distribuição das linhas de ruptura para as lajes deste trabalho.....	45

Figura 2.15 – Comparativo $V_u/V_{Teo} \times h_{mín}$ de lajes lisas sem armadura de cisalhamento com agregado natural e com agregado reciclado.	47
Figura 2.16 – Comparativo $V_u/V_{Teo} \times h_{mín}$ de lajes lisas sem armadura de cisalhamento com agregado natural e com agregado reciclado	47
Figura 2.17 - Geometria geral dos modelos - vista superior e seção.	49
Figura 2.18 – Características dos modelos e sistema de ensaio	51
Figura 2.19 – Características das lajes e sistema de ensaio	53
Figura 2.20 – (a) Geometria das lajes ensaiadas e (b) sistema de ensaio (adaptado).....	55
Figura 2.21 – Características das lajes ensaiadas e sistema de ensaio	56
Figura 2.22 – Dimensões das lajes ensaiadas – adaptado de Leelatanon <i>et al.</i> (2022).....	57
Figura 2.23 – Detalhes dos modelos ensaiados por Saadon <i>et al.</i> (2022)	59
Figura 3.1 –Geometria das lajes	62
Figura 3.2 – Detalhamento da armadura de flexão - 1ª Série.....	65
Figura 3.3 – Detalhamento da armadura de flexão - 2ª Série.....	65
Figura 3.4 – Detalhamento das armaduras de cisalhamento	66
Figura 3.5 – Detalhe das armaduras de cisalhamento instaladas	66
Figura 3.6 – Distribuição das armaduras de cisalhamento.....	67
Figura 3.7 - Posicionamento dos LVDT's	68
Figura 3.8 – Instrumentação das lajes – Série 1.....	69
Figura 3.9 – Instrumentação das lajes – Série 2.....	69
Figura 3.10 – Posicionamento da instrumentação de cisalhamento da segunda série.	70

Figura 3.11 – Posicionamento da instrumentação de cisalhamento da segunda série (continuação).....	71
Figura 3.12 – Descarte de corpos de prova de empresas de controle tecnológico do concreto em Belém-Pa.	72
Figura 3.13 – Equipamentos utilizados na produção dos agregados.....	73
Figura 3.14 – Materiais pesados e ensacados para o controle da dosagem.....	74
Figura 3.15 – Ordem tradicional de colocação dos materiais do concreto convencional	75
Figura 3.16 – Ordem de colocação dos materiais do concreto com ARCO.....	76
Figura 3.17 – Sistema de ensaio.....	77
Figura 4.1 – Propriedades do concreto no estado fresco e endurecido – Série 1	80
Figura 4.2 – Propriedades do concreto no estado fresco e endurecido – Série 2	81
Figura 4.3 – Perfil de deslocamento das lajes ensaiadas.....	83
Figura 4.4 – Resposta carga-deslocamento das lajes testadas.....	84
Figura 4.5 – Perfil de deformações nas armaduras de flexão e superfícies do concreto.....	85
Figura 4.6 – Comportamento à flexão da laje S-0,7-0	85
Figura 4.7 – Comportamento à flexão da laje S-0,7-30	86
Figura 4.8 – Comportamento à flexão da laje S-0,7-100	86
Figura 4.9 – Comportamento à flexão da laje S-1,2-0	86
Figura 4.10 – Comportamento à flexão da laje S-1,2-30	87
Figura 4.11 – Comportamento à flexão da laje S-1,2-100	87
Figura 4.12 – Abertura de fissuras das lajes ensaiadas.	88

Figura 4.13 – Mapa de fissuração das lajes com $\rho = 0,7\%$ (Continuação).	89
Figura 4.14 – Mapa de fissuração das lajes com $\rho = 1,2\%$	90
Figura 4.15 - Perfil carga-deslocamento das lajes testadas e lajes de referência (Autora, 2024).	91
Figura 4.16 - Perfil carga-deslocamento das lajes testadas e lajes de referência (continuação) (Autora, 2024).	92
Figura 4.17 – Comportamento carga-deslocamento das lajes testadas (Autora, 2024).	93
Figura 4.18 - Perfis de deformação circunferencial nas barras de flexão.	95
Figura 4.19 – Deformações na armadura tracionada e superfície de concreto da laje SS-1,2-0.	96
Figura 4.20 – Deformações na armadura tracionada e superfície de concreto da laje SS-1,2-100.	96
Figura 4.21 – Deformações na armadura tracionada e superfície de concreto da laje ST-1,2-0.	96
Figura 4.22 – Deformações na armadura tracionada e superfície de concreto da laje ST-1,2-100.	97
Figura 4.23 – Comportamento carga-deformação das lajes testadas.	98
Figura 4.24 – Perfil de deformações de cisalhamento das lajes testadas.	98
Figura 4.25 – Ruptura por arrancamento do cone de concreto, SS-1,2-0.	99
Figura 4.26 – Detalhe do estribo individual após a ruptura da laje.	99
Figura 4.27 – Carga versus abertura de fissura.	100
Figura 4.28 – Mapa de fissuração das lajes (Autora, 2023).	100

Figura 4.29 – Mapa de fissuração das lajes (continuação) (Autora, 2023).....	101
Figura 4.30 – Normalização dos resultados experimentais X normativos.	103
Figura 4.31 – Resultados experimentais x normativos.	104
Figura 5.1 – Análise comparativa dos resultados experimentais e recomendações normativas	110
Figura 5.2 – Influência de d na relação $V_u/V_{RC,teo}$	111
Figura 5.3 – Influência de ρ na relação $V_u/V_{RC,teo}$	112
Figura 5.4 – Influência de r_q/d na relação $V_u/V_{RC,teo}$	113
Figura 5.5 - Influência de u_0/d na relação $V_u/V_{RC,teo}$	114
Figura 5.6 – Armaduras de cisalhamento utilizadas nas análises	116
Figura 5.7 – Desempenho das armaduras de cisalhamento para lajes com concreto convencional e com ARCO	119
Figura 5.8 – Desempenho das equações do ACI 318 (2019) para resistência à punção em lajes armadas ao cisalhamento com concreto convencional e com ARCO	120
Figura 5.9 – Desempenho das equações do EC 2 (2023) para resistência à punção em lajes armadas ao cisalhamento com concreto convencional e com ARCO	121
Figura 5.10 – Desempenho das equações da NBR 6118 (2023) para resistência à punção em lajes armadas ao cisalhamento com concreto convencional e com ARCO.....	121
Figura 5.11 – Desempenho das equações do MC 10 (2023) para resistência à punção em lajes armadas ao cisalhamento com concreto convencional e com ARCO	122
Figura 5.12 - Análise da precisão do ACI 318 (2019) na estimativa de resistência à punção de lajes com concreto convencional e com ARCO.....	123

Figura 5.13 - Análise da precisão do EC2 (2019) na estimativa de resistência à punção de lajes com concreto convencional e com ARCO	123
Figura 5.14 - Análise da precisão do NBR 6118 (2023) na estimativa de resistência à punção de lajes com concreto convencional e com ARCO	124
Figura 5.15 - Análise da precisão do MC10 (2023) na estimativa de resistência à punção de lajes com concreto convencional e com ARCO.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1– Pesquisas realizadas com agregados reciclados de concreto.....	18
Tabela 2.1 – Considerações de algumas normas internacionais para agregados reciclados (adaptado de Tam <i>et al.</i> ,2017).....	23
Tabela 2.2 –Resultados experimentais	48
Tabela 2.3 - Características das lajes ensaiadas (adaptado)	50
Tabela 2.4 – Resultados experimentais e teóricos (adaptado)	52
Tabela 2.5 – Resultados experimentais e teóricos (adaptado)	54
Tabela 2.6 – Resultados experimentais e analíticos (adaptado).....	55
Tabela 2.7 – Resultados experimentais e analíticos. (adaptado).....	57
Tabela 2.8 – Resultados experimentais e analíticos (adaptado).....	58
Tabela 3.1 – Nomenclatura das lajes.....	62
Tabela 3.2 – Resumo das características das lajes	63
Tabela 3.3 – Resultado dos ensaios de caracterização dos agregados.	74
Tabela 3.4 – Quantidade de materiais por m ³ para cada série de ensaio.....	75
Tabela 4.1 – Propriedades do concreto – Série 1	79
Tabela 4.2 – Propriedades do concreto – Série 2	80
Tabela 4.3 – Resumo das propriedades mecânicas do aço.....	82
Tabela 4.4 – Resumo dos resultados experimentais e previsões normativas	105
Tabela 4.5 - Resumo dos resultados experimentais e previsões normativas.....	106

Tabela 5.1 - Características das lajes do banco de dados.....	108
Tabela 5.2 - Características das lajes do banco de dados das lajes lisas com ARCO	109
Tabela 5.3 – Resumo das características das lajes do banco de dados armadas com conectores de aço adaptado de Pereira Filho (2021).	117
Tabela 5.4 – Resumo das características das lajes do banco de dados armadas com estribos bem ancorados nas barras de flexão adaptado de Pereira Filho (2021).	118

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	taxa de armadura
ρ	taxa de armadura
ρ_w	taxa de armadura de cisalhamento
ρ_x	taxa de armadura de flexão na direção x
ρ_y	taxa de armadura de flexão na direção y
$\emptyset_f$	diâmetro das barras das armaduras de flexão
$\emptyset_w$	diâmetro das barras das armaduras de cisalhamento
α	ângulo de inclinação da armadura de cisalhamento
$\Delta_{RC,28}$	variação das propriedades mecânicas do concreto reciclado em relação ao concreto de referência
ε_c	deformação do concreto
ε_{ys}	deformação da armadura
λ_c	coeficiente de segurança do concreto
ψ	ângulo de rotação da laje
a	maior dimensão do pilar
a	agregado miúdo
a/c	relação água/cimento
A_{sw}	área de aço da armadura de cisalhamento
b	menor dimensão do pilar.
c	cimento
C	componente de Compressão

C	tamanho do pilar
d	altura útil
d_g	diâmetro máximo do agregado
E_c	módulo de elasticidade do concreto
f_c	Resistência a compressão do concreto
f_{ct}	Resistência à tração do concreto
f_y	tensão de escoamento da armadura
f_{yw}	tensão de escoamento da armadura de cisalhamento
G_f	energia de fratura
k	parâmetro que considera o efeito de escala
k_{dg}	parâmetro que considera os esforços transmitidos pela rugosidade da superfície da fissura
m	massa unitária
m_R	momento resistente da laje
m_S	momento solicitante da laje
P_{cr}	carga da primeira fissura
r/r_q	razão entre o raio da laje e o raio de carregamento
r_q	raio de carregamento das lajes
k_ψ	parâmetro relacionado a rotação da laje
S_0	espaçamento entre a face do pilar e a primeira camada
s_r	espaçamento entre os perímetros de armadura de cisalhamento;
S_r	espaçamento entre camadas das armaduras de cisalhamento

T	componente de tração
u_0	perímetro do pilar
u_1	perímetro de controle afastado a $2d$ das faces do pilar
u_{out}	perímetro de controle afastado $d/2$ da região das armaduras de cisalhamento
V	carga
V_a	componente referente ao engrenamento dos agregados
V_{cy}	resistência da região íntegra do concreto
V_d	componente de resistência referente ao efeito pino
V_{flex}	carga de ruptura das lajes
v_{min}	é a tensão resistente mínima para o caso de taxas de armadura de flexão muito baixas
V_R	carga resistente
$V_{R,teo}$	resistências previstas nas normas
V_{Rcs}	resistência à punção de lajes lisas com a superfície de ruptura cruzando as camadas das armaduras de cisalhamento
p	agregado graúdo
$V_{Rcs,ACI}$	resistência à punção de lajes lisas com a superfície de ruptura cruzando as camadas das armaduras de cisalhamento determinada pelo ACI 318 (2019)
$V_{Rcs,EC2}$	resistência à punção de lajes lisas com a superfície de ruptura cruzando as camadas das armaduras de cisalhamento determinada pelo Eurocode 2 (2014)
$V_{Rcs,NBR}$	resistência à punção de lajes lisas com a superfície de ruptura cruzando as camadas das armaduras de cisalhamento determinada pelo ABNT NBR 6118 (2014)

$V_{Rmax,ACI}$	resistência à punção de lajes lisas com esmagamento do concreto adjacente ao pilar determinada pelo ACI 318 (2019)
$V_{Rmax,EC2}$	resistência à punção de lajes lisas com esmagamento do concreto adjacente ao pilar determinada pelo Eurocode 2 (2014)
$V_{Rmax,NBR}$	resistência à punção de lajes lisas com esmagamento do concreto adjacente ao pilar determinada pelo ABNT NBR 6118 (2014)
V_{Rmax}	resistência à punção de lajes lisas com esmagamento do concreto adjacente ao pilar
$V_{Rout,ACI}$	resistência à punção de lajes lisas com superfície de ruptura fora da região das armaduras de cisalhamento determinada pelo ACI 318 (2019)
$V_{Rout,EC2}$	resistência à punção de lajes lisas com superfície de ruptura fora da região das armaduras de cisalhamento determinada pelo Eurocode 2 (2014)
$V_{Rout,NBR}$	resistência à punção de lajes lisas com superfície de ruptura fora da região das armaduras de cisalhamento determinada pelo ABNT NBR 6118 (2014)
V_{Rout}	resistência à punção de lajes lisas com superfície de ruptura fora da região das armaduras de cisalhamento
V_S	carga solicitante
V_S	carga solicitante
V_u	carga última
w	abertura de fissuras
v	fator de redução da eficiência da resistência à compressão do concreto da biela
AN	agregado natural
ARCO e RCA	agregados reciclados de concreto
CR	concreto reciclado
EBR	reforço colado externamente
EBROG	reforço colado externamente em sulcos

EER	extensômetros elétricos de resistência
ELS	estado Limite Serviço
ELU	estado limite de último
FLEX	lajes com ruptura por flexão
IN	lajes com ruptura por tração diagonal cruzando as armaduras de cisalhamento
L	vão entre os pilares
LACEM	laboratório de Análise de Estruturas e Materiais
LVDT	<i>linear variable differential transformer</i>
MAX	lajes com ruptura por esmagamento diagonal adjacente ao pilar
MEV	microscopia eletrônica por varredura
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRFC	polímero reforçado com <i>fib</i> ra de carbono
PUN	ruptura em lajes sem armadura de cisalhamento por tração diagonal
RAC	concreto com agregado reciclado
RCD e CDW	resíduos de construção e demolição
S	proveniente do termo em inglês “ <i>slab</i> ”
SS	para os modelos com conectores de aço do tipo “ <i>double headed studs</i> ”
ST	para as lajes com estribo individual do tipo “ <i>single leg</i> ”
ZTI	zona de transição interfacial

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é responsável pelo uso excessivo de matérias primas naturais e pela geração de cerca de 40% dos resíduos sólidos gerados a nível mundial (van Stijn; Gruis, 2020)). A economia linear tradicional conhecida como padrão “pegar-fazer-descartar”, onde os recursos são extraídos, utilizados para fabricar produtos e depois descartados como resíduos ((Ellen MacArthur Foundation, 2015; Ogunmakinde; Egbelakin; Sher, 2022) é amplamente adotada pelo setor da construção. Nesse contexto, os efeitos colaterais causados podem ser minimizados pela adoção de práticas ambientalmente sustentáveis (Marino; Pariso, 2020). A sustentabilidade econômica pode ser promovida através da economia circular baseada na abordagem sistêmica de retenção, recuperação e reutilização de materiais visando minimizar o desperdício e reduzir o consumo de recursos naturais (Akhimien; Latif; Hou, 2021; Amarasinghe; Hong; Stewart, 2024; KanTERS, 2020). Desse modo diversos estudos vêm sendo desenvolvidos para avaliar estratégias afim de minimizar o desperdício na construção (Ajayi *et al.*, 2015; López Ruiz; Roca Ramón; Gassó Domingo, 2020; Ogunmakinde; Egbelakin; Sher, 2022).

No entanto, existe uma lacuna notável na compreensão e investigação relativamente aos critérios necessários para avaliar a circularidade dos materiais na construção civil. A redução de resíduos baseia-se na minimização da geração de resíduos durante a construção, em contrapartida, as práticas de circularidade material adotam uma abordagem mais abrangente, visando projetar produtos e edifícios que se encaixem em um ciclo contínuo de utilização e recuperação (KanTERS, 2020). Ambas as abordagens contribuem para aumentar a sustentabilidade no setor da construção. Nesse contexto, a produção de agregados reciclados de concreto (ARCO) através da britagem e peneiramento de elementos de concreto é uma das principais alternativas de reinserção de resíduos de construção e demolição (RCD) no ciclo produtivo da construção civil, uma vez que o concreto é um dos principais constituintes do RCD.

O ARCO pode ser utilizado em diversas aplicações tanto estruturais como não estruturais, porém sua utilização em concretos estruturais requer atenção especial em função da influência desse material nas propriedades mecânicas do concreto (Amorim; Brito; Evangelista, 2012; Kwan *et al.*, 2012; Manuel Gómez-Soberón, 2002; Matias *et al.*, 2013; Poon; Shui; Lam, 2004). Diversos estudos investigaram o efeito do ARCO na resistência à compressão do concreto (f_c)

(Amorim; Brito; Evangelista, 2012; Evangelista; de Brito, 2010; Kou; Poon; Chan, 2008; Kwan *et al.*, 2012; Manuel Gómez-Soberón, 2002; Matias *et al.*, 2013; Poon; Shui; Lam, 2004; Xiao; Li; Zhang, 2005). Estes estudos verificaram que o aumento da relação água/cimento (a/c), que pode ser necessário devido à maior porosidade do ARCO, pode diminuir a f_c , mas o ajuste no traço pode evitar este problema. Pacheco et al. (2019) observou que a diminuição do módulo de elasticidade do concreto (E_c) é mais significativa do que a da f_c , uma vez que a rigidez dos agregados tem um impacto considerável no E_c , enquanto a f_c é influenciada pelas propriedades da pasta de cimento. Adicionalmente, Pacheco et al. (2019) salienta que a inclusão do ARCO aumenta a porosidade, que é intrínseca ao concreto reciclado (CR) e provoca uma diminuição da rigidez do material e, conseqüentemente, do E_c . A literatura sugere que o efeito da incorporação de ARCO na resistência à tração do concreto (f_{ct}) é relativamente pequeno Ettxeberria; Marí; Vázquez, 2007; Malešev; Radonjanin; Marinković, 2010; Pacheco et al., 2019; Soares et al., 2014).

A substituição de agregados naturais por ARCO e seus efeitos no comportamento estrutural e na resistência dos elementos de concreto armado vêm sendo amplamente estudados, demandando esforços científicos significativos (Gu *et al.*, 2024; Oad *et al.*, 2018; Pradhan; Kumar; Barai, 2018; Seara-Paz *et al.*, 2018; Trindade *et al.*, 2023; Yan *et al.*, 2018). O comportamento e a resistência à punção em ligações laje-pilar em lajes lisas de concreto armado com ARCO foram também objeto de estudo de trabalhos realizados por (Francesconi; Pani; Stochino, 2016; Leelatanon *et al.*, 2022; Mahmoud; El tony; Saeed, 2018; Rao; Reddy; Ghorpade, 2012; Reis *et al.*, 2015; Saadoon; Mashrei; Al Oumari, 2022; Sahoo; Singh, 2020; Xiao *et al.*, 2019).

Especialmente em ligações laje-pilar, a fragilidade do ARCO pode ter um impacto negativo na resistência à punção, afetando o módulo de elasticidade (E_c) e o engrenamento dos agregados. Diversos modelos teóricos foram propostos para estimar a resistência à punção, alguns dos quais consideram explicitamente o papel dos agregados (Classen; Kalus, 2023; Kueres; Hegger, 2018; Muttoni A, 2008), enquanto outros relacionam a resistência à punção com a resposta à flexão do elemento (Broms, 1990; Classen; Kalus, 2023; Kinnunen; Nylander, 1960; Kueres; Hegger, 2018; Muttoni A, 2008; Shehata, 1990).

Os estudos realizados por (Mahmoud; El tony; Saeed, 2018; Reis *et al.*, 2015; Xiao *et al.*, 2019) demonstraram que a substituição de agregados naturais (AN) por ARCO é capaz de reduzir a

rigidez à flexão das lajes ensaiadas. Nos ensaios realizados por (Mahmoud; El tony; Saeed, 2018; Rao; Reddy; Ghorpade, 2012; Reis *et al.*, 2015; Saadoon; Mashrei; Al Oumari, 2022) as lajes apresentaram uma redução na carga de fissuração devido à incorporação do ARCO. A redução da resistência à punção foi indicada pelos ensaios realizados por (Francesconi; Pani; Stochino, 2016; Leelatanon *et al.*, 2022; Mahmoud; El tony; Saeed, 2018; Rao; Reddy; Ghorpade, 2012; Reis *et al.*, 2015; Saadoon; Mashrei; Al Oumari, 2022; Xiao; Li; Zhang, 2005), seguida das reduções de f_c , f_{ct} e E_c . Por outro lado, nos ensaios apresentados por Sahoo e Singh (2020), não foi observada diferença na resistência à punção, nem nas propriedades mecânicas do concreto com ARCO quando comparados os resultados com o concreto de referência com AN. É importante ressaltar que os ensaios disponíveis na literatura foram realizados com modelos com dimensões pequenas e não são representativos com as dimensões reais das ligações laje-pilar em edifícios de lajes planas.

O sistema de lajes lisas, é um sistema estrutural consolidado ao redor do mundo e que vem se popularizando no Brasil. Neste sistema construtivo as lajes são apoiadas diretamente nos pilares gerando tensões na ligação laje-pilar que podem provocar uma ruptura por cisalhamento bidirecional, conhecida como punção. A Figura 1.1 apresenta um sistema de lajes lisas e a ruptura por punção. A punção também pode ocorrer em outros elementos estruturais, como sapatas, blocos de coroamento de estacas, radiers e placas em geral com carga pontual.

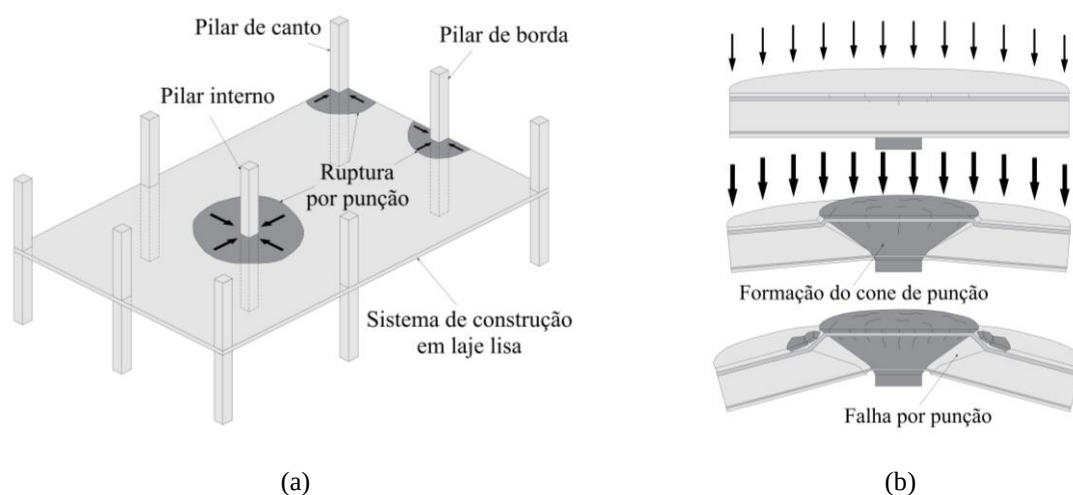


Figura 1.1 – Lajes em concreto armado – (a) sistema estrutural em lajes lisas; (b) Ruptura na ligação laje-pilar (adaptado de Brantschen, 2016)

A ruptura por punção ocorre de modo frágil e pode ocasionar acidentes graves e colapso progressivo da edificação. A ruptura ocorre por cisalhamento na ligação laje-pilar com a

formação de um tronco de cone ao redor do pilar, que causa o desligamento deste elemento com a laje em função das elevadas tensões de flexão e cisalhamento. Diversos parâmetros contribuem na resistência à punção como: a geometria do pilar, a espessura da laje, a resistência à compressão do concreto (f_c), a taxa de armadura de flexão e o tipo e diâmetro dos agregados graúdos. No entanto, a forma mais eficiente de evitar esse tipo de ruptura é com a utilização de armaduras de cisalhamento. Os modelos normativos recomendam que, para garantir a eficácia dessas armaduras, seja realizada a ancoragem total, envolvendo as armaduras de flexão comprimidas e tracionadas ou parcial, no caso de conectores, garantindo somente o alinhamento com as barras de flexão.

Atualmente as normas para se determinar a capacidade resistente de lajes lisas são restritas à determinados tipos de armaduras de punção, como estribos e conectores e não apresentam considerações sobre possíveis variações nos tipos de armaduras de cisalhamento e formas de ancoragem. A utilização de armaduras de cisalhamento desconectadas das armaduras de flexão vem sendo cada vez mais difundida afim de melhorar a produtividade e facilitar a montagem das armaduras (Lima *et al.*, 2020). Nesse sentido autores como (Park *et al.*, 2007; Caldentey *et al.*, 2013; Furche *et al.*, 2017; Ferreira *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2022;), desenvolveram pesquisas com armaduras de cisalhamento desconectadas das armaduras de flexão com desempenho semelhante aos apresentados por armaduras com a ancoragem conectadas. Vale ressaltar, que os projetos com armaduras desconectadas devem apresentar detalhamento adequado afim de evitar ruptura por delaminação como as ocorridas nas pesquisas de (Regan e Samadian, 2001; Hassan *et al.*, 2015; Broms, 2019).

1.1 MOTIVAÇÃO

Esta pesquisa é relevante e atual para a comunidade científica internacional, pois apesar dos avanços que as pesquisas sobre punção trouxeram, se faz necessário ajustar as normas, nacional e internacionais, quanto à utilização de agregados reciclados de concreto no projeto de estruturas de concreto armado. Diversos estudos sobre agregado reciclado de concreto vêm sendo realizados pois sua variabilidade ainda é uma incógnita, uma vez que não se entende como as características físicas e mecânicas influenciam na capacidade resistente de elementos estruturais com eles produzidos. O desconhecimento desses fatores torna a sua utilização complexa, uma vez que não se sabe o que deve ser controlado e nem como controlar. A Tabela

1.1 apresenta um resumo de alguns trabalhos que abordam o comportamento de elementos estruturais e não estruturais com agregados reciclados de concreto.

Tabela 1.1– Pesquisas realizadas com agregados reciclados de concreto

Autor	Ano	País	Tipo de Elemento
Santos	2018	Brasil	Blocos
Cardoso	2018	Brasil	Vigas
Pamplona	2018	Brasil	Blocos de concreto
Yan <i>et al.</i>	2018	China	Pilares
Oad <i>et al.</i>	2018	Paquistão	Vigas
Pradhan <i>et al.</i>	2018	Índia	Vigas
Seara-Paz <i>et al.</i>	2018	Espanha	Vigas
Pedro <i>et al.</i>	2017	Portugal	Corpos-de-prova cilíndricos
Omary <i>et al.</i>	2017	França	Corpos-de-prova cilíndricos
García-González <i>et al.</i>	2017	Portugal	Blocos
DeBrito <i>et al.</i>	2016	Portugal	Pórtico com vigas e pilares
Ceia <i>et al.</i>	2016	Portugal	Pilares
Silva <i>et al.</i>	2016	Portugal	Vigas
Silva <i>et al.</i>	2015	Portugal	Corpos-de-prova cilíndricos
Zhang e Zhao	2015	China	Blocos
Pacheco <i>et al.</i>	2015	Portugal	Pórtico com vigas e pilares
Pedro <i>et al.</i>	2014	Portugal	Blocos
Brito e Alves	2010	Portugal	Corpos-de-prova cilíndricos
Rao <i>et al.</i>	2012	Índia	Lajes
Reis <i>et al.</i>	2015	Portugal	Lajes
Francesconi <i>et al.</i>	2016	Itália	Lajes
Mahmoud <i>et al.</i>	2018	Egito	Lajes
Xiao <i>et al.</i>	2019	China	Lajes
Sahoo e Singh	2020	Índia	Lajes
Elsayed <i>et al.</i>	2021	Egito	Lajes
Leelatanon <i>et al.</i>	2022	Tailândia	Lajes
Saadon <i>et al.</i>	2022	Iraque	Lajes

Há ainda a necessidade de mais pesquisas experimentais que levem a uma melhor compreensão do comportamento de estruturas de concreto armado com a utilização de agregado reciclado de concreto, sobretudo trabalhos acerca da punção com agregado reciclado em escalas maiores e o presente estudo pretende dar sua contribuição nesse sentido.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Como objetivo geral este trabalho busca avaliar o efeito da substituição de agregados naturais por agregados graúdos reciclados de concreto (ARCO) no comportamento e na resistência à punção de lajes lisas de concreto armado.

1.2.2 Objetivos Específicos

De modo específico este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a influência do teor de ARCO nos deslocamentos verticais e na fissuração na de ligações laje -pilar sem armadura de cisalhamento.
- Observar a redução da resistência à punção com a inserção de ARCO.
- Influência do aumento da taxa de armadura de flexão na resistência à punção de lajes lisas sem armadura de cisalhamento com ARCO.
- Verificar a resistência máxima à punção de lajes lisas com e sem armadura de cisalhamento com ARCO.
- Verificar a resistência máxima de ligações laje pilar com ARCO e com armadura de cisalhamento em cruz com conectores e com estribos do tipo *single leg*;
- Avaliar a segurança da utilização de ARCO em lajes lisas com e sem armadura de cisalhamento.
- Comparar os resultados desses ensaios com os critérios de dimensionamento à punção, segundo as prescrições normativas ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2019), Eurocode 2 (2014) e *fib* Model Code 2010 (2013);
- Avaliar se os modelos teóricos apresentam previsões seguras na estimativa da capacidade resistente à punção das lajes lisas com ARCO mesmo sem nenhuma consideração sobre agregados reciclados.

1.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta tese é composto pela moldagem e ensaios de 10 lajes lisas de concreto armado, com pilar interno e carregamento simétrico, no Laboratório de Estruturas e Materiais (LACEM – UFPA/CAMTUC). As lajes foram divididas em duas séries. A primeira

série foi composta por seis lajes lisas sem armadura de cisalhamento e teve o objetivo de avaliar o comportamento de lajes lisas com substituição de agregado natural (AN) por agregados reciclados de concreto (ARCO) em teores de 0%, 30% e 100%. Nesta série foram utilizadas duas taxas de armadura de flexão, 0,7% e 1,2% e sem armadura de cisalhamento. A segunda série teve o objetivo de avaliar o comportamento de quatro lajes lisas com armadura de cisalhamento configurada em forma de cruz. Foram utilizados dois tipos de armadura de cisalhamento, conectores de aço e estribos individuais do tipo *single leg*. Nesta série, as lajes apresentaram taxa de armadura de flexão de 1,2% e dois teores de substituição de AN por ARCO, 0% e 100%.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A tese é composta por seis capítulos mais as referências bibliográficas conforme descritos sucintamente a seguir.

O *capítulo 1* apresenta uma introdução do trabalho, englobando a justificativa e objetivos.

O *capítulo 2* é composto pela revisão bibliográfica que se inicia explanando sobre os aspectos gerais dos agregados reciclados de concreto seguido por uma análise sobre punção em lajes lisas, adentrando diretamente no comportamento de lajes lisas com e sem armadura de punção. Em seguida é apresentada uma revisão normativa, evidenciando-se o processo de cálculo proposto pelas normas NBR 6118 (2014), ACI 318 (2019), Eurocode 2 (2004) e o código *fib* Model Code (2013).

No *capítulo 3* é descrito o programa experimental dos ensaios realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LACEM – UFPA/CAMTUC), sendo descritos os modelos e variáveis estudadas, a instrumentação adotada, os parâmetros de produção do concreto convencional e reciclado e o sistema de ensaio adotado. Os modelos experimentais apresentados neste capítulo também fazem parte dos trabalhos de mestrado de Jayron Ribeiro Júnior (Ribeiro Junior, 2022) e Shara Portilho (Portilho, 2023).

O *capítulo 4* contém os resultados experimentais obtidos com os ensaios e uma análise comparativa dos mesmos. Dentre esses resultados estão as deformações nas armaduras de flexão e de punção, as deformações do concreto e os deslocamentos verticais das lajes. Com base nos resultados e nos mapas de fissuração apresentados é descrito o modo de ruptura das lajes. Neste capítulo também são apresentadas as propriedades mecânicas dos materiais utilizados para a confecção das lajes. Os

modelos experimentais apresentados neste capítulo também fazem parte dos trabalhos de mestrado de Jayron Ribeiro Júnior (Ribeiro Junior, 2022) e Shara Portilho (Portilho, 2023).

No *capítulo 5* é apresentada a análise dos resultados experimentais deste trabalho comparados ao banco de dados produzidos por Pereira Filho (2016) para as lajes lisas sem armadura de cisalhamento e para as lajes com armadura de cisalhamento foi utilizado o banco de dados produzidos por Pereira Filho (2021).

O *capítulo 6* apresenta as considerações finais do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

Buck (1977) alega que o início do uso do ARCO é marcado pelo fim da Segunda Guerra Mundial, quando houve demolição excessiva de edifícios e estradas e como consequência uma alta necessidade de se descartar os resíduos e reconstruir a Europa. Segundo Behera *et al.* (2014), é considerado agregado reciclado de concreto (ARCO), o material tipicamente processado pelo esmagamento de concreto já existente ou antigo.

Tal processo de produção do material acarreta no desenvolvimento de fissuras no agregado final, tornando os agregados mais fracos e mais suscetíveis à permeabilidade, difusão e absorção de fluidos (Olongo e Padayachee, 2002). Quanto à forma e estrutura das partículas destes agregados, Behera *et al.* (2014) descreve-as sendo de superfície rugosa, de formas irregulares, devido a presença da antiga argamassa aderida.

Olongo e Padayachee (2002) relatam ainda sobre a presença de uma antiga zona de transição interfacial (ZTI), devido à argamassa ou pasta de cimento antiga aderida na superfície dos ARCO. Esta zona de transição é de natureza fraca, em razão das fissuras desenvolvidas dentro do agregado no processo de esmagamento, por conta da presença de pequenos poros na argamassa.

Essas ZTI's funcionam como ponte de transferência de tensão entre a matriz da argamassa e as partículas de agregado graúdo. Mesmo quando esses componentes são de alta rigidez, a rigidez do concreto pode ser afetada devido a rupturas nessas pontes, isto é, vazios e microfissuras na zona de transição interfacial que não permitem transferência de tensão. A Figura 2.1 apresenta o posicionamento das ZTI's dos ARCO.

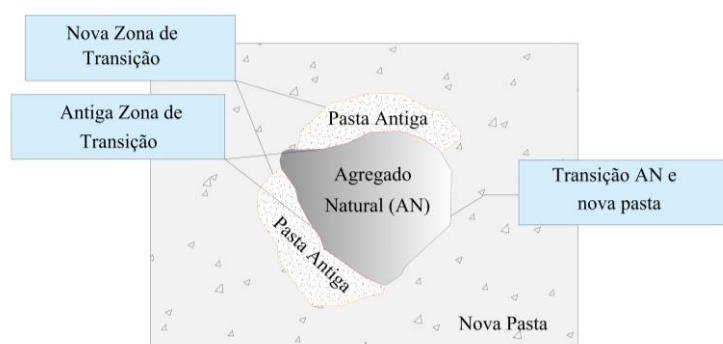


Figura 2.1 - Seção de uma matriz de concreto com agregado reciclado (adaptado de Pamplona, 2018)

Segundo Tam *et al.* (2018), a popularização da utilização de agregados reciclados é justificada pelo aumento da geração de resíduos sólidos e esgotamento dos recursos naturais em consequência das operações das sociedades industrializadas que apresentam crescimento econômico e populacional. Dantata (2005), Tam *et al.* (2006) e Duran *et al.* (2006) afirmam que os altos impostos sobre agregados naturais é um dos principais fatores entre muitos influenciando aplicações com agregados reciclados, incluindo políticas e condições nacionais; no entanto, o motivo para agregação tributária é o desejo de incentivar o uso de alternativas e material reciclado. Essa popularização ao redor do mundo vem se confirmando e nesse contexto algumas normas internacionais foram atualizadas ou produzidas com o intuito de viabilizar e padronizar o uso desse material.

Algumas normas coletadas e comparadas por Tam *et al.* (2018) de vários países em todo mundo e a norma brasileira sobre a utilização de agregados reciclados e suas aplicações construtivas são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Considerações de algumas normas internacionais para agregados reciclados (adaptado de Tam *et al.*, 2017)

Continente/ País/Província	Condições De Aplicação	% de ARCO	Limitações	Norma
Oceania				
Austrália	$f_{c,28} = 25 \text{ MPa}$ $f_{c,28} = 40 \text{ MPa}$	≤ 100 ≤ 30	Diâmetro do agregado gráudo (4 – 32 mm)	AS 1141.6.2
Asia				
Hong Kong	Agregado reciclado de concreto pré saturado $f_{c,28 \text{ min}} = 20 \text{ MPa}$	≤ 20 - Concreto estrutural ≤ 100 - Concreto não estrutural	Agregado gráudo para concreto estrutural e não estrutural	CS-3:2013 HKBD 2009 WBTC-12: 2002
Japão	Agregados gráudos reciclados de concreto	Não especificado	Estruturas com f_{ck} até 45 MPa	JIS A 5021 JIS A 5022 JIS A 5023
Europa				
Bélgica	Agregados gráudos reciclados de concreto Concreto classe C 30/37	Não especificado	Não permite agregado miúdo reciclado	PTV 406-2003 NEN EN 12620: 2013 NBN B 11-255 DIN 4226-100: 2002
Alemanha	Agregados reciclados de concreto	Classe até 25 MPa – ≤ 35 Classe até 35 MPa – ≤ 25	Pode ser usado em concreto estrutural	DIN 12620: 2015/pr EN12620:2015 DafStb-2010
Espanha	40 MPa (f_c)	≤ 20	Não permitido em concreto protendido	UNE EN 12620:2003 EHE 08-2000
Brasil	Classe I e II de agressividade	≤ 20	-	NBR 15116

No Brasil, em 2021, foram coletadas mais de 48 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD), representando um aumento de 2,9% em relação ao ano anterior, conforme dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe, 2022). Apesar da vigência da Lei 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), parte desses resíduos ainda é descartada de forma inadequada, ocasionando prejuízos ambientais e socioeconômicos.

Em 2022, a gestão de resíduos sólidos no país avançou com os Decretos nº 10.936/2022, que atualizou a regulamentação da PNRS, e nº 11.043/2022, que instituiu o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, estabelecendo metas para os próximos 20 anos. A composição dos RCD varia de acordo com as características das obras, sendo mais comuns materiais como brita, areia, concreto, argamassa, cerâmicas, madeira, papelão, metais e plástico. Esses resíduos, em sua maioria inertes, são classificados conforme as Resoluções CONAMA nº 307 (2002), pertencendo à classe A de resíduos recicláveis, que inclui agregados, tijolos, blocos, telhas, argamassa, concreto, areia e pedra.

Com a publicação da resolução que classificou os resíduos sólidos no Brasil em 2002, os agregados reciclados passaram a ser utilizados exclusivamente em pavimentação e concreto sem função estrutural, conforme normatizado pelas ABNT NBR 15113, 15114, 15115 e 15116 (todas de 2004). No entanto, uma atualização da NBR 15116, publicada em 2021, permitiu o uso de agregados reciclados de concreto em concretos estruturais, com até 20% de substituição da massa de agregados totais, e em concretos das classes de agressividade I e II, conforme a norma de Projetos de Estruturas de Concreto (NBR 6118, 2014). Além disso, a norma definiu a nomenclatura padrão para agregados reciclados de concreto, denominados ARCO.

2.1.1 Características do ARCO

Os agregados reciclados de concreto (ARCO) são produzidos a partir de elementos de concreto triturados, compostos por agregados naturais (AN) e uma camada de argamassa aderida. Segundo Yoshikane (1988) e Tabsh *et al.* (2009), essa camada é responsável pela redução das propriedades mecânicas do material. De Juan *et al.* (2009) e Pedro *et al.* (2014) atribuem essa redução ao aumento da rugosidade, porosidade e absorção de água do ARCO em comparação ao AN. O concreto produzido com ARCO, devido à sua maior capacidade de absorção de água, exige um aumento na relação água/cimento para garantir sua trabalhabilidade.

Outras características relevantes do ARCO incluem sua baixa densidade e resistência reduzida à fragmentação. Kisku *et al.* (2017) afirmam que a qualidade do concreto está diretamente ligada à qualidade do agregado utilizado. Assim, a análise das propriedades mecânicas do ARCO torna-se fundamental, bem como a investigação das propriedades do concreto que deu origem a esses agregados. Os autores também destacam que a proporção de ARCO na mistura precisa ser cuidadosamente avaliada, uma vez que há carência de diretrizes específicas para a dosagem desse material.

Thomas *et al.* (2016) relatam que a inclusão de 20% de ARCO na mistura de concreto não comprometeu a resistência mecânica. Por sua vez, Corinaldesi (2010) indica que, para concretos com resistência entre 30 e 40 MPa, uma substituição de até 30% por ARCO é adequada para preservar propriedades como resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade.

2.1.2 Resistência à compressão

De forma geral, diversas pesquisas indicam que o aumento do teor de substituição de agregados naturais (AN) por agregados reciclados de concreto (ARCO) está diretamente relacionado à redução da resistência à compressão do concreto. A resistência à compressão é considerada a propriedade mais importante no estado endurecido do concreto, influenciando diretamente a resistência última dos elementos estruturais e sua durabilidade. Esse parâmetro está associado a fatores como a relação água/cimento, as propriedades do ARCO, as características da argamassa aderida e o processo de produção do concreto.

Para concretos com 100% de ARCO, estudos como os de Rahal (2007) relatam uma redução de até 9% na resistência à compressão em comparação aos concretos produzidos com AN. Uma análise experimental realizada por Behera *et al.* (2014) apontou uma diminuição de até 30%, enquanto Butler *et al.* (2011) registrou reduções entre 12% e 25%. Por outro lado, Bairagi *et al.* (1993) relatou quedas de até 60%, atribuindo esse comportamento anômalo à heterogeneidade dos agregados reciclados, conforme também destacado por Etxeberria *et al.* (2007).

Outro aspecto amplamente investigado é a influência da relação água/cimento (a/c). Assim como em concretos com AN, os concretos produzidos com ARCO também apresentam redução na resistência à compressão com o aumento dessa relação, como apontado por Khan (1984) e Ravindrajah *et al.* (1988). Ravindrajah *et al.* (1988) enfatizam que, quanto menor a relação a/c ,

maior é a diferença na resistência à compressão entre concretos com AN e ARCO. Khan (1984) observou que o concreto com ARCO requer uma relação a/c 0,05 a 0,1 menor que o concreto com AN, comportamento atribuído à formação de uma zona de transição interfacial (ZTI) mais fraca devido à baixa disponibilidade de água entre a argamassa e os agregados antigos. Essa ZTI torna-se o elo mais fraco, atuando como fator determinante para a falha do concreto.

2.1.3 Resistência a tração e módulo de elasticidade

De maneira análoga, a resistência à tração do concreto com ARCO é influenciada pela quantidade, tamanho, tipo e qualidade de ARCO. A mesma diminui com o aumento do conteúdo de ARCO, no entanto, é possível controlar esse efeito selecionando cuidadosamente o ARCO ao produzir o concreto (Silva *et al.*, 2015). Contudo, Butler *et al.* (2013) e Etxeberria *et al.* (2007) relatam que o concreto com ARCO mostrou desempenho melhor que o concreto convencional em relação à resistência à tração.

Rao *et al.* (2005) encontrou que para 100% de substituição, a resistência à tração do concreto foi reduzida de 15 a 20%. Segundo Rao *et al.* (2007) a resistência à tração em relação à resistência à compressão de concretos com ARCO está na ordem de 9 a 13%. Katz (2003), através de resultados experimentais, observou uma queda de resistência à tração de concretos com ARCO de 9% a 13% para 100% de ARCO e o mesmo fator água/cimento. De acordo com Silva *et al.* (2015) é esperada uma redução na resistência à tração de concretos com ARCO, entretanto, é possível controlar este efeito através de um controle maior na produção do concreto, como na quantidade, tamanho, tipo e qualidade do agregado reciclado, podendo inclusive aumentar a resistência.

Em relação ao módulo de elasticidade, Ignjatovic *et al.* (2017) observou que concretos com 50% e 100% de ARCO apresentaram até 13% de diminuição do mesmo. Segundo Rahal e Alrefaei (2017) taxas de substituição menores que 20% do uso de ARCO tem efeito similar no módulo de elasticidade e resistência a compressão do concreto. No entanto, Rao *et al.* (2005) encontrou que para 100% de substituição, o módulo de elasticidade do concreto foi reduzido de 50 a 70% do concreto sem substituição. De acordo com Etxeberria *et al.* (2007) concretos com 100% de ARCO também apresentam menores módulos de elasticidade.

Segundo Corinaldesi (2010) concretos com 30% de ARCO apresentam módulo de elasticidade 15% menor em comparação à 0% de ARCO, uma vez que incorporação de ARCO no concreto reduz a rigidez e aumenta a fragilidade, como resultado, o módulo de elasticidade diminui.

2.1.4 Resistência ao cisalhamento

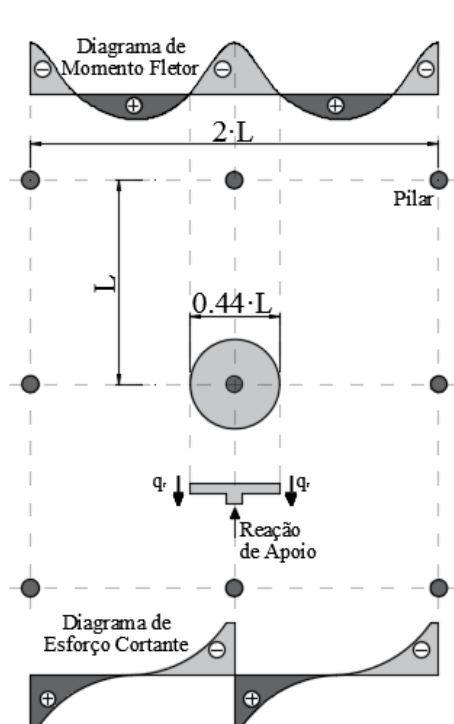
A resistência ao cisalhamento do concreto com ARCO tem sido avaliada por ensaios do tipo push-off e em vigas. Estudos como os de Fonteboa *et al.* (2010), Xiao *et al.* (2012), Rahal e Al-Khaleefi (2015), Waseem e Singh (2016), Sun *et al.* (2021) e Trindade (2022) indicaram redução na resistência ao cisalhamento em espécimes com 50% de ARCO. Contudo, Xiao *et al.* (2012) observaram que espécimes com até 30% de ARCO apresentaram desempenho semelhante ao concreto de referência, com redução máxima de 15% para taxas iguais ou superiores a 50%. Os autores atribuem essa diminuição ao menor engrenamento entre os grãos, influenciado pela argamassa residual aderida ao ARCO.

2.2 ASPECTOS GERAIS SOBRE PUNÇÃO EM LAJES LISAS

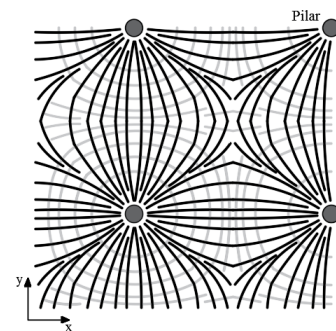
Nas lajes lisas, a ruptura por punção ocorre nas áreas de conexão entre a laje e o pilar, onde surgem tensões causadas pela interação entre esforços de flexão e cisalhamento ao redor dos pilares, como ilustrado na Figura 2.2a. Uma característica distintiva dos painéis de lajes apoiados diretamente em pilares é a presença de uma distribuição biaxial de momentos, típica de lajes bidirecionais, conforme mostrado na Figura 2.2b.

Nas regiões centrais dos pilares, considerando a simetria das cargas e dos vãos, os momentos fletores radiais se neutralizam em uma distância equivalente a $0,22 \cdot L$ do vão entre os pilares. Na Figura 2.2c, observa-se o padrão das tensões principais elásticas de tração e compressão na interface laje-pilar, destacando que as tensões de compressão se espalham em forma de uma biela tipo “leque”, enquanto tensões de tração perpendiculares a atravessam.

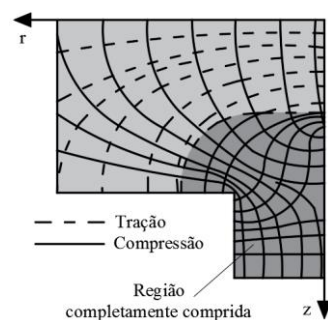
Além disso, uma característica das conexões laje-pilar é o estado de compressão tri-axial ao qual o apoio é submetido. Para reproduzir a distribuição de tensões e esforços típicos dessas conexões em situações de punção, a maior parte dos ensaios experimentais simula a região de momentos negativos em um raio de $0,22 \cdot L$ a partir do centro do pilar.



a) Diagrama de momento fletor e esforço cortante



b) Fluxo dos momentos fletores radiais e circunferenciais no pavimento de lajes lisas



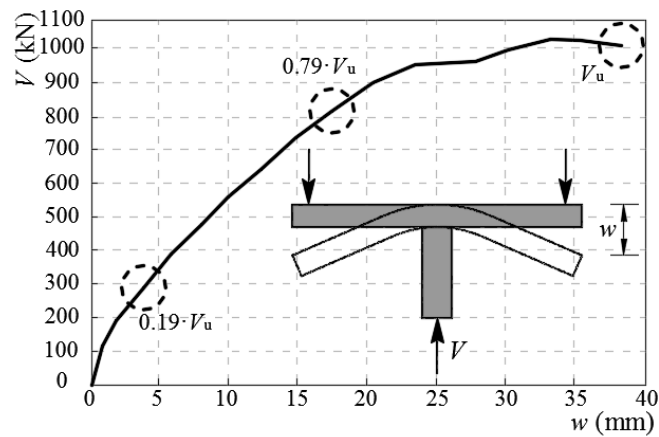
c) Fluxo das tensões principais elásticas de compressão e tração na ligação laje-pilar

Figura 2.2 – Distribuição de esforços no sistema de lajes lisas (Eder, 2011 apud Pereira Filho, 2016).

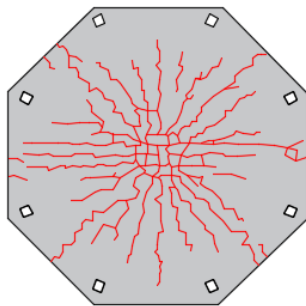
2.2.1 Padrão de fissuração e formação da fissura de punção

O padrão de fissuração em lajes lisas é influenciado principalmente pelo fato de a laje ser unidirecional ou bidirecional, bem como pela geometria e pelo tamanho do apoio. Em lajes com pilares que se estendem para outros pavimentos, a primeira fissura em lajes bidirecionais submetidas a carregamento centrado surge no contorno do pilar, causada pelo momento fletor radial. Em seguida, aparecem fissuras radiais ao longo da laje, provocadas pelo momento fletor circunferencial, culminando na formação de fissuras circunferenciais de punção.

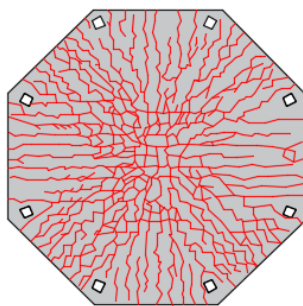
Por outro lado, em lajes com pilares sem continuação para outros pavimentos, as primeiras fissuras se formam na parte superior do pilar. A Figura 2.3 ilustra os padrões de fissuração observados em diferentes estágios de carregamento durante o ensaio da laje P22, conforme descrito por Mueller et al. (1984).



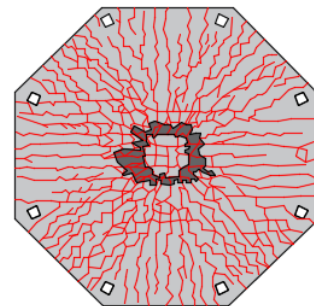
a) Comportamento carga x deslocamento



b) 0,19 V_u



c) 0,79 V_u



d) V_u

Figura 2.3 – Padrão de fissuração da laje P22 (Mueller *et al.*, 1984 apud Pereira Filho, 2016).

De acordo com Eder (2011), a punção é caracterizada pela formação de uma fissura circunferencial inclinada em ângulos entre 25° e 35° em lajes sem armadura de cisalhamento. Essa fissura inclinada surge na superfície tracionada do concreto e se propaga em direção à base do pilar à medida que o carregamento aumenta. Recomenda-se que a angulação da fissura seja medida a partir do centróide das armaduras de flexão, considerando que o ângulo da fissura pode variar após atravessar essas armaduras.

Em lajes lisas com armadura de cisalhamento, a punção ocorre devido às interações complexas no estado limite último (ELU), que resulta no aparecimento de diferentes tipos de fissuras, conforme ilustrado na Figura 2.4. Essas fissuras impactam diretamente a rigidez e a resposta estrutural da laje, interagindo com as armaduras de punção. A ruptura por punção em lajes com armadura transversal acontece quando uma ou mais fissuras, ou mesmo a combinação de várias delas, se propagam até a seção crítica.

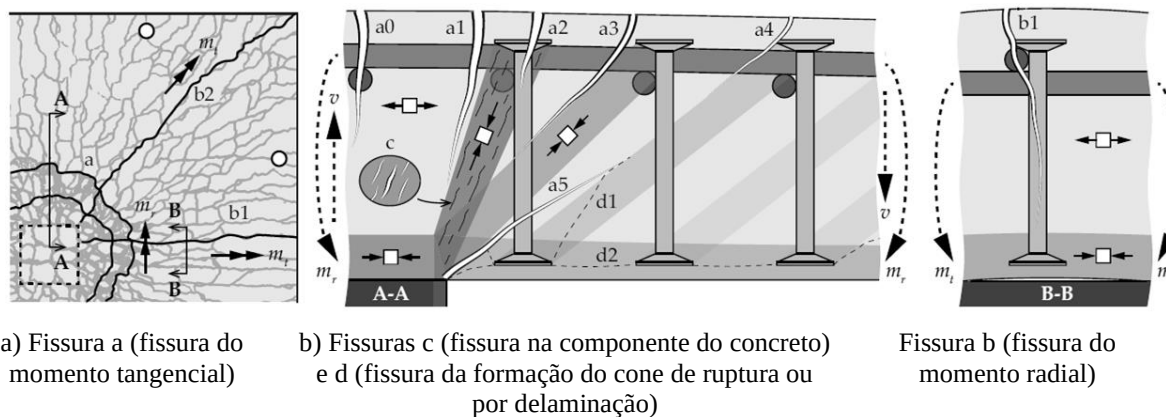


Figura 2.4 – Desenvolvimento da fissuração em lajes lisas com armadura de cisalhamento (adaptado de Brantschen, 2016)

2.2.2 Fatores que influenciam na resistência à punção

Um dos primeiros e principais parâmetros definidos em projeto para qualquer elemento de concreto armado é a resistência à compressão do concreto. Para Menetrey (2002) a parcela resistente do concreto é função da componente vertical de uma tensão resistente de tração atuando na área da superfície de ruptura. Para Kueres e Hegger (2018) e Kueres, Schmidt e Hegger (2019) a parcela resistente do concreto é função de vários mecanismos de cisalhamento atuando no concreto, como contribuição do efeito pino, do engrenamento dos agregados, da resistência ao cisalhamento do bloco de compressão contornando o pilar com a contribuição da resistência residual à tração se responsabilizando apenas em estágios iniciais de carregamento. O que leva a concluir que a parcela de resistência do concreto é influenciada pelo comportamento a flexão da laje.

Segundo Ozbolt *et al.* (2001), a resistência à punção de lajes aumenta aproximadamente em função da raiz cúbica da energia de fratura (G_f) e da taxa de armadura (ρ), uma vez que maiores valores de G_f e ρ_l levam a um crescimento mais estável de fissuras na zona tracionada, aumentando a zona de compressão e consequentemente à uma maior carga última. O *fib* Model Code 2010 (2013) define que G_f está diretamente relacionada ao agregado, sendo muito mais afetada pelo tipo de agregado do que pelo tamanho do mesmo.

Devido a região em que ocorre a punção está na zona de momentos fletores máximos, é natural que em projeto seja dimensionada uma grande quantidade de armaduras para combater os esforços de tração devido à flexão. Para Regan (1981) essa armadura pode influenciar na carga

última à punção, pois o aumento de sua área de aço resulta no aumento da zona comprimida de concreto devido à flexão, consequentemente aumentando a região íntegra de concreto capaz de resistir ao cisalhamento. Além disso, uma maior taxa de armadura de flexão pode controlar melhor a abertura das fissuras, favorecendo a transferência de esforços através do engrenamento dos agregados. Regan (1981) sugere que a influência da armadura de flexão na resistência à punção seja proporcional à raiz cubica da taxa de armadura flexão. Elsayhah et al. (2011) propôs, a partir de uma análise por redes neurais em 244 ensaios da literatura, que a influência da armadura de flexão seja proporcional à potência de 0,41 da taxa de armadura de flexão.

A Figura 2.5 ilustra a influência da taxa de armadura de flexão nos mecanismos de resistência à punção, onde V_d é a componente de resistência referente ao efeito pino, V_a é a componente referente ao engrenamento dos agregados, V_{cy} é referente a resistência da região íntegra do concreto e T e C são as componentes de tração e compressão, respectivamente, do binário de flexão.

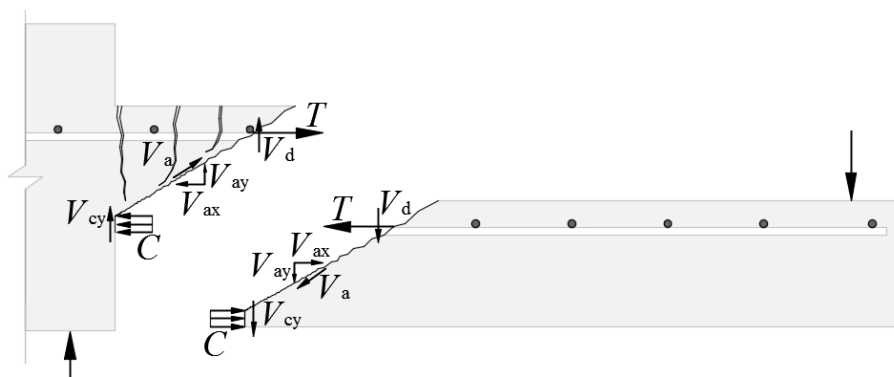


Figura 2.5 - Intensidade dos mecanismos de resistência à punção (adaptado de Pereira Filho, 2016)

Para levar em consideração corretamente a influência da armadura de flexão das lajes é preciso definir a quantidade de armaduras que de fato contribui. É comum que a taxa de armadura de flexão seja definida como $\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}$, sendo ρ_x e ρ_y as taxas de armaduras de flexão nas direções x e y .

Regan (2001) observou, a partir dos ensaios de Elster e Hognestad (1956), Moe (1961), Regan (1986) e Mcharg et al. (2000), os quais apresentavam concentrações de armaduras nas proximidades do pilar, que utilizando toda a largura da laje (equivalente a faixa de laje dentro das linhas de inflexão dos momentos fletores, $0,44 \cdot L$ ilustrado na Figura 2.2a), para a definição das taxas em x e y mostraram resultados satisfatórios. Limitando a faixa de laje com largura efetiva afastada em $1,5 \cdot d$, a partir da face do pilar, observou que as previsões de carga última

das lajes em que havia uma concentração de armadura próxima ao pilar foram muito superestimadas, e utilizando uma faixa de laje com o diâmetro ou uma largura igual à soma do lado do pilar mais $3 \cdot d$ para cada lado, como é utilizado na ABNT NBR 6118 (2014) e Eurocode 2 (2014), os resultados foram um meio termo entre utilizar $1,5 \cdot d$ e a largura total da laje, apresentando resultados suficientemente seguros.

Uma das grandes influências na resistência à punção é a espessura da laje, ou a altura útil da laje. A partir de uma análise plástica do fenômeno, analisando apenas à punção, a altura útil influenciaria apenas na área de corte da seção transversal. Embora, no passado, muitas recomendações utilizassem modelos plásticos para estimar a carga de ruptura de lajes lisas, segundo Bazant e Cao (1987), análises plásticas são justificáveis apenas quando o comportamento carga-deslocamento termina com um longo patamar de escoamento, enquanto que na punção a ruptura ocorre de forma frágil.

Segundo Bazant (1984), materiais com ruptura frágil apresentam um fenômeno de diminuição de tensão resistente conforme se aumenta o tamanho do elemento e a este fenômeno dá-se o nome de efeito de escala. Inicialmente, o efeito de escala era interpretado estatisticamente como consequência da aleatoriedade da resistência do material. Logo, em estruturas maiores, encontra-se com maior facilidade pontos de menor resistência no material. Porém, para Bazant *et al.* (1994) o efeito de escala deve ser explicado a partir da dissipação de energia devido ao crescimento da macro fissuração.

Para punção, Regan (1981) propôs que essa diminuição da resistência seja proporcional a $\sqrt[4]{\frac{1}{d}}$, baseado em ensaios de cisalhamento em vigas. Regan e Braestrup (1985), baseando-se em ensaios experimentais de lajes com variações na altura útil, concluem que a proporcionalidade de $\sqrt[3]{\frac{1}{d}}$ descreve melhor o efeito de escala em lajes lisas. Um modo de tratar o problema é utilizando a “Lei do Efeito de Escala” apresentada por Bazant (1984), baseado em princípios da mecânica da fratura não linear. Quando devidamente calibrado, este modelo pode descrever de forma suave a transição da resistência nominal, semelhante ao que se prevê em análises plásticas, para lajes esbeltas, até o máximo efeito de escala, para espessuras muito elevadas, como em sapatas e fundações tipo “*radier*”. O CEB Model Code 1990 (1993) recomendou que

o efeito de escala seja estimado por $1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$, proporção utilizada em diversas outras recomendações atuais como Eurocode 2 (2014), EHE (2008), ETA 12/0454 (2012) e ABNT NBR 6118 (2014).

Normalmente, na verificação da punção em lajes lisas, as normas recomendam que a força resistente seja determinada a partir de uma tensão resistente aplicada em uma área de controle. Esta área é resultante do produto da altura útil da laje por um perímetro de controle estipulado conforme cada recomendação normativa. Embora o perímetro de controle aumente com o aumento da seção do pilar, Moe (1961) observou uma concentração de esforços cortantes nos cantos do pilar quadrado medindo as deformações verticais no pilar, próximo a superfície da laje que poderia diminuir a resistência à punção.

Vanderbilt (1972) avaliou a possível redução da resistência à punção provocada pela concentração de tensões observada por Moe (1961) com uma série de ensaios com pilares quadrados e circulares variando a relação do seu tamanho (c) com a altura útil da laje (d). Ele concluiu que lajes apoiadas em pilares circulares apresentam maior tensão resistente que lajes apoiadas em pilares quadrados de igual perímetro, devido à diferença na distribuição das tensões dos pilares. A Figura 2.6 apresenta o fluxo e distribuição das tensões de cisalhamento localizadas em um perímetro afastado em $0,5 \cdot d$ da face do pilar para diferentes dimensões de pilares, obtidas através de análises computacionais linear elásticas por Einpaul *et al.* (2016).

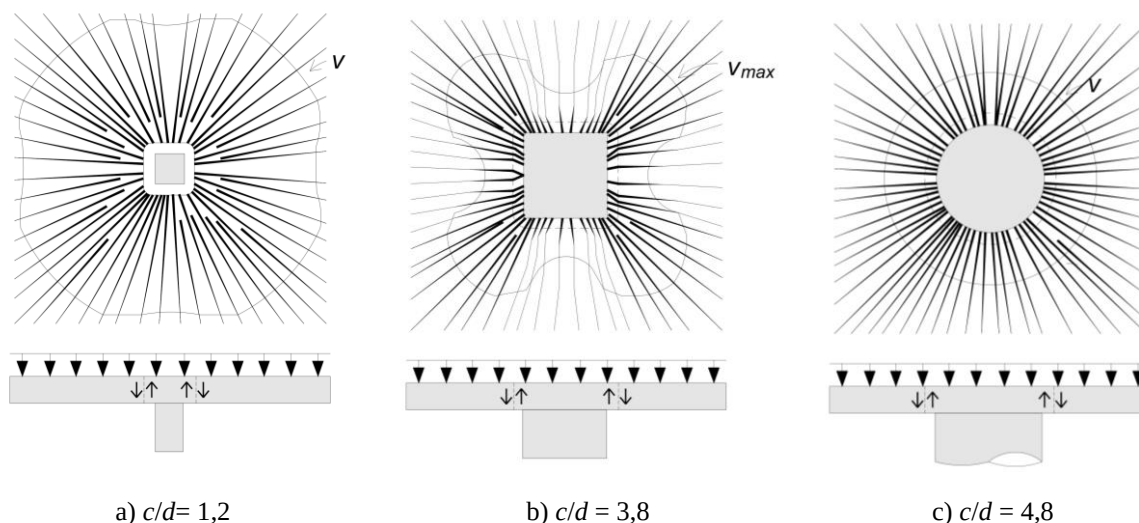


Figura 2.6 – Fluxo e distribuição das tensões de cisalhamento para diferentes tamanhos e geometria do pilar (Einpaul *et al.*, 2016 apud PEREIRA FILHO, 2016)

2.2.3 Armaduras de cisalhamento

Conforme mencionado acima, a forma mais eficiente de se combater a ruptura por punção em lajes lisas é se adotando uma armadura de cisalhamento. Essa medida, não interfere, nas dimensões da laje e do pilar, o que poderia acarretar um obstáculo no projeto arquitetônico e alterar o peso próprio da estrutura. Desse modo, a solução com a utilização das armaduras de punção se torna a mais viável.

As armaduras de punção podem ser utilizadas em diversos formatos, sendo o primeiro tipo utilizado foi o tipo barra dobrada (Raf, 1938; Elstner e Hognestad, 1956; Anderson, 1963). Os estribos também foram sendo testados ao longo do tempo em vários formatos: aberto, fechado, inclinado e em pente (Trautwein, 2001; Palhares, 2018; Lima, 2021). Armaduras inovadoras foram desenvolvidas por diversos autores, como: “*Shear bands*” (Chana, 1993) e “*Shear hoops*” (Pilakoutas e Li, 2003). Armaduras do tipo conectores, também conhecidos como “*Studs rails*” e “*Double headed studs*” (Andra e Matthaei, 2000; Regan e Samadian, 2001) foram testados em diversas pesquisas. As Figura 2.7 e 2.8 apresentam alguns tipos de armaduras de cisalhamento.

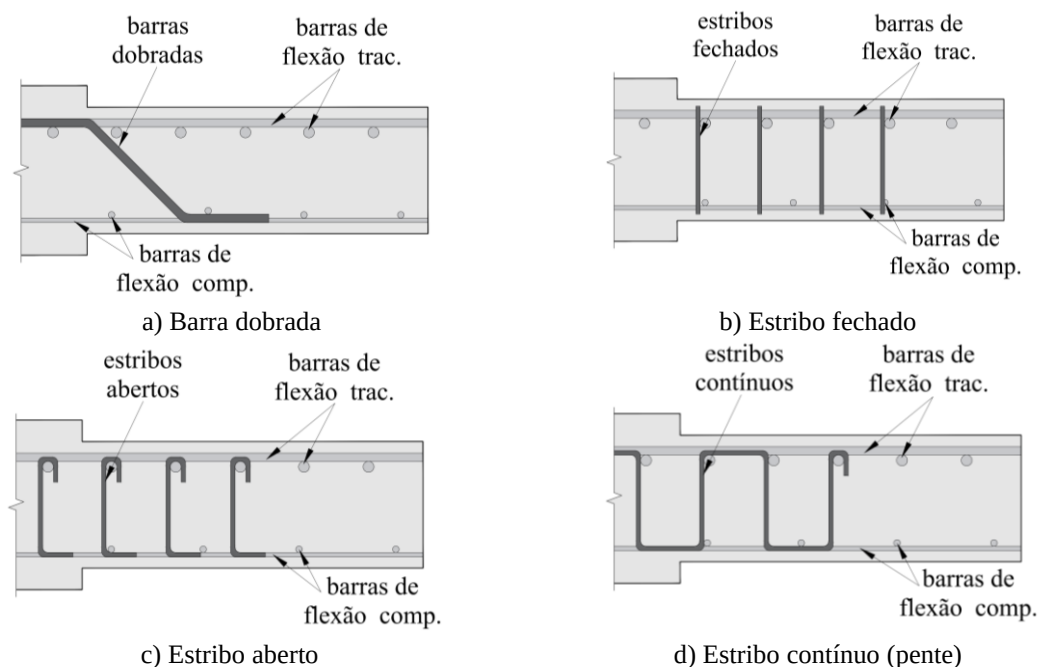


Figura 2.7 – Tipo de armaduras de cisalhamento. (adaptado de Pereira Filho, 2021)

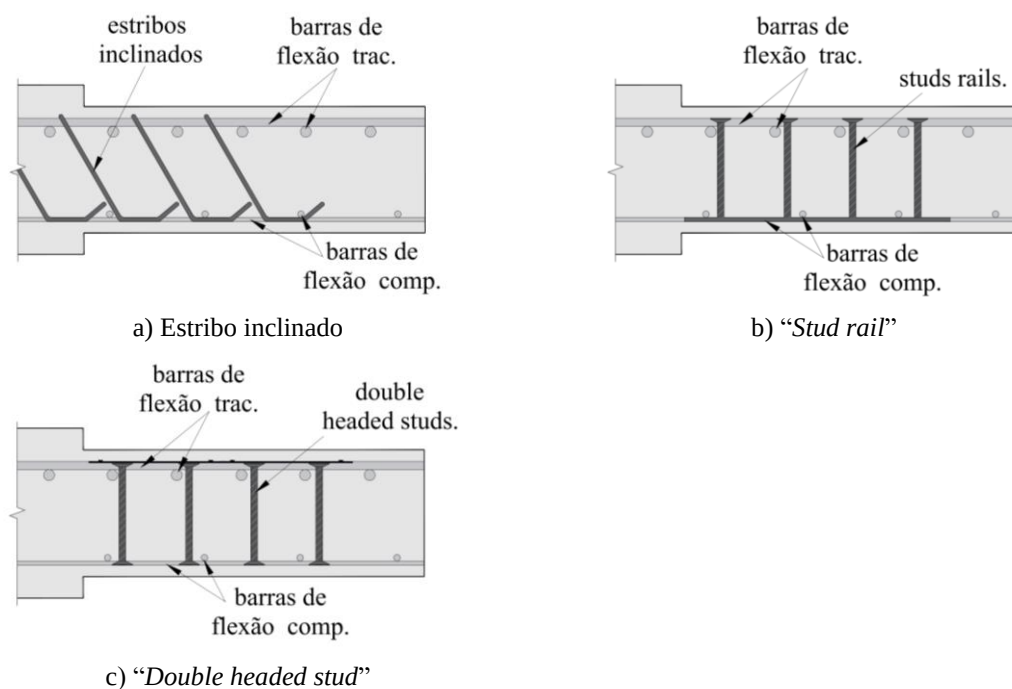


Figura 2.8 – Tipo de armaduras de cisalhamento (continuação) (adaptado de Pereira Filho, 2021).

As armaduras de cisalhamento podem ser dispostas de três formas ao redor do pilar, em arranjo radial, arranjo cruciforme e arranjo em grade, como mostrado na Figura 2.9. Segundo Pereira Filho (2021), o arranjo radial, é ideal para distribuir as pernas das armaduras ao longo da superfície de ruptura, facilita a contagem, mas pode gerar interferências entre as barras de flexão e cisalhamento, tornando-se inviável dependendo do tipo de armadura de cisalhamento. Já o arranjo cruciforme, amplamente usado nos EUA, simplifica a armação de estribos fechados e minimiza interferências com armaduras de flexão, mantendo uma área de aço constante. Porém, sua principal desvantagem é o grande espaçamento na última camada da armadura de cisalhamento, aumentando o risco de rupturas prematuras e frágeis fora da região reforçada.

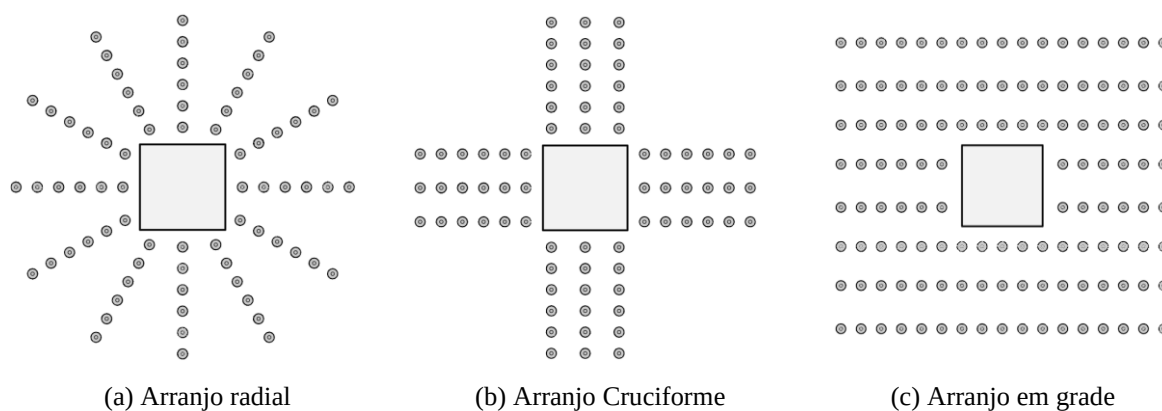


Figura 2.9 – Tipos de arranjos das armaduras de cisalhamento

2.3 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS PARA DIMENSIONAMENTO À PUNÇÃO

2.3.1 ABNT NBR 6118 (2014)

A ABNT NBR 6118 (2014), define a verificação do cisalhamento nas superfícies de controle definidas no entorno de forças concentradas, denominadas superfícies críticas. A primeira superfície crítica é o contorno C, a qual é feita a verificação da compressão diagonal do concreto e o perímetro crítico desse contorno é denominado u_0 . A segunda superfície crítica está afastada $2d$ do pilar ou da carga concentrada, onde é feita a verificação da tração diagonal do concreto e o perímetro crítico desse contorno é denominado u_1 apresentado na Figura 2.10. A resistência à punção de lajes lisas sem armadura de cisalhamento segundo os critérios da ABNT NBR 6118 (2014) deve ser estimada utilizando a Equação 1.

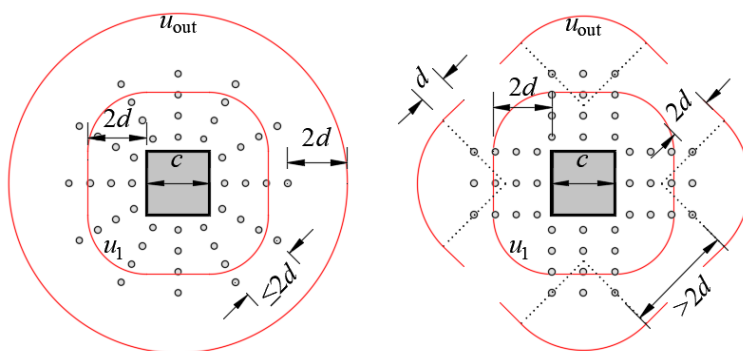


Figura 2.10 – Perímetro de controle de acordo com a NBR 6118 (2014) (adaptado de Pereira Filho, 2021).

$$V_{Rc,NBR} = 0,182 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

k é um parâmetro que considera o efeito de escala, obtido através de $k = 1 + \sqrt{200/d}$, com d em mm;

ρ é a média geométrica da taxa de armadura de flexão nas duas direções calculada por $\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}$ onde ρ_x e ρ_y são as taxas de armadura de flexão da laje nos sentidos x e y , levando em consideração apenas uma faixa de laje igual à dimensão do pilar naquela direção acrescida de $3 \cdot d$ para cada lado.

f_c é a resistência à compressão do concreto;

u_1 é o perímetro de controle afastado a $2d$ das faces do pilar;

d é a altura útil da laje.

Para verificar a resistência à punção com armadura de cisalhamento a NBR 6118 utiliza o menor valor entre as equações 2 a 4.

$$V_{Rcs.NBR} = 0,77 \cdot V_{Rc.NBR} + 1,5 \cdot s_r / d \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,ef} \cdot \text{sen}(\alpha) \quad \text{Equação 2}$$

$$V_{Rout.NBR} = 0,182 \cdot k \cdot 100 \cdot \rho \cdot f_c^{1/3} \cdot u_{out} \cdot d \quad \text{Equação 3}$$

$$V_{Rmax.NBR} = 0,54 \cdot f_c \cdot v \cdot u_0 \cdot d \quad \text{Equação 4}$$

2.3.2 ACI 318 (2019)

Para o dimensionamento de lajes lisas, o ACI 318 (2019) recomenda que a resistência à punção seja determinada a partir de uma tensão resistente aplicada em um perímetro de controle afastado do pilar a uma distância igual a $d/2$, com uma superfície média posicionada no meio da fissura de punção, tendo esta fissura uma inclinação hipotética igual a 45° . A Figura 2.11 mostra o perímetro de controle correspondente ao recomendado pelo ACI 318 (2019).

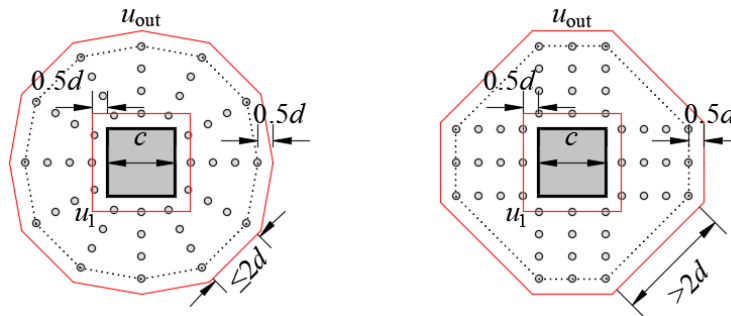


Figura 2.11 – Perímetro de controle segundo o ACI 318 (2019) (adaptado de Pereira Filho, 2021).

Assim, a tensão resistente à punção é a menor dentre três expressões. A primeira leva em consideração um possível efeito negativo que pilares com dimensões muito pequenas em relação à altura útil da laje e da raiz da resistência à compressão do concreto. A segunda estima uma diminuição na tensão resistente para pilares retangulares devido a concentrações de tensões além da resistência a compressão do concreto. Por fim, a última expressão estima que a tensão resistente à punção seja função apenas da raiz da resistência à compressão do concreto. Assim a resistência à punção de uma laje sem armadura de cisalhamento pode ser estimada, de forma empírica, pela Equação 5.

$$V_{Rc,ACI} = \min \begin{cases} 0,33 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \\ 0,17 \cdot \left(1 + \frac{2}{a/b}\right) \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \\ 0,083 \cdot \left(40 \cdot \frac{d}{u_1} + 2\right) \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \end{cases} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão do concreto limitada ao valor máximo de 69 MPa;

u_1 é o perímetro de controle em mm;

d é a altura útil da laje em mm.

a é a maior dimensão do pilar

b a menor dimensão do pilar.

Para lajes lisas com armaduras de cisalhamento essa norma recomenda a verificação de três possíveis modos de ruptura V_{Rmax} , V_{Rcs} e V_{Rout} , especificando que a Equação 6, Equação 7 e Equação 8 podem ser utilizadas para o dimensionamento de lajes com armaduras de cisalhamento constituídas de barras dobradas ou estribos com uma ou múltiplas pernas, abertos ou fechados.

$$V_{Rcs,ACI} = \left(\frac{s_r}{d} \right) \cdot A_{sw} \cdot f_{yw} \cdot \sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) + \left\{ \begin{array}{l} 0,17 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \rightarrow \text{estribos} \\ 0,25 \cdot k \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \\ 0,17 \cdot k \cdot \left(1 + \frac{2}{\left[\frac{a}{b}\right]}\right) \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \\ 0,083 \cdot k \cdot \left(\frac{40 \cdot d}{u_1} + 2\right) \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \end{array} \right\} \min \rightarrow \text{stud} \quad \text{Equação 6}$$

$$V_{Rout,ACI} = 0,17 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{out} \cdot d \quad \text{Equação 7}$$

$$V_{Rmax,ACI} = \begin{cases} 0,5 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \rightarrow \text{estribos} \\ 0,66 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \rightarrow \text{studs} \end{cases} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

A_{sw} é a área de aço da armadura de cisalhamento na seção transversal de um perímetro de armaduras;

α é o ângulo de inclinação da camada da armadura;

f_{yw} é a tensão de escoamento da armadura de cisalhamento limitada ao valor de 420 MPa;

s_r é o espaçamento entre os perímetros de armadura de cisalhamento;

u_{out} é o perímetro de controle afastado $d/2$ da região das armaduras de cisalhamento, como mostra a Figura 2.11.

k pode ser considerado igual à 1 na Equação 2.2 caso a armadura de cisalhamento obedeça às regras de detalhamento do ACI.

2.3.3 Eurocode 2 (2014)

As recomendações normativas deste tópico estão em acordo com as atualizações CEN EN 1992-1-1 (2004), CEN EN 1992-1-1/AC (2010) e EN 1992-1-1:2004/A1 (2014). O Eurocode 2 (2004) e a ABNT NBR 6118 (2014) se basearam nas recomendações da norma CEB-FIP MC90 (1993) resultando em modelos de cálculos similares. No entanto, se diferenciam quanto ao coeficiente de segurança λ_c , 1,4 para a ABNT NBR 6118 (2014) e 1,5 para o Eurocode 2 (2014), o efeito escala e a taxa de armadura de flexão que não são limitadas na norma brasileira. O Eurocode 2 (2014) prevê a resistência à punção aplicando uma tensão resistente em uma área determinada a partir de um perímetro de controle, porém esse perímetro tem superfície média posicionada na extremidade da fissura de punção, considerando uma inclinação hipotética igual a 26,6°, com um afastamento de $2d$ em relação às faces do pilar, como exemplificado na Figura 2.12.

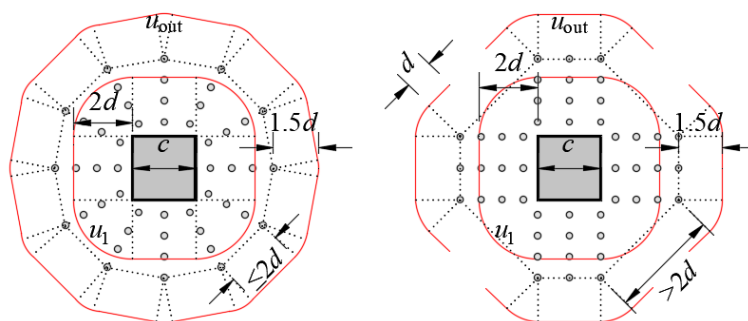


Figura 2.12 - Perímetro de controle segundo o Eurocode 2 (2014) (adaptado de Pereira Filho, 2021).

Para o cálculo da resistência à punção de lajes sem armadura de cisalhamento, a tensão resistente à punção de projeto, em MPa, pode ser calculada por meio da Equação 2.9, levando em consideração os valores limites para a taxa de armadura de flexão e para o efeito de escala (*size effect*) impostos por esta norma como mostrado a seguir.

$$V_{Rc,EC2} = 0,18 \cdot k \cdot 100 \cdot \rho \cdot f_c^{1/3} \cdot u_1 \cdot d \geq v_{\min} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

$k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2$, é o parâmetro que considera o *size effect*, sendo d em mm;

f_{ck} em MPa;

$\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \leq 0,02$ é a média geométrica onde ρ_x e ρ_y são as taxas de armadura de flexão da laje nos sentidos x e y . Os valores ρ_x e ρ_y devem ser calculados tendo em conta uma largura de laje igual à largura da coluna mais $3d$ de cada lado.

f_c é a resistência à compressão do concreto;

u_1 é o perímetro de controle afastado a $2d$ das faces do pilar;

d é a altura útil da laje.

$v_{\min}$ é a tensão resistente mínima para o caso de taxas de armadura de flexão muito baixas.

Obtida através de $v_{\min} = 0,035 \cdot k^{2/3} \cdot \sqrt{f_c}$.

Para lajes com armadura de cisalhamento, a norma recomenda a consideração de 75% da resistência à punção em lajes sem armadura de cisalhamento somado à força cortante do aço dentro da área de influência do perímetro de controle que contribuem na resistência à punção, calculada através da Equação 10. A resistência fora da região das armaduras é calculada pela Equação 11. A resistência da diagonal comprimida, próxima das extremidades do pilar, deve ser verificada através da Equação 12

$$V_{Rcs,EC2} = 0,75 \cdot V_{Rc,EC2} + 1,5 \cdot s_r/d \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,ef} \cdot \sin(\alpha) \leq 1,5 \cdot V_{Rc,EC2} \quad \text{Equação 10}$$

$$V_{Rout,EC2} = 0,18 \cdot k \cdot 100 \cdot \rho \cdot f_c^{1/3} \cdot u_{out} \cdot d \quad \text{Equação 11}$$

$$V_{Rmax,EC2} = 0,4 \cdot f_c \cdot v \cdot u_0 \cdot d \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

A_{sw} é a área de aço total da armadura de cisalhamento na seção transversal de um perímetro de armaduras;

α é o ângulo de inclinação da camada da armadura;

$f_{yw,ef}$ é a tensão de escoamento efetiva na armadura de cisalhamento, a qual deve ser calculada através $f_{yw,ef} = 1,15 \cdot 250 + 0,25 \cdot d \leq f_{yw}$ em MPa e o valor de d em mm;

s_r é o espaçamento entre os perímetros de armadura de cisalhamento;

u_{out} é o perímetro de controle afastado a $1,5d$ da região da armadura de cisalhamento;

v é o fator de redução da eficiência da resistência à compressão do concreto da biela, devida a localização em zonas de tensões de tração diagonal. Dado por $v = 0,6 \cdot 1 - f_c/250$;

u_0 é o perímetro do pilar.

2.3.4 *fib* Model Code 2010 (2013)

O *fib* Model Code 2010 (2013) tem sua recomendação para a resistência à punção baseada na teoria da fissura crítica de cisalhamento de Muttoni e Schwartz (1991), Muttoni (2008) e Ruiz e Muttoni (2009), onde acredita-se que a resistência à punção diminui com o acréscimo da rotação da laje (ψ), a qual é função da carga aplicada e da resistência à flexão da laje. Como a resistência da laje é função da carga aplicada, o problema deve ser solucionado de forma iterativa até chegar à solução onde a carga resistente seja igual a carga solicitante ($V_R = V_S$). Os perímetros críticos considerados pelo código modelo são definidos de acordo com a Figura 2.13.

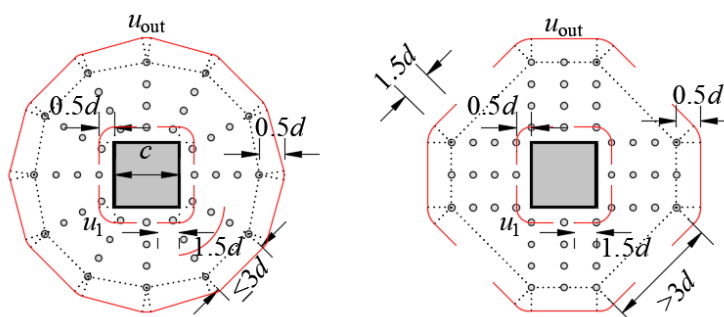


Figura 2.13 – Perímetro de controle segundo *fib* Model Code 2010 (2013) (adaptado de Pereira Filho, 2021).

Para realizar a verificação à punção sem armadura de cisalhamento pelo *fib* Model Code 2010 (2013) utiliza-se a Equação 13.

$$V_{Rc,MC10} = k_{\psi} \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação 13}$$

Onde k_ψ é um parâmetro que depende da rotação da laje conforme a Equação 2.22.

$$k_\psi = \frac{1}{1,5 + 0,9 \cdot k_{dg} \cdot \psi \cdot d} \leq 0,6 \quad \text{Equação 14}$$

Como na teoria da fissura crítica o modo de ruptura acontece devido à abertura de uma fissura crítica cortando a biela que transmite a força cortante para o pilar. Esses esforços de cisalhamento são transmitidos diretamente pela rugosidade da superfície da fissura, levados em consideração no *fib* Model Code 2010 (2013) a partir do fator k_{dg} , apresentado na Equação 15. Segundo Muttoni e Schwartz (1991) a espessura desta fissura é proporcional ao produto $\psi \cdot d$. 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. O nível I é indicado para um rápido pré-dimensionamento das lajes, e estimado conforme a Equação 16. O nível II é recomendado para o caso típico de dimensionamento de novas estruturas, estimado conforme a Equação 17. O nível III de aproximação é indicado para as verificações especiais em estruturas existentes, reduzindo a constante para prever a rotação com maior precisão, a qual pode ser estimada pela Equação 18. O nível IV é utilizado apenas em casos de verificações especiais em que se sabem detalhadamente as características dos materiais e detalhamento das armaduras, obtendo a rotação da laje a partir de modelos computacionais não lineares.

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \leq 0,75 \quad \text{Equação 15}$$

$$\psi_I = 1,5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_{ys}}{E_s} \quad \text{Equação 16}$$

$$\psi_{II} = 1,5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_{ys}}{E_s} \cdot \left(\frac{m_s}{m_R} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{Equação 17}$$

$$\psi_{III} = 1,2 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_{ys}}{E_s} \cdot \left(\frac{m_s}{m_R} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

d_g é o diâmetro máximo do agregado

r_q é o raio de carregamento das lajes

m_s é o momento solicitante da laje, sugerido pelo *fib* Model Code 2010 (2013) como

$$M_s = V/8$$

m_R é o momento resistente da laje, obtido através de $M_R = \rho \cdot f_{ys} \cdot d^2 \cdot 1 - 0.5 \cdot \rho \cdot f_{ys} / f_c$

2.4 MODELO TEÓRICO DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS LAJES

A teoria das linhas de ruptura foi empregada nesta pesquisa para estimar a resistência à flexão das lajes analisadas. Esse método é amplamente utilizado por diversos pesquisadores, como Regan (2000), Ferreira (2010) e Lima Neto (2012), Pereira Filho (2021), etc. apresentando resultados consistentes. Considerando que o carregamento foi aplicado de forma simétrica ao longo dos bordos das lajes, simulando uma laje armada em duas direções. Para efeitos comparativos, foram utilizados dois métodos para determinação da resistência à flexão: o primeiro método adotado por Ferreira (2010) e o segundo método adotado por Pereira Filho (2021).

O método adotado por Ferreira (2010), prevê o cálculo da resistência à flexão conforme as diretrizes da norma Eurocode 2 (2004), assumindo a ruptura por esgotamento das armaduras e desconsiderando aquelas na face comprimida. A força de tração é obtida pela Equação 19, enquanto a Equação 23 determina a força de compressão para concretos com resistência inferior a 50 MPa, sem considerar o efeito Rush devido à curta duração da carga. O momento resistente da seção da laje é calculado pela Equação 25.

$$F_{st} = \sum A_s \cdot f_{ys} \quad \text{Equação 19}$$

Sendo

A_s é a soma da área das armaduras superiores ao longo de toda a seção da laje;

f_{ys} é a tensão de escoamento das armaduras, admitida nessa fase como 500 MPa

$$F_{cc} = 0,95 \cdot f'_c \cdot b_w \cdot x \quad \text{Equação 20}$$

Onde

f'_c é a resistência à compressão do concreto

b_w é a largura da seção da laje;

$$x = \frac{\sum A_s \cdot f_{ys}}{0,95 \cdot f'_c \cdot b_w}$$

x é a altura da linha neutra, determinada por

$$M_R = \sum A_s \cdot f_{ys} \cdot (d - 0,4 \cdot x)$$

Equação 21

Para determinar a resistência à flexão, Ferreira (2010) afirma que é necessário igualar o momento resistente (M_R) ao momento solicitante (M_S). O momento solicitante pode ser calculado somando os momentos gerados pela carga aplicada, considerando as reações transmitidas às placas de aço localizadas sob a laje, conforme apresentado na

O cálculo do momento solicitante pode ser realizado conforme ilustrado na Figura 2.14-a. A Figura 2.14-b apresenta os valores reais utilizados para determinação da resistência a flexão das lajes deste trabalho. A Figura 2.15-a apresenta a localização do centro de carga para pilar com seção de formato quadrado, Figura 2.15-b apresenta os valores reais para as lajes ensaiadas neste trabalho.

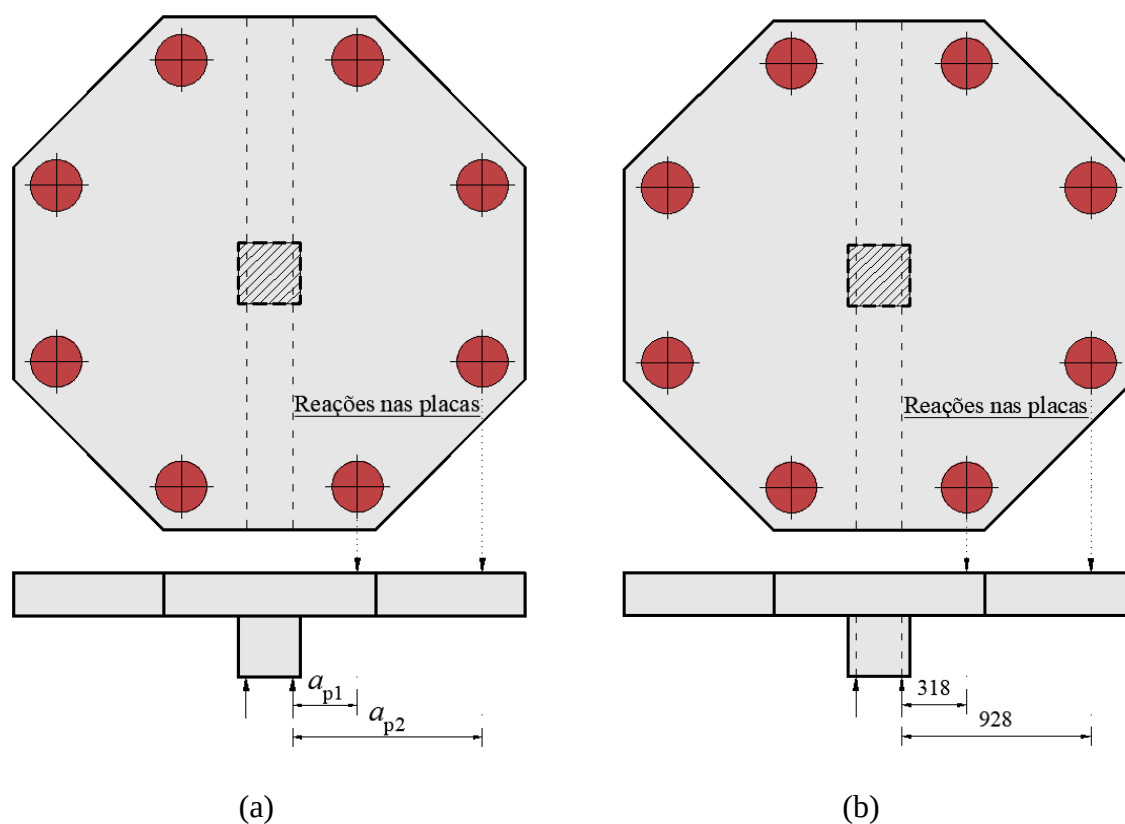


Figura 2.14 – Ilustração do cálculo do momento solicitante para as lajes (Adaptado de Ferreira, 2010).



Figura 2.15 – Determinação do centro de carga para meia laje (Adaptado de Ferreira, 2010).

O cálculo do V_{flex} pode ser então realizado a partir da Equação 22.

$$V_{flex} = \frac{4 \cdot M_R}{(a_{p1} + a_{p2})} \quad \text{Equação 22}$$

O método apresentado por Pereira Filho (2021) é fundamentado no modelo proposto por Regan (2015) e considera a aplicação de um carregamento simétrico nas bordas das lajes, assumindo uma laje armada em ambas as direções. A Figura 2.16 demonstra a configuração das linhas de ruptura estudadas, que foram baseadas em análises de lajes com geometria semelhante, como as investigadas por Beutel e Hegger (2002). Observa-se que os eixos de rotação nos pilares não apresentam uma disposição em forma de quadrado, devido à adaptação dos pilares para uma geometria próxima de um octógono. Essa adaptação permite delinear as possíveis linhas de ruptura do elemento, levando em conta a aplicação do carregamento em oito pontos equidistantes. A relação entre a deflexão das lajes examinadas e as linhas de ruptura identificadas resulta na Equação 23, utilizada para determinar a carga de ruptura das lajes (V_{flex}). A Equação 24 descreve o cálculo do momento resistente (M_R).

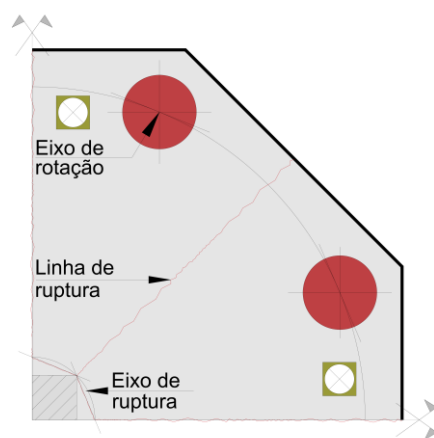


Figura 2.16 – Distribuição das linhas de ruptura para as lajes deste trabalho (adaptado de Pereira Filho, 2021).

$$V_{flex} = 9,76m_R$$

Equação 23

Onde:

m_R é o momento resistente da laje dado por:

$$M_R = \rho \cdot f_y \cdot d^2 \left(1 - \frac{\rho \cdot f_y}{2 \cdot f_c} \right)$$

Equação 24

Onde:

ρ é a taxa de armadura de flexão das lajes;

f_y é a tensão de escoamento do aço;

d é a altura útil das armaduras;

f_c é a resistência média a compressão do concreto.

Na seção 4.4 deste trabalho, são apresentados os resultados obtidos por meio dos modelos de Ferreira (2010) e Pereira Filho (2021), utilizados para a determinação da resistência à flexão das lajes analisadas neste trabalho.

2.5 PESQUISAS RELACIONADAS

As pesquisas sobre ligação laje-pilar com ARCO ainda são muito limitadas. Todas as lajes ensaiadas estão com altura mínima inferior as recomendações normativas ACI 318 (2019); Eurocode 2 (2014) e NBR 6118 (2014), com exceção das investigadas por Ferreira *et al.* (2024), que integram a Série 1 deste trabalho.

As lajes lisas sem armadura de cisalhamento com ARCO foram comparadas ao banco de dados modificado de lajes lisas sem armadura de cisalhamento de Pereira Filho (2016). Esse comparativo é apresentado nas Figura 2.17 e Figura 2.18, onde pode ser observada a limitação de altura mínima (h_{min}) das lajes lisas realizadas com ARCO.

As pesquisas de Rao *et. al* (2012), Reis *et. al* (2015), Francesconi *et. al* (2016), Mahmoud *et. al* (2018), Xiao *et. al* (2019), Sahoo Sing *et. al* (2020), Leelatanon *et. al* (2022), Saadon, *et. al* (2022) e Ferreira *et. al* (2024), são apresentadas abaixo:

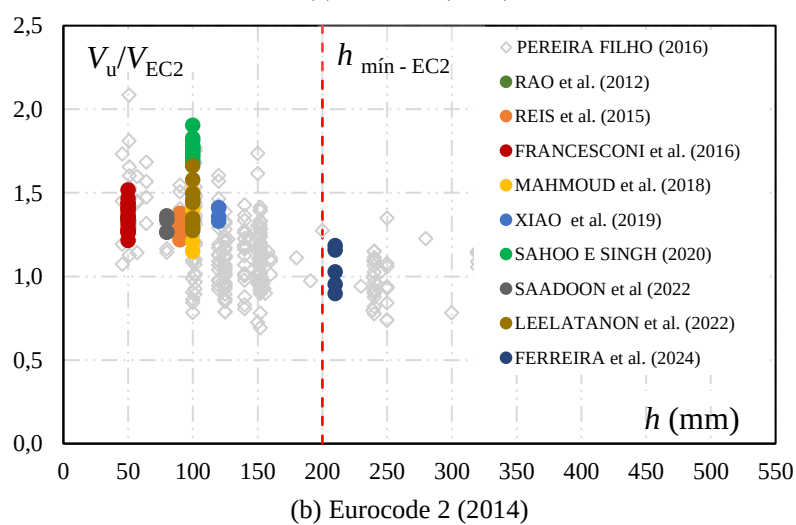
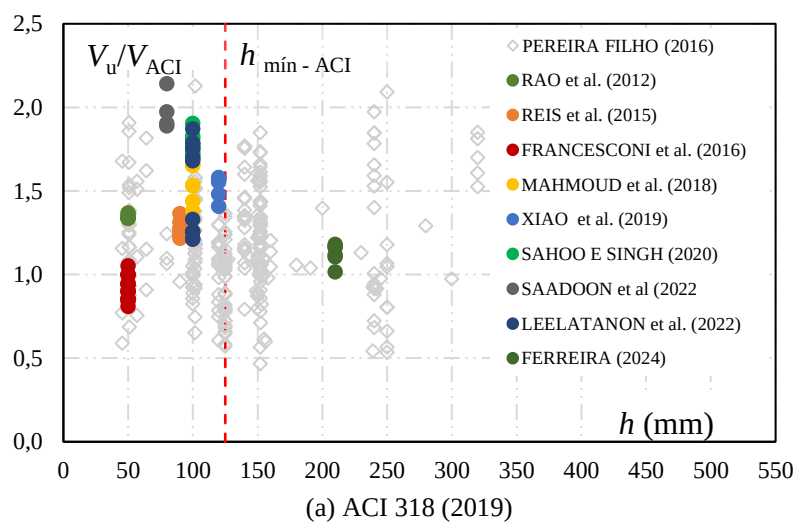


Figura 2.17 – Comparativo $V_u/V_{Teo} \times h_{\min}$ de lajes lisas sem armadura de cisalhamento com agregado natural e com agregado reciclado.

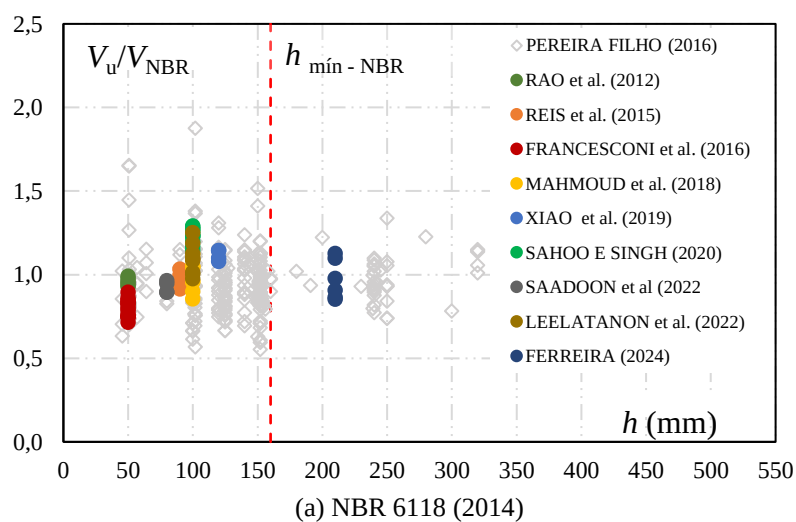


Figura 2.18 – Comparativo $V_u/V_{Teo} \times h_{\min}$ de lajes lisas sem armadura de cisalhamento com agregado natural e com agregado reciclado

2.5.1 Rao et al. (2012)

Este trabalho avalia o comportamento experimental de lajes lisas com substituição parcial e total de agregados naturais (AN) por reciclados (ARCO). O programa experimental utilizado era composto por 6 lajes lisas de concreto armado simplesmente apoiadas, com dimensões de 1100x1100x50 mm e diferentes taxas de ARCO (0, 20, 40, 60, 80 e 100 %), submetidas a um carregamento central aplicado em uma placa metálica de 100x100x20 mm afim de simular o pilar. O efeito da substituição de (AN) por ARCO, foi avaliado através dos seguintes parâmetros: modo de fissuração, cargas últimas, curvas de carga-deslocamento, rigidez e energia de absorção. A Tabela 2.2 apresenta os resultados dos parâmetros avaliados.

Tabela 2.2 – Resultados experimentais

Laje	%ARCO	f_c (MPa)	f'_c (MPa)	f_t (MPa)	P_{cr} (kN)	P_u (kN)
NCAC-S	0	43.33	34.35	3.35	14.6	48.2
RCAC-20-S	20	42.52	33.50	3.25	14.2	47.20
RCAC-40-S	40	40.96	32.37	3.16	14.2	45.80
RCAC-60-S	60	38.37	30.86	3.11	13.4	44.60
RCAC-80-S	80	35.48	28.40	2.88	12.8	42.80
RCAC-100-S	100	33.48	26.42	2.78	12.2	41.40

f_c : Resistência à compressão (cubo)
 f'_c : Resistência à compressão (cilindro)
 f_t : Resistência à tração por compressão diametral
 P_{cr} : Carga da primeira fissura
 P_u : Carga de última da laje

A rigidez das lajes foi avaliada a partir do gráfico de carga-deslocamento, a rigidez inicial foi medida pela inclinação da linha no instante anterior a carga da primeira fissura e a rigidez final foi medida pela inclinação da linha em cerca de 90% da carga final. O incremento de ARCO reduziu a degradação da rigidez, medida através da razão entre a rigidez final e a rigidez inicial, o que indica que quanto maior a degradação da rigidez menor é a ductilidade da laje.

De acordo com os resultados apresentados, os autores concluíram que o aumento do teor de ARCO resulta na redução da resistência à compressão e tração do concreto, assim como para carga última e carga de fissuração, de modo que até 40 % de substituição a redução é considerada admissível. No entanto, quanto ao padrão de falha por punção todas as lajes se comportaram de maneira semelhante independentemente da porcentagem de substituição de ARCO.

2.5.2 Reis *et al.* (2015)

Esta pesquisa objetivou avaliar o efeito da incorporação de agregado graúdo reciclado de concreto (ARCO) no comportamento à punção de lajes de concreto armado, através de investigações experimentais, numéricas e analíticas. O programa experimental, consistiu em um total de 8 lajes de concreto armado. As dimensões das lajes foram de 1100x1100x90 mm com uma placa de 150x150x30 mm posicionada entre a laje e o macaco hidráulico para simular um pilar. O carregamento foi aplicado de cima para baixo no centro das lajes em 8 pontos distribuídos em um padrão circular. A geometria geral, as dimensões das lajes, bem como as armaduras longitudinais e a localização dos apoios são apresentadas na Figura 2.19. Vale ressaltar que não foram utilizadas armaduras de cisalhamento. O concreto foi especificado para ter uma resistência de compressão mínima aos 28 dias de 30 MPa.

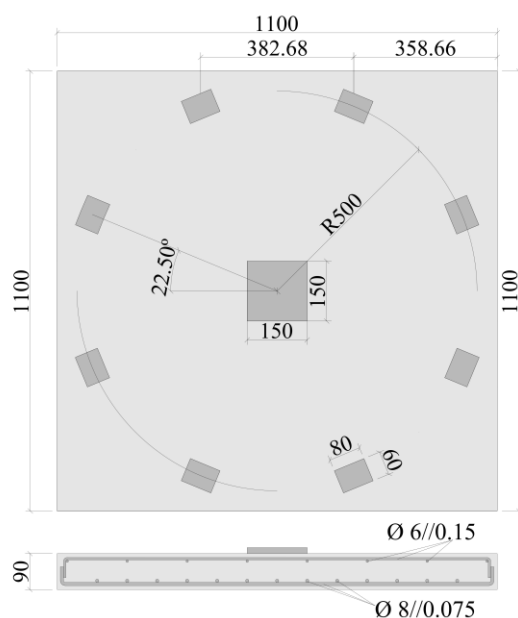


Figura 2.19 - Geometria geral dos modelos - vista superior e seção.

Nesta pesquisa, a principal variável de estudo incluiu 4 taxas de substituição de agregado natural (AN) por ARCO: 0%, 20%, 50% e 100%, considerando duas lajes por taxa de substituição. As propriedades do concreto no estado fresco foram avaliadas quanto ao teste de abatimento de tronco de cone (“*slump test*”) e a densidade aparente. Este último, diminuiu com o ARCO, justificado pela menor densidade do ARCO em relação ao AN. Para avaliar as propriedades mecânicas de cada tipo de concreto usado para moldar as lajes foram realizados os seguintes teste aos 28 dias: resistência a compressão, resistência a tração por compressão

diametral e módulo de elasticidade. A Tabela 2.3 apresenta as principais características das lajes analisadas, assim como a redução das propriedades mecânicas do concreto reciclado em relação ao concreto de referência ($\Delta_{RC,28}$).

Tabela 2.3 - Características das lajes ensaiadas (adaptado de Reis *et al.*, 2015).

Laje	Teor de substituição (%)	Resistência à compressão (cubo)		Resistência à tração por compressão diametral		Módulo de elasticidade	
		$f_{cm,28}$ (MPa)	$\Delta_{RC,28}$ (%)	$f_{ctm,28}$ (MPa)	$\Delta_{RC,28}$ (%)	$E_{cm,28}$ (GPa)	$\Delta_{RC,28}$ (%)
RC-1	0	46,8 ± 2,0	-	3,17 ± 0,42	-	33,7 ± 0,6	-
RC-2	0	46,8 ± 2,0	-	3,17 ± 0,42	-	33,7 ± 0,6	-
C20-1	20	44,3 ± 2,3	-5,4	2,90 ± 0,24	-8,3	32,8 ± 0,8	-2,7
C20-2	20	44,3 ± 2,3	-5,4	2,90 ± 0,24	-8,3	32,8 ± 0,8	-2,7
C50-1	50	46,6 ± 1,0	-0,5	2,94 ± 0,21	-7,0	32,7 ± 0,7	-3,1
C50-2	50	46,6 ± 1,0	-0,5	2,94 ± 0,21	-7,0	32,7 ± 0,7	-3,1
C100-1	100	45,6 ± 1,2	-2,5	2,86 ± 0,32	-9,5	31,5 ± 0,6	-6,7
C100-2	100	45,6 ± 1,2	-2,5	2,86 ± 0,32	-9,5	31,5 ± 0,6	-6,7

Primeiramente foram analisadas as curvas de carga-deslocamento medidas através de transdutores, onde foi verificada uma redução na rigidez geral das lajes. Esta redução foi mais evidente no estado não-fissurado (2% para laje C20, 16% para laje C50 e 22% para laje C100). Por outro lado, observou-se que a rigidez do estado não fissurado parece não ter sido afetado pela incorporação de ARCO, isso ocorre devido as armaduras cuja contribuição para rigidez das lajes é mais importante nesse estado, diminuindo assim a influência do concreto na rigidez total.

Outra análise importante diz respeito ao padrão de fissuração das lajes. A carga de fissuração apresentou uma tendência decrescente com a incorporação de ARCO. Nas lajes C20 e C50 apresentaram redução de cerca de 3% e para as lajes C100 uma redução mais significativa de 21%.

Quanto a resistência a punção verificou-se que a incorporação de ARCO não afetou significativamente o comportamento das lajes, com variação máxima de 4,8% para C20. Para lajes C100 a redução foi de apenas 2%, sendo justificado pela incerteza experimental. A comparação das propriedades mecânicas do concreto e a resistência à punção das lajes apresentou uma ligeira correlação, uma vez que, a ligeira redução da resistência à compressão apresentada pelas misturas com ARCO parece explicar o comportamento das lajes similar as lajes correspondentes.

O autor afirma que duas razões explicam a ligeira influência de incorporação de ARCO na resistência à punção em lajes de concreto: menor resistência mecânica do ARCO e melhor ligação entre a pasta de cimento e o ARCO devido ao maior teor de cimento, porosidade e rugosidade, quando comparado com AN. Desse modo, a resistência à punção é influenciada por essas propriedades dos agregados ao longo do plano de cisalhamento das fissuras, os dois efeitos compensaram um ao outro, levando a uma resistência à punção semelhante.

O estudo analítico feito buscou avaliar a precisão relativa das formulações disponíveis nas normas internacionais para prever a força de punção em lajes de concreto armado. Em particular, as seguintes diretrizes foram analisadas: Eurocode 2 (2004), ACI 318 (2011) e *fib* Model Code 2010 (2013), de modo que este último apresentou as previsões mais precisas.

2.5.3 Francesconi *et al.* (2016)

Este artigo relata a avaliação experimental do comportamento à punção de lajes de concreto armado produzidas com agregados miúdo e graúdo reciclados, onde os mesmos foram obtidos a partir da demolição de estruturas de concreto.

Quanto ao programa experimental, este foi realizado com 15 lajes com dimensões de 1100x1100x50 mm e foram utilizadas 5 taxas de substituição: 0, 30, 50, 80 e 100%. Cada laje foi simplesmente apoiada por vigas de aço nas quatro bordas. A carga foi aplicada no centro de cada modelo através de uma placa de aço e 200x200x5 mm, simulando um pilar. A Figura 2.20 apresenta o sistema de ensaio utilizado.

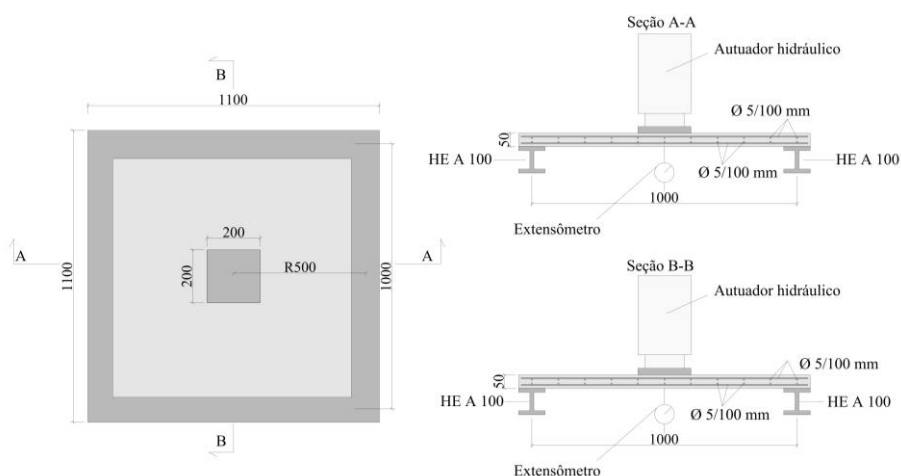


Figura 2.20 – Características dos modelos e sistema de ensaio (adaptado de Francesconi *et al.*, 2016).

As principais investigações foram realizadas a partir dos padrões de ruptura, cargas finais e curvas de carga deflexão. Além disso, comparações e análises das normas internacionais (ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004) e *fib* Model Code 2010 (2013) para lajes submetidas à punção também foram desenvolvidas. Os autores relatam uma redução na resistência a compressão, tração e módulo de elasticidade do concreto com a substituição do agregado natural pelo reciclado. No entanto, o comportamento das lajes à punção foi detectado independentemente da presença dos agregados reciclados, uma vez que a redução da resistência observada nos corpos de prova do concreto não refletiu diretamente na redução das cargas últimas das lajes com ARC.

Os modelos teóricos das normas internacionais avaliados pelos autores apresentaram bom desempenho na análise de lajes com ARC, uma vez que a diferença média entre os modelos e os resultados experimentais foram de aproximadamente $\pm 18\%$, como pode ser observado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Resultados experimentais e teóricos (adaptado de Francesconi *et al.*, 2016).

Laje	ARC (%)	V _u		V _{rd, ACI}		V _{rd, EC2}		V _{rd, MC10}						
		Exp	Médio	$\lambda = 1$	$\lambda = 0,85$	$k = 3,39$	$k = 2$	Nível	I		II		III	
								kdg	1,14	2	1,14	2	1,14	2
								dg	12	0	12	0	12	0
NC0-1	0	72,50												
NC0-2		68,70	68,70	78,90	67,10	89,40	52,94		83,00	59,18	90,06	65,60	96,27	71,49
NC0-3		64,90												
RC1-1	30	64,90												
RC1-2		72,50	69,97	74,60	63,40	86,47	51,01		78,50	56,00	85,18	62,05	90,41	66,99
RC1-3		72,50												
RC2-1	50	64,90												
RC2-2		68,70	66,17	73,70	62,60	85,74	50,58		77,50	55,27	84,10	61,26	89,26	66,14
RC2-3		64,90												
RC3-1	80	68,70												
RC3-2		64,90	68,70	70,20	59,70	83,02	48,98		73,85	52,67	80,14	51,38	85,06	63,04
RC3-3		72,50												
RC4-1	100	68,70												
RC4-2		68,70	69,97	66,7	56,70	80,23	47,33		70,15	50,03	76,12	55,45	80,80	59,87
RC4-3		72,50												

No caso do ACI 318 (2014), deve ser avaliado o parâmetro λ que considera a densidade do agregado e pode modificar a resistência ao cisalhamento. Quanto ao Eurocode 2 (2004), o parâmetro k que avalia a esbeltez das lajes deve ser criteriosamente observado uma vez que a altura útil das lajes influencia diretamente no desempenho das mesmas. Por fim, o *fib* Model Code 2010 (2023) considera o parâmetro k_{dg} , referente a diâmetro máximo dos agregados, desempenha um papel importante para a avaliação da eficiência em todos os níveis de aproximação. Desse modo a autora ressalta que os parâmetros relacionados aos agregados e a esbeltez dos modelos, devem ser cuidadosamente avaliados principalmente quanto a sua relação com a resistência à punção.

2.5.4 Mahmoud *et al.* (2018)

Esta pesquisa avalia o comportamento experimental de lajes de concreto armado com diferentes teores de substituição de agregados naturais por agregados reciclados submetidas à ensaios de punção. No programa experimental, foram analisadas 8 lajes de concreto armado, utilizando dois tipos de agregado (natural e reciclado) e duas granulometrias (12.5 e 25 mm), com quatro taxa de substituição (0, 30, 60 e 100%). As lajes ensaiadas tinham dimensões de 1200x1200x100 mm, armadas nas duas direções com barras de 10 mm de diâmetro e cobrimento de 20 mm. O sistema de ensaio foi realizado com carregamento centrado nas 8 lajes ensaiadas simplesmente apoiadas em placas nas quatro bordas, conforme apresentado na Figura 2.21.

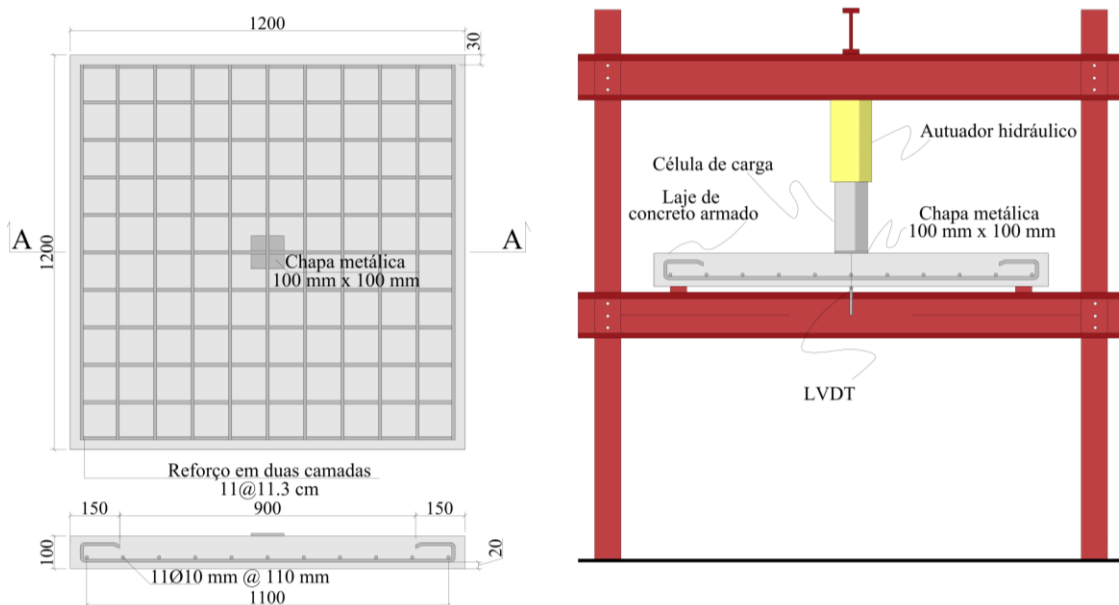


Figura 2.21 – Características das lajes e sistema de ensaio (adaptado de Mahmoud *et al.*, 2018).

Os resultados apresentados pelos autores indicaram redução no comportamento mecânico das lajes com concreto com agregados reciclados. Os primeiros parâmetros avaliados foram a resistência à compressão do concreto (f_c') e a resistência à tração (f_t) que apresentaram redução média de 11% para o concreto com agregado com granulometria de 12,5 mm e 13 % para granulometria de 25 mm. A carga da primeira fissura e a carga última diminuem com o aumento do teor de substituição e diminuem com a redução da granulometria do agregado.

As lajes foram comparadas analiticamente através de códigos internacionais de modo que todos foram considerados conservadores na estimativa da capacidade resistente à punção dos modelos ensaiados, de modo que a norma que mais se aproximou dos resultados experimentais foi o Eurocode 2 (2004). A Tabela 2.5 apresenta os resultados encontrados neste trabalho.

Tabela 2.5 – Resultados experimentais e teóricos (adaptado de Mahmoud *et al.*, 2018).

Laje	ARC (%)	$\emptyset$ agregado (mm)	f_c' (MPa)	F_t (MPa)	P_{cr} (kN)	P_u (kN)	Energia de absorção (kN m)	P_{ACI} (kN)	P_{EC2} (kN)	P_u/P_{ACI}	P_u/P_{EC2}
S ₁	0	12,5	36,9	3,8	115,8	157,5	0,652	95,4	128,7	1,65	1,22
S ₃	30		34,5	3,71	105,1	153	0,591	'	125,9	1,66	1,22
S ₅	60		32,5	3,58	95,4	137,5	0,471	89,6	123,4	1,53	1,11
S ₇	100		31,6	3,5	85,5	122	0,360	88,3	122,3	1,38	1,00
S ₂	0	25	39,7	3,91	120,2	172,5	0,773	98,9	131,9	1,74	1,31
S ₄	30		36,4	3,73	110,3	157	0,630	94,7	128,1	1,66	1,23
S ₆	60		34,1	3,67	100,1	140,5	0,476	91,7	125,3	1,53	1,12
S ₈	100		33,6	3,63	90,3	131	0,403	91,1	124,8	1,44	1,05

2.5.5 Sahoo e Singh (2020)

A pesquisa de Sahoo e Singh (2020), analisou o comportamento à punção de 12 amostras quadradas representativas de painéis de laje plana com cada amostra tendo dimensões 1200 × 1200 x 100 mm as lajes de concreto armado foram confeccionadas com teores de substituição de agregados naturais por agregados reciclados de 0, 50 e 100% para dois tipos de concreto, normal e media resistência com taxas de armadura de flexão igual a 1,16%. A geometria das lajes ensaiadas e o sistema de ensaio utilizado são apresentadas na Figura 2.22.

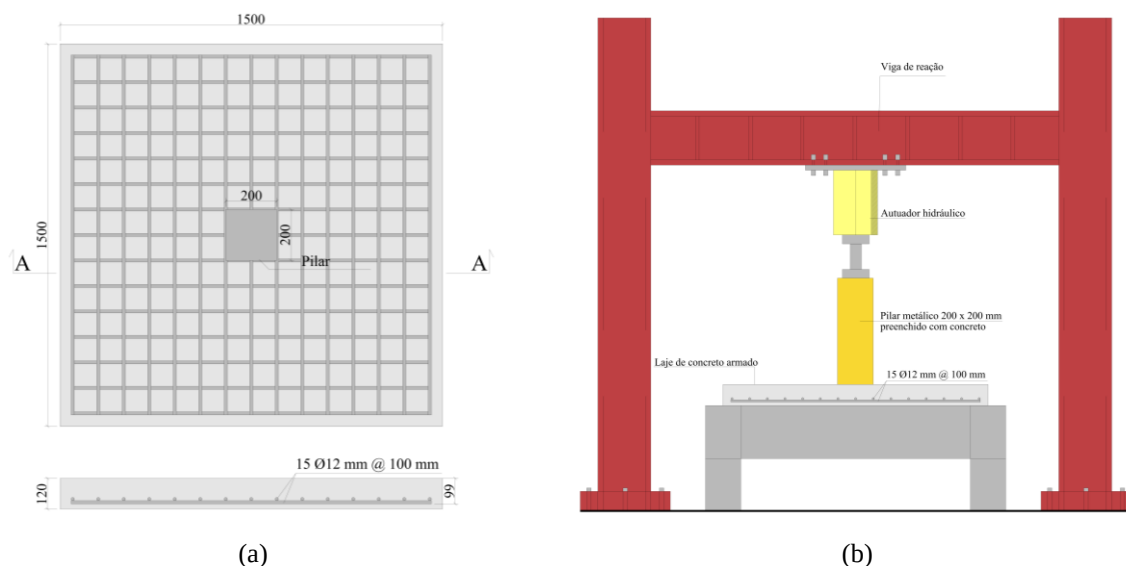


Figura 2.22 – (a) Geometria das lajes ensaiadas e (b) sistema de ensaio (adaptado de Sahoo e Singh (2020)).

Os autores apontam que para os dois grupos de resistência do concreto, não foram observados efeitos significativos, assim como para o comportamento resistente à punção. As recomendações normativas utilizadas pelos autores foram o ACI 318 (2019) e o Eurocode 2 (2004) que apresentaram previsões conservadoras. A Tabela 2.6 apresenta os resultados experimentais de Sahoo e Singh (2020).

Tabela 2.6 – Resultados experimentais e analíticos (adaptado de Sahoo e Singh, 2020).

Laje	f_c (MPa)	Carga de punção experimental (kN)		V_{flex} (kN)	Previsões de carga conforme critérios normativos			
					ACI 318 (2014)		EC2 (2004)	
		V_e	$V_{média}$		V_{aci}	$V_{média}/V_{aci}$	V_{ce}	$V_{média}/V_{ce}$
N0-1	29,8	205,2	207,29	237,2	122,8	1,68	135,6	1,52
N0-2		209,4						
N50-1	28,4	211,5	214,23	235,7	119,9	1,78	133,46	1,6
N50-2		217						
N100-1	29,4	218,9	224,43	236,8	121,9	1,84	134,95	1,66
N100-2		230						
M0-1	43,7	259,3	254,72	246,7	148,7	1,71	154,1	1,65
M0-2		250,1						
M50-1	43,5	252,6	254,18	246,6	148,43	1,71	153,8	1,65
M50-2		255,8						
M100-1	43	257,1	258,57	246,4	147,57	1,75	153,28	1,68
M100-2		260,1						

2.5.6 Xiao *et. al* (2019)

O trabalho de Xiao *et al.* (2019) objetivou compreender a influência da incorporação de agregado graúdo reciclado de concreto no comportamento à punção de 8 lajes de concreto armado, por meio de investigações experimentais. Das 8 lajes, 4 possuíam agregado reciclado e eram reforçadas com *fib* ras de aço, 3 eram confeccionadas com ARCO e sem *fib* ras e uma era de referência (sem *fib* ra e sem agregado reciclado). Os teores de substituição de agregado natural por reciclado foram 0%, 30%, 50% e 100%. As dimensões das lajes foram de 1.500 x 1.500 x 120 mm. A Figura 2.23 exibe o detalhamento das lajes e o sistema de ensaio utilizado.

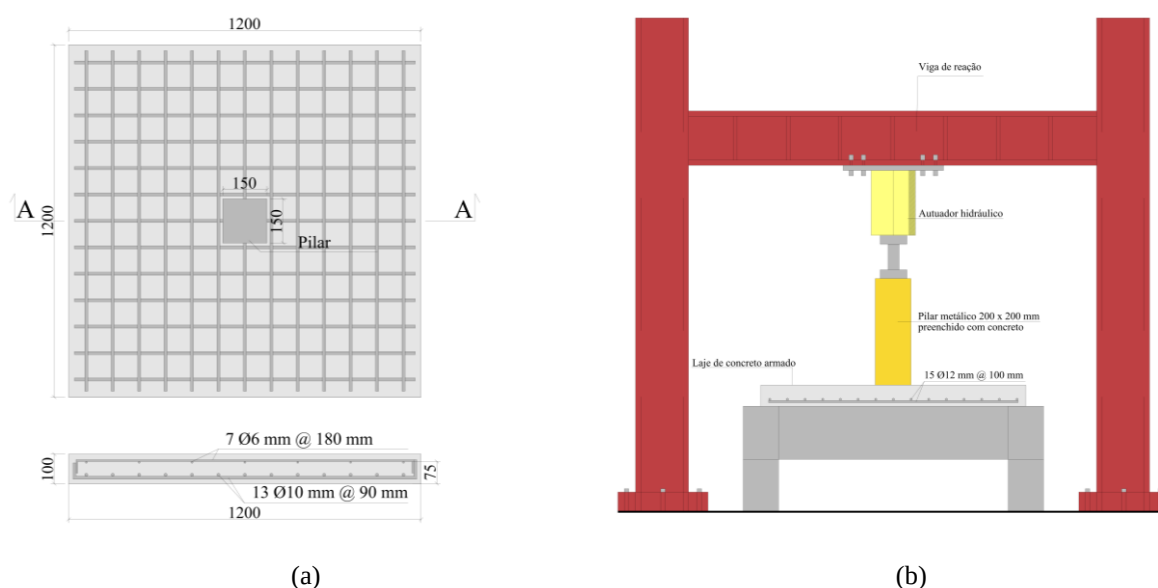


Figura 2.23 – Características das lajes ensaiadas e sistema de ensaio (adaptado de Xiao *et. al.*, 2019).

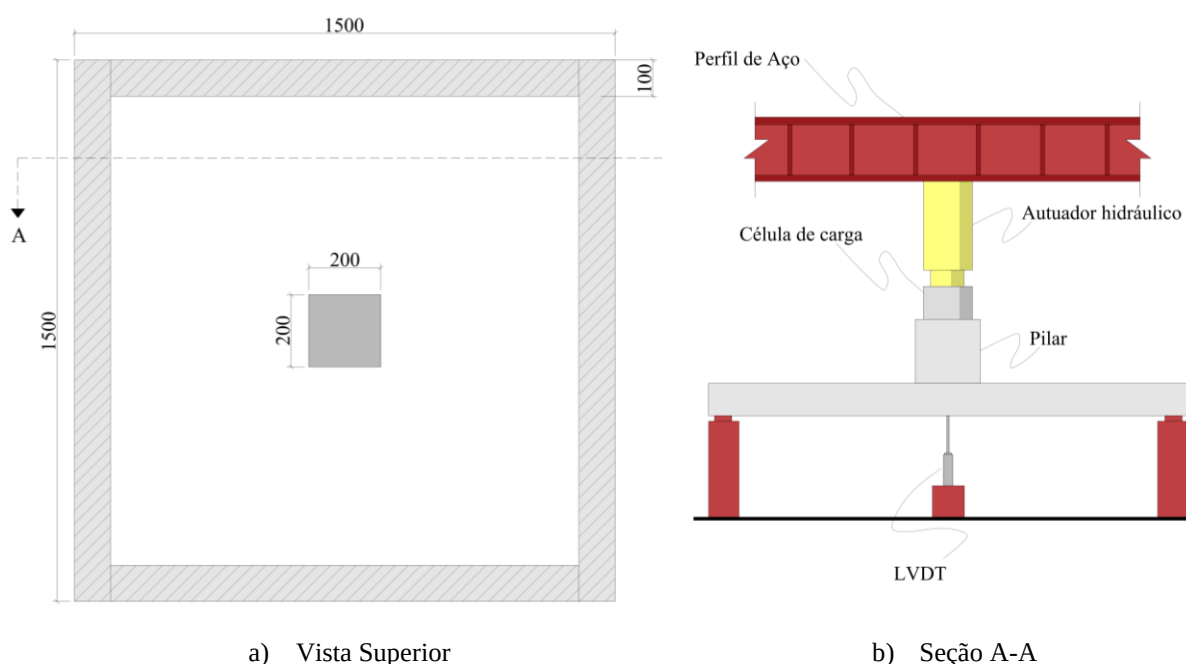
Acerca dos resultados obtidos os autores constataram que as lajes com adição de *fib* ras de aço apresentaram aumento na resistência à punção em cerca de 7% a 15%, e ainda melhora na ductilidade, deformação e consumo de energia. Verificou-se também que as lajes com agregado reciclado apresentaram resistência à punção e ao cisalhamento menor do que a da laje de referência, sendo esse declínio proporcional ao aumento da porcentagem de substituição do ARCO. As lajes foram comparadas analiticamente somente com as prescrições normativas do Eurocode 2 (2004) que se mostrou inseguro para os modelos estudados pelos autores, conforme apresentado na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Resultados experimentais e analíticos. (adaptado de Xiao *et al.*, 2019).

Laje	$f_{cu,k}$ (MPa)	f_{ck} (MPa)	P_u^{calc} (kN)	P_u (kN)	P_u / P_u^{calc}
RAC0	52,25	43,72	270,62	320,00	0,85
RAC30-0%	44,65	36,34	254,44	313,40	0,81
RAC50-0%	38,95	31,16	241,73	307,10	0,79
RAC100-0%	37,05	29,64	237,73	303,40	0,78
SFRAC50-0.5%	42,75	34,55	284,60	0 366,8	0,78
SFRAC50-1%	43,70	35,45	321,74	370,60	0,87
SFRAC100-0.5%	38,00	30,40	272,71	331,20	0,82
SFRAC100-1%	40,85	32,78	313,45	350,20	0,90

2.5.7 Leelatanon *et al.* (2020)

Esta pesquisa analisou o comportamento de cisalhamento por punção de lajes bidimensionais de concreto com agregado reciclado. Dez lajes de 1500 mm × 1500 mm × 100 mm foram testadas, sendo oito com concreto reciclado e duas de controle com concreto convencional, como ilustrado na Figura 2.24. Os autores utilizaram agregado reciclado de concreto graúdo (ARCO) em níveis de substituição de 25%, 50%, 75% e 100%, com duas taxas de armadura de flexão (0,8% e 1,5%).

Figura 2.24 – Dimensões das lajes ensaiadas – adaptado de Leelatanon *et al.* (2022)

Os resultados indicaram que a resistência ao cisalhamento por punção das lajes com 100% de ARCO foi 6,5% e 9% menor em comparação com as lajes de concreto convencional para armaduras de 1,5% e 0,8%, respectivamente. Aumento da armadura de flexão pode aumentar a

capacidade de cisalhamento em até 45%. Os autores realizaram uma análise de um banco de dados com 44 lajes de ARCO da literatura e as 8 testadas neste estudo que revelou previsões conservadoras de resistência ao cisalhamento pelo ACI 318 (2019), especialmente para lajes com menor taxa de armadura e flexão (<0,6%). Já o Eurocode 2 (2014) forneceu resultados mais conservadores em todos os níveis de substituição de ARCO e taxas de armadura, como é possível observar na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Resultados experimentais e analíticos (adaptado).

Laje	ARCO (%)	f_c (MPa)	Carga de punção experimental (kN)	Previsões de carga conforme critérios normativos			
				ACI 318 (2014)		EC2	
				V_{ACI}	V_{exp}/V_{aci}	V_{EC2}	V_{exp}/V_{EC2}
RCA-0-10	0	28,10	260,90	139,45	1,87	199,90	1,30
RCA-25-10	25	27,20	245,30	137,20	1,79	197,80	1,24
RCA-50-10	50	24,30	217,80	129,68	1,68	190,50	1,14
RCA-75-10	75	23,10	214,80	126,43	1,70	187,30	1,15
RCA-100-10	100	22,20	217,50	123,95	1,76	188,40	1,16
RCA-0-20	0	26,50	180,00	135,42	1,33	159,00	1,13
RCA-25-20	25	24,50	164,00	130,21	1,26	154,90	1,06
RCA-50-20	50	23,50	159,80	127,52	1,25	152,80	1,05
RCA-75-20	75	24,10	156,90	129,14	1,22	154,90	1,02
RCA-100-20	100	22,30	150,40	124,23	1,21	149,50	1,01

Os autores afirmam que os testes realizados nas lajes revelaram importantes aspectos sobre fissuração e falhas por punção. As lajes com 0,8% de armadura apresentaram fissuras com raio médio de 500 mm a partir do centro da coluna, propagando-se até as bordas, com larguras superiores a 1 mm. Já as lajes com 1,5% de armadura mostraram propagação de fissuras menos severa devido ao aumento da armadura de flexão, que também melhorou a capacidade de cisalhamento. As respostas de carga-deflexão mostraram rigidez linear inicial, que foi degradada conforme as fissuras aumentavam. O aumento do conteúdo de ARCO (agregado reciclado de concreto) reduziu a capacidade de cisalhamento e aumentou as deflexões das lajes, especialmente com 100% de ARCO, embora a rigidez fosse significativamente melhorada com maior armadura de flexão. A absorção de energia variou, com aumento nas lajes com maior substituição de ARCO. Comparações com os códigos ACI 318 (2019) e Eurocode 2 (2014) mostraram que o Eurocode 2 (2014) foi mais preciso, especialmente para lajes com 100% de ARCO, prevendo até 40% mais resistência ao cisalhamento de punção. A análise de linha de

escoamento confirmou falha por cisalhamento de punção, destacando a importância da armadura de flexão para o desempenho das lajes com ARCO.

2.5.8 Saadoon *et al.* (2022)

O trabalho realizado pelos autores apresentou um estudo experimental sobre o comportamento ao cisalhamento por punção de lajes planas de concreto armado fabricadas com agregado graúdo reciclado (ARCO), além da incorporação de *fib* ras de aço e reforço com polímero reforçado com *fib* ra de carbono (PRFC). As proporções de substituição do agregado graúdo natural por ARCO foram de 0%, 35%, 55% e 75%, e a fração volumétrica das *fib* ras de aço utilizada no estudo foi de 1,2%. Dois métodos de reforço foram empregados: reforço colado externamente (EBR) e reforço colado externamente em sulcos (EBROG).

Os autores moldaram 16 lajes quadradas com dimensões de 800 mm x 800 mm e 80 mm de espessura. As lajes foram projetadas para romper por punção. Todas as lajes foram simplesmente apoiadas nas quatro bordas e testadas sob carga vertical aplicada por meio de um pilar central quadrado. A Figura 2.25 apresenta os detalhes das lajes ensaiadas pelos autores.

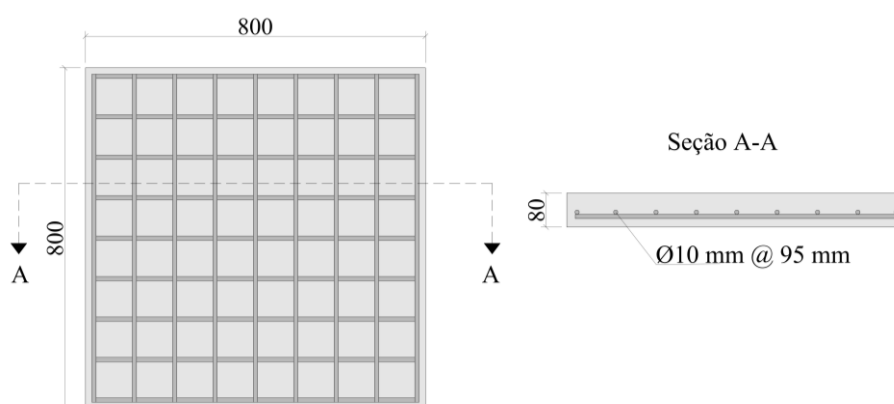


Figura 2.25 – Detalhes dos modelos ensaiados por Saadon *et al.* (2022)

Os resultados dos ensaios demonstraram que as propriedades mecânicas, as cargas últimas e as cargas na primeira fissura diminuíram com o aumento da proporção de substituição por agregado graúdo reciclado (ARCO).

A substituição do agregado natural por ARCO resultou em uma redução na resistência à compressão de 9,5%, 19,1% e 22,9% para proporções de substituição de 35%, 55% e 75%, respectivamente. Essa redução foi compensada de forma eficiente nas lajes com adição de *fib* ras de aço.

Os autores observaram que a carga de punção, a deflexão e a carga na primeira fissura diminuíram com o aumento da proporção de ARCO. Entretanto, essas propriedades apresentaram melhorias significativas com a adição de *fib* ras de aço às misturas de concreto. Com o aumento do teor de ARCO, a carga última de punção foi reduzida em 7,9%, 9,1% e 10,2% para proporções de substituição de 35%, 55% e 75%, respectivamente. A adição de *fib* ras de aço aumentou a capacidade de cisalhamento por punção em aproximadamente 16% a 25% e também contribuiu para a melhoria da ductilidade das lajes.

Os autores não realizaram análises comparativas entre os resultados experimentais e estimativas normativas.

2.5.9 Análise dos estudos prévios sobre o uso de ARCO

Pesquisas realizadas por Reis *et al.* (2015), Xiao *et al.* (2019) e Mahmoud *et al.* (2018) demonstraram que a substituição de agregados graúdos naturais (AN) por agregados graúdos reciclados (ARCO) pode reduzir a rigidez à flexão das lajes testadas. Nos experimentos conduzidos por Rao *et al.* (2012), Reis *et al.* (2015), Mahmoud *et al.* (2018) e Saadoon *et al.* (2022), também foi observada uma redução na carga de fissuração das lajes devido à incorporação de ARCO graúdo.

Adicionalmente, estudos de Francesconi *et al.* (2016), Leelatanon *et al.* (2020) e outros indicaram reduções na resistência à punção, acompanhadas por diminuições nos valores de resistência à compressão (f_c), resistência à tração (f_{ct}) e módulo de elasticidade (E_c). Por outro lado, nos testes conduzidos por Sahoo e Singh (2020), não foram identificadas diferenças significativas na resposta ou na resistência à punção em função do uso de ARCO graúdo, já que as propriedades mecânicas do concreto reciclado permaneceram dentro da mesma faixa do concreto de referência com AN graúdo.

É importante destacar que os testes disponíveis na literatura foram realizados em modelos em escala reduzida, que não representam fielmente as dimensões reais das conexões laje-pilar em edifícios com lajes lisas. Além disso, é amplamente reconhecido que o *size effect* tem um impacto significativo na resistência ao cisalhamento por punção. Por essa razão, os resultados e conclusões apresentados pelos autores podem ser considerados questionáveis, especialmente no que diz respeito à aplicação em estruturas reais.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este capítulo apresenta duas séries de ensaios de 10 modelos de ligações laje-pilar com agregados graúdos reciclados de concreto (ARCO) submetidos à carregamento simétrico. Na literatura, os modelos de ligação laje-pilar ensaiados, apresentam dimensões não condizentes com a realidade, modelos em escala reduzida. Assim, os ensaios realizados neste programa experimental avaliaram o comportamento à punção de lajes com ARCO, em escala real. A primeira série teve o objetivo de avaliar o comportamento à punção das lajes sem armadura de cisalhamento com ARCO, analisando a influência da taxa de substituição do agregado natural (AN) por agregado graúdo reciclado de concreto (ARCO). A segunda série de ensaios tem o objetivo de avaliar o comportamento das lajes à punção com armadura de cisalhamento, conector e estribo individual, analisando a eficiência da armadura de cisalhamento em acréscimos de resistência em ligações lajes-pilar com ARCO. Todos os modelos foram ensaiados no Laboratório de Análise de Estruturas e Materiais (LACEM) na Universidade Federal do Pará campus de Tucuruí.

3.2 CARACTERÍSTICAS DAS LAJES

As lajes apresentavam formato octogonal com distâncias entre lados opostos de 2,5 m e 210 mm de espessura. As lajes foram submetidas a um carregamento central ascendente através de um pilar central de 300 mm de lado e altura. O padrão de carregamento garantiu que todas as lajes fossem ensaiadas com apoios distribuídos de modo circunferencial em pontos equidistantes utilizando um raio de carregamento de 1125 mm. A Figura 3.1 apresenta a geometria das lajes ensaiadas.

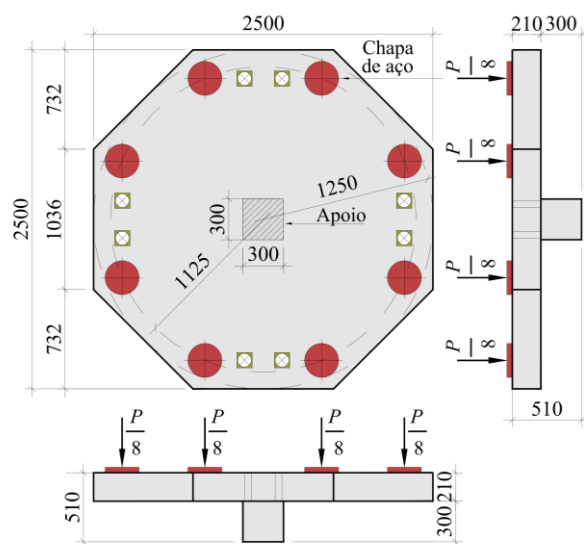


Figura 3.1 –Geometria das lajes

A nomenclatura das lajes foi definida com base nas principais características de cada modelo, apresentada na Tabela 3.1. O nome de cada modelo iniciou com a letra “S” proveniente do termo em inglês “slab”. As lajes da primeira série, não apresentaram armaduras de cisalhamento e foram produzidos dois modelos de referência, sem ARCO: S-0,7-0 e S-1,2-0. Os demais modelos foram diferenciados com base no teor de ARCO (0%, 30% ou 100%) e na taxa de armadura de flexão (0,7% ou 1,2%). Para a segunda série, as lajes foram diferenciadas conforme o teor de ARCO (0% ou 100%) e o tipo de armadura de cisalhamento, sendo denominadas como “SS” para os modelos com conectores de aço do tipo “double headed studs” e “ST” para as lajes com estribo individual do tipo “single leg”.

Tabela 3.1 – Nomenclatura das lajes

	Nomenclatura	ARCO (%)	ρ (%)	Tipo de armadura de cisalhamento
Série 1	S-0,7-0	0	0,66	-
	S-0,7-30	30	0,65	-
	S-0,7-100	100	0,65	-
	S-1,2-0	0	1,23	-
	S-1,2-30	30	1,23	-
	S-1,2-100	100	1,22	-
Série 2	SS-1,2-0	0	1,21	Conector de aço
	SS-1,2-100	100	1,19	
	ST-1,2-0	0	1,21	Estribo individual
	ST-1,2-100	100	1,21	

A Tabela 3.2 apresenta um resumo das características das lajes ensaiadas nas duas séries de ensaios. Na tabela são apresentados o teor de ARCO (% ARCO), a altura útil real das lajes medidas *in loco* (d), taxa de armadura de flexão (ρ), diâmetro das barras ($\varnothing_f$), tensão de escoamento (f_{ys}) e módulo de elasticidade (E_s) da armadura de flexão e taxa da armadura de cisalhamento (ρ_w), diâmetro das barras das armaduras de cisalhamento ($\varnothing_w$), tensão de escoamento das armaduras de cisalhamento (f_{yws}), módulo de elasticidade das armaduras de cisalhamento (E_{ws}), número de camadas, número de linhas, espaçamento entre a face do pilar e a primeira camada (S_0) e espaçamento entre camadas (S_r) das armaduras de cisalhamento.

Tabela 3.2 – Resumo das características das lajes

	Laje	ARCO (%)	d (mm)	f_c (MPa)	ρ (%)	$\varnothing_f$ (mm)	ρ_w (%)	$\varnothing_w$ (mm)	Nº cam	Nº linhas	S_0 (mm)	S_r (mm)
1ª Serie	S-0.7-0	0	162.5	20,73	0,66	12,5	-	-	-	-	-	-
	S-0.7-30	30	165	21,92	0,65							
	S-0.7-100	100	165	23,05	0,65							
	S-1,2-0	0	165	22,78	1,23	25						
	S-1,2-30	30	164,75	21,52	1,23							
	S-1.2-100	100	166,75	21,44	1,22							
2ª Serie	SS-1.2-0 ¹	0	159,7	23,76	1,21	16	0,55	10	8	3	80	100
	SS-1,2-100 ¹	100	162	23,03	1,19							
	ST-1,2-0 ²	0	159,8	20,38	1,21							
	ST-1,2-100 ²	100	160	19,95	1,21							

Obs: $\rho_w = A_{sw.1row} / sr(4c + \pi d)$

¹ armadura de cisalhamento tipo conector

² armadura de cisalhamento tipo estribo individual

Propriedades das armaduras:

$\phi 12.5$ mm: $f_{ys} = 624,28$ MPa; $E_s = 217,26$ GPa;

$\phi 16.0$ mm: $f_{ys} = 570,13$ MPa; $E_s = 198,21$ GPa

$\phi 25.0$ mm: $f_{ys} = 525,72$ MPa; $E_s = 207,97$ GPa

Estribos individuais: $f_{yws} = 453.3$ MPa e $E_s = 197.4$ GPa

Conectores de aço: $f_{ys} = 510,47$ MPa

A primeira série de ensaios investigou a resistência máxima à punção de lajes sem armadura de cisalhamento com incorporação de agregados graúdos reciclados de concreto (ARCO) para duas taxas diferentes de armadura de flexão. As lajes S-0,7-0 e S-1,2-0 foram as lajes de referência para cada taxa de armadura de flexão. As lajes S-0,7-30 e S-1,2-30 tinham 30 % de substituição de agregado natural (AN) por ARCO e as lajes S-0,7-100 e S-1,2-100 foram produzidas com 100% de ARCO.

A segunda série de ensaios foi idealizada afim de investigar a resistência máxima de lajes com ARCO submetidas à punção considerando o incremento de resistência das armaduras de cisalhamento, uma vez que as prescrições normativas recomendam a utilização das mesmas. Nesta série foi utilizada somente uma taxa de armadura de flexão, 1,2 %, para dois tipos de armadura de cisalhamento, nas lajes SS-1,2-0 e SS-1,2-100 foram utilizados conectores de aço e nas lajes SS-1,2-0 e SS-1,2-100 estribos individuais com arranjo em cruz. Nesta série, foram consideradas somente duas taxas de substituição de NA por ARCO, 0 e 100 %, uma vez que a primeira série de ensaios mostrou que o comportamento das lajes com 30% de ARCO foi semelhante ao comportamento das lajes com NA, conforme indicado na literatura.

3.3 ARMADURAS DE FLEXÃO

A Figura 3.2 apresenta o detalhamento da armadura de flexão das duas séries de ensaios. As armaduras de flexão foram constituídas de malhas de barras retas de aço CA-50 dispostas simetricamente em direções ortogonais nas faces superior e inferior das lajes. As lajes estudadas apresentaram taxas de armadura de flexão que garantissem resistências adequadas sem que houvessem rupturas indesejadas por flexão. A ancoragem de todas as barras de flexão foi feita através de ganchos tipo “U”. Os ganchos são posicionados envolvendo as barras superiores e outros as inferiores para evitar uma possível ruptura por delaminação. As lajes da 1ª série de ensaios contaram com duas taxas de armadura de flexão 0,7% e 1,2%. Para a taxa de armadura de flexão de 0,7%, as armaduras foram compostas por barras de 12.5 mm, espaçadas a 110 mm, com cobrimento de 30 mm. Para a taxa de armadura de flexão de 1,2%, as armaduras foram compostas por barras de 25 mm, espaçadas a 250 mm, com cobrimento de 30 mm.

As lajes da segunda série de ensaios apresentaram uma taxa de armadura de flexão de 1,2% e taxa de armadura de cisalhamento de 0,55% e foram dimensionadas para apresentar ruptura dentro da região da armadura de cisalhamento. As armaduras de flexão foram compostas por barras de 16.0 mm de 100 mm com cobrimento de 30 mm com pequenas alterações devido ao processo construtivo.

Para as duas séries de ensaios, as armaduras inferiores foram constituídas por barras de 10.0 mm, com o mesmo espaçamento das armaduras superiores, com o intuito de evitar a fissuração da laje durante a mobilização das mesmas e evitar a degradação total dos modelos após a ruptura por punção. As armaduras dos pilares, foram compostas por 8 barras de 12.5 mm de diâmetro

de aço CA-50 dispostas longitudinalmente e por estribos de 10.0 mm de diâmetro com espaçamento de 100 mm e 30 mm de cobrimento de concreto.

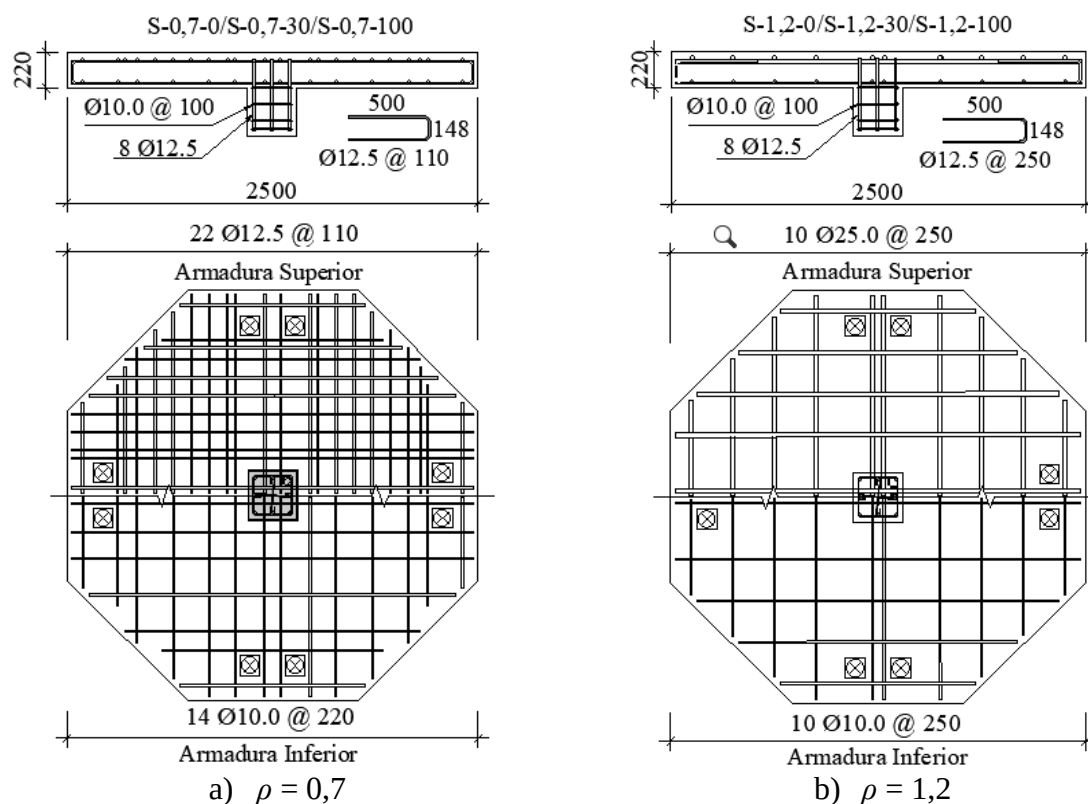


Figura 3.2 – Detalhamento da armadura de flexão - 1ª Série

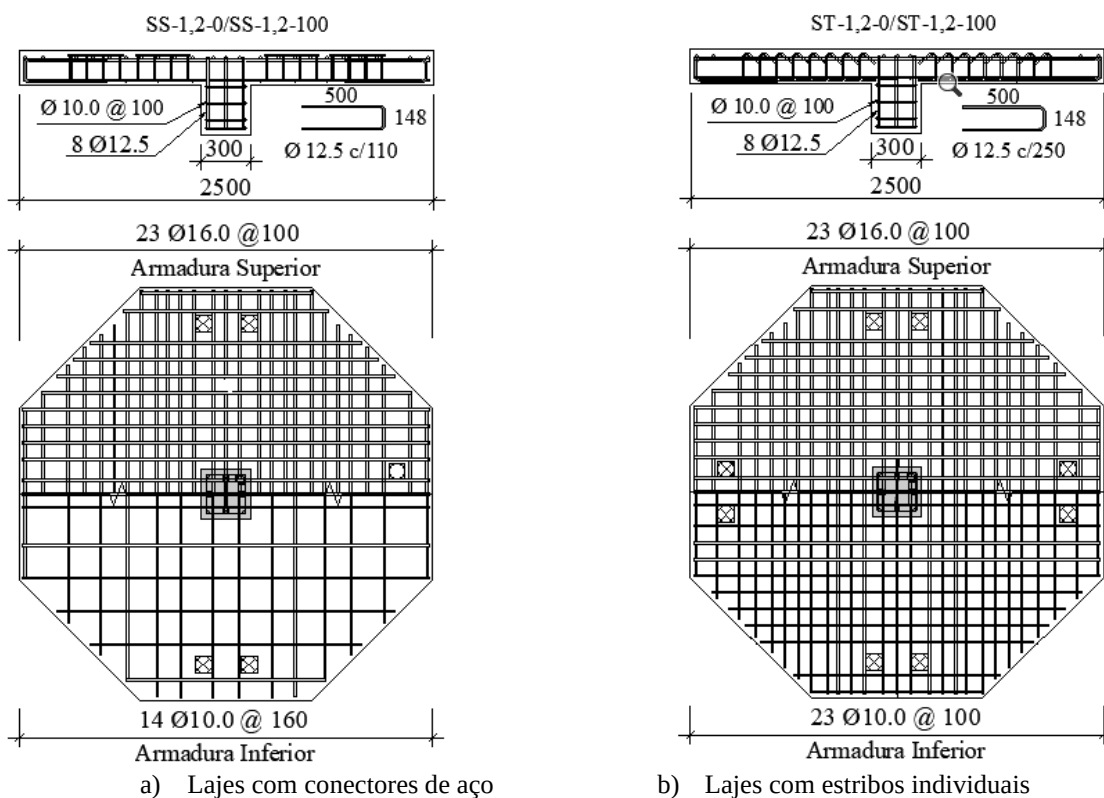


Figura 3.3 – Detalhamento da armadura de flexão - 2ª Série

3.4 ARMADURAS DE CISALHAMENTO

As lajes ensaiadas na segunda série apresentaram camadas de armadura de cisalhamento dispostas em arranjo cruciforme, com taxa de 0,55%, dispostas até próximo do apoio afim de garantir que a ruptura não ocorresse fora da região das armaduras de cisalhamento. A Figura 3.4 apresenta o detalhamento das armaduras de cisalhamento das lajes estudadas. Todos os conectores de aço tiveram produção industrial pela “TREJOR - Soluções metálicas” com suas cabeças produzidas por fusão da barra e soldadas as barras de suporte. Todos os estribos individuais foram produzidos manualmente com controle rigoroso da execução para garantia das dimensões de projeto. A Figura 3.5 apresenta imagens das armaduras de cisalhamento instaladas e a Figura 3.6 sua distribuição.

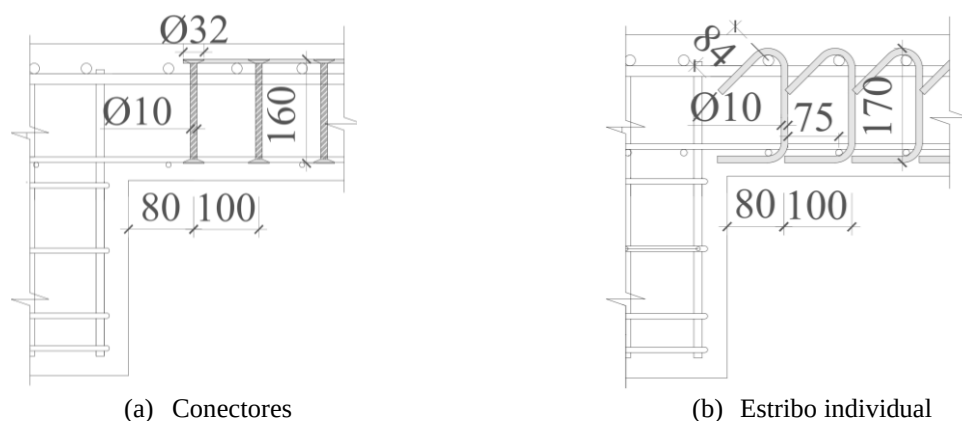


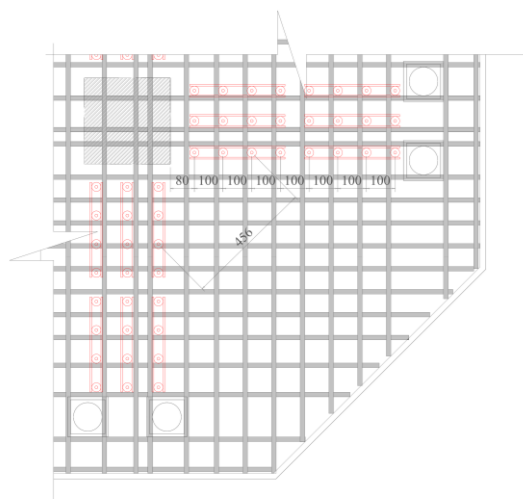
Figura 3.4 – Detalhamento das armaduras de cisalhamento



(a) Conectores

(b) Estribo individual

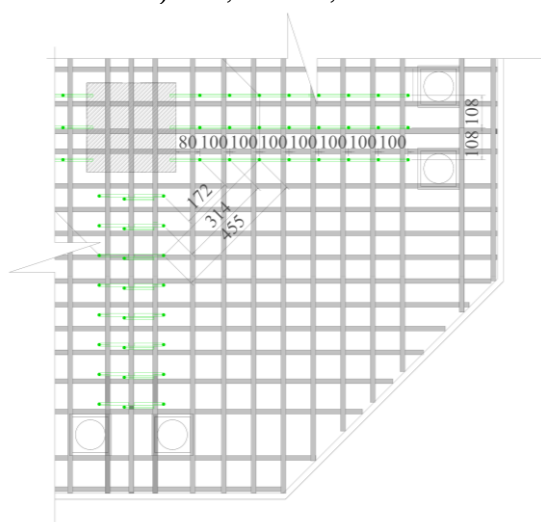
Figura 3.5 – Detalhe das armaduras de cisalhamento instaladas



a) SS-1,2-0/ST-1,2-100



b) SS-1,2-0/ST-1,2-100



c) ST-1,2-0/ST-1,2-100



d) ST-1,2-0/ST-1,2-100

Figura 3.6 – Distribuição das armaduras de cisalhamento.

3.5 INSTRUMENTAÇÃO

Para o monitoramento das deformações dos modelos foram instalados extensômetros elétricos de resistência (EER) e LVDT's (*Linear Variable Differential Transformer*) em pontos característicos das lajes.

3.5.1 Deslocamentos verticais

Os deslocamentos verticais nas lajes foram medidos em 11 pontos por meio de LVDT's – *Linear Variable Differential Transformer* (transdutores de variação de deslocamento linear), e potenciômetros fabricados pelas empresas KYOWA, LVDT Sensors e Gefran. A Figura 3.7 apresenta os pontos de monitoramento dos deslocamentos verticais nas lajes e o posicionamento

dos instrumentos. Os LVDTs foram fixados em perfis metálicos, os quais foram posicionados sobre as vigas de reação do sistema de ensaio, fazendo com que deslocassem em conjunto, funcionando como um “yoke”. O deslocamento no centro do pilar foi monitorado por meio do LVDT de número 6, medindo o deslocamento máximo durante os ensaios e os demais distribuídos ao longo do raio de carregamento possibilitando a construção de perfis de deslocamento.

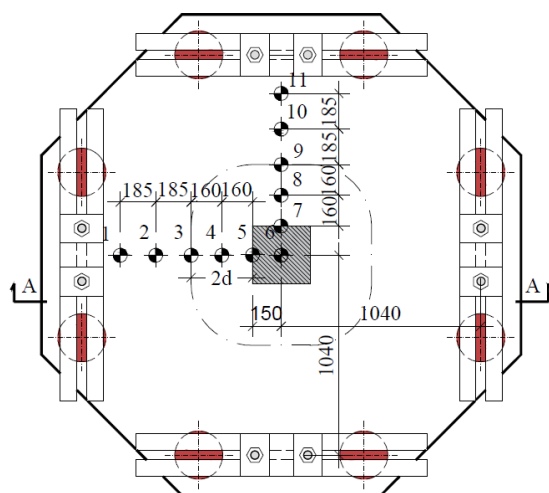


Figura 3.7 - Posicionamento dos LVDT's

3.5.2 Deformações nas armaduras de flexão e na superfície do concreto

O monitoramento das deformações do aço e do concreto foi realizado através de extensômetros elétricos de resistência (EER), com o intuito de acompanhar as deformações durante todas as etapas do carregamento. As medições das deformações nas armaduras de flexão foram realizadas a partir de dois extensômetros elétricos em cada ponto, de onde foram retiradas médias. Em virtude da simetria, a extensometria foi realizada somente em um quadrante das lajes. Os extensômetros nas armaduras de flexão foram dispostos em dois arranjos: radial, denominados FR, e tangencial denominados FC, para possibilitar a construção dos perfis de deformação e os raios de escoamento das lajes.

As deformações na superfície do concreto foram avaliadas a fim de se verificar o possível esmagamento do concreto. Os extensômetros colados na face comprimida do concreto foram posicionados na mesma seção das barras de flexão, permitindo que fosse definida a altura da linha neutra em todos os estágios de carregamento, nos sentidos tangencial e radial para a duas séries de ensaios. Os extensômetros CR4 e CC1 buscam medir as máximas deformações na superfície do concreto nos sentidos tangencial e radial, respectivamente, para evidenciar um

possível esmagamento da zona comprimida. A Figura 3.8 e a Figura 3.11 apresentam a distribuição dos EER's.

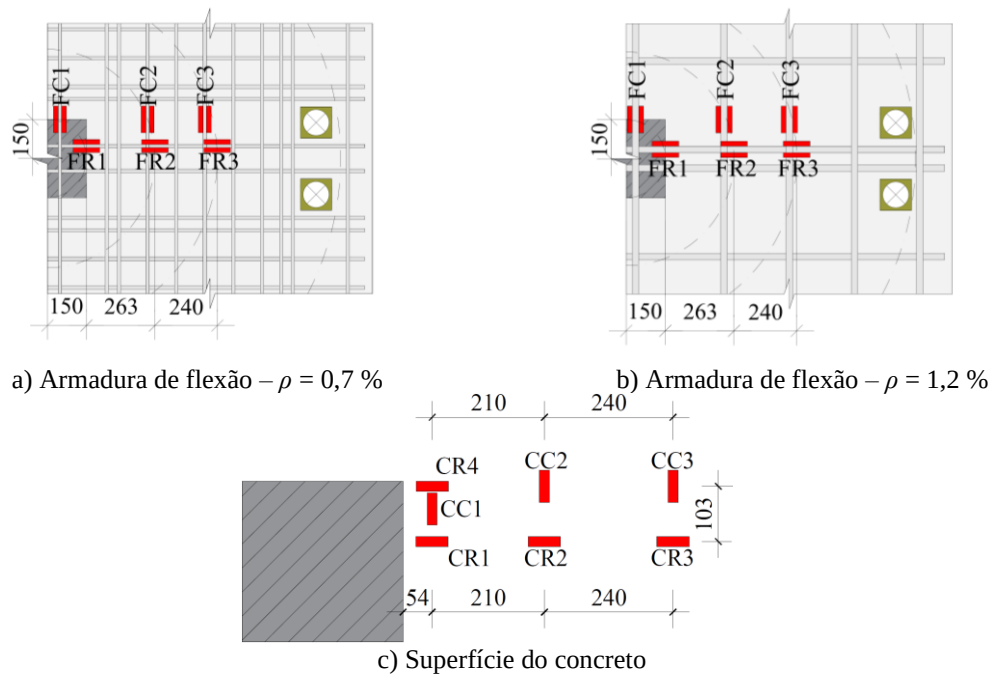


Figura 3.8 – Instrumentação das lajes – Série 1.

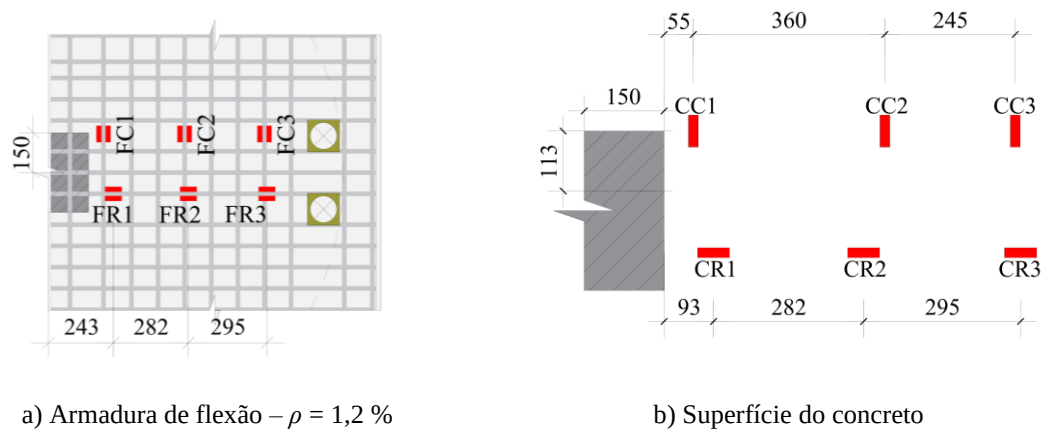


Figura 3.9 – Instrumentação das lajes – Série 2.

Em virtude da simetria, a extensometria foi realizada somente em um quadrante. As deformações nos tirantes de apoio do sistema de ensaio foram monitoradas através extensômetros elétricos durante os ensaios afim verificar a possibilidade de desbalanceamento de momentos. Foi descartada qualquer possibilidade de desbalanceamento no carregamento durante todos os ensaios.

3.5.3 Deformações nas armaduras de cisalhamento da 2ª Série

As deformações das armaduras de cisalhamento da segunda série de ensaios foram medidas através de extensômetros elétricos posicionados em faces opostas. O posicionamento dos sensores foi realizado ao longo das camadas até a primeira camada após uma distância de $2d$ da face do pilar permitindo a construções de perfis de deformações das armaduras de cisalhamento. A configuração do extensômetros nas armaduras de cisalhamento foi diferente para as lajes com 0% de ARCO e 100% de ARCO. Os extensômetros elétricos das lajes SS-1,2-0 e ST-1,2-0 foram posicionados afim de investigar a variação das deformações ao longo do corpo das barras de cisalhamento, verificando qualitativamente a influência da aderência das barras com o concreto. Para as lajes SS-1,2-0-100 e ST-1,2-100 foram instalados extensômetros elétricos somente na região central das barras de cisalhamento alinhadas aos eixos x e y das lajes uma vez que o tipo de agregado não influencia na aderência das barras com o concreto. A Figura 3.10 e a Figura 3.11 apresentam o detalhamento da instrumentação utilizada nas armaduras de cisalhamento nas lajes da segunda série. Assim como na primeira série, as lajes foram instrumentadas somente em um quadrante em virtude da simetria. O corte realizado nas figuras se deu 0,59.L, uma vez que o corte no eixo não apresentaria os extensômetros

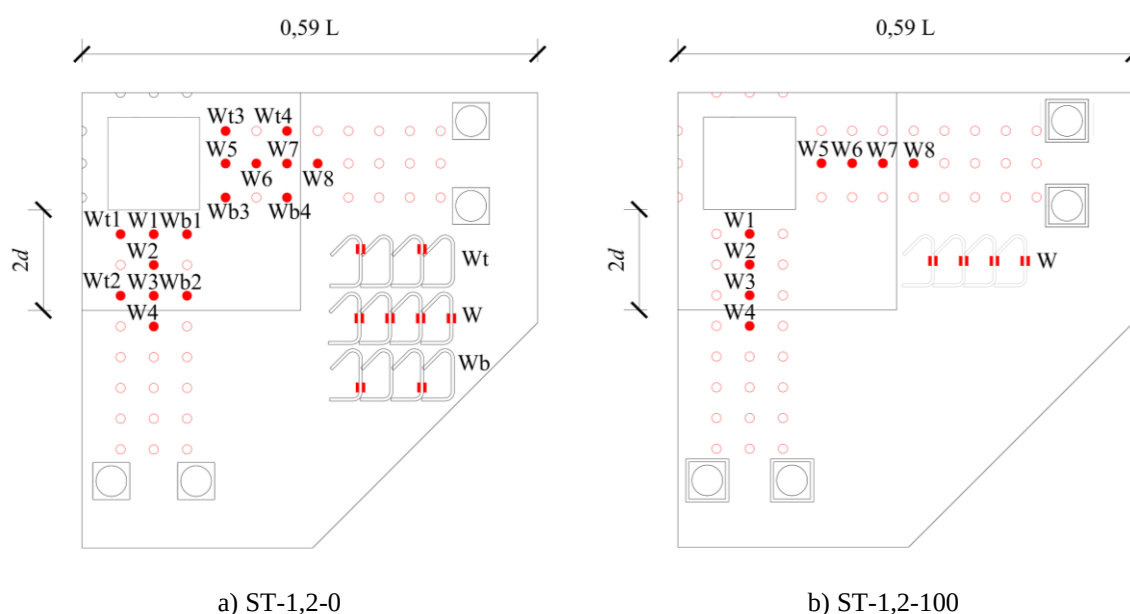
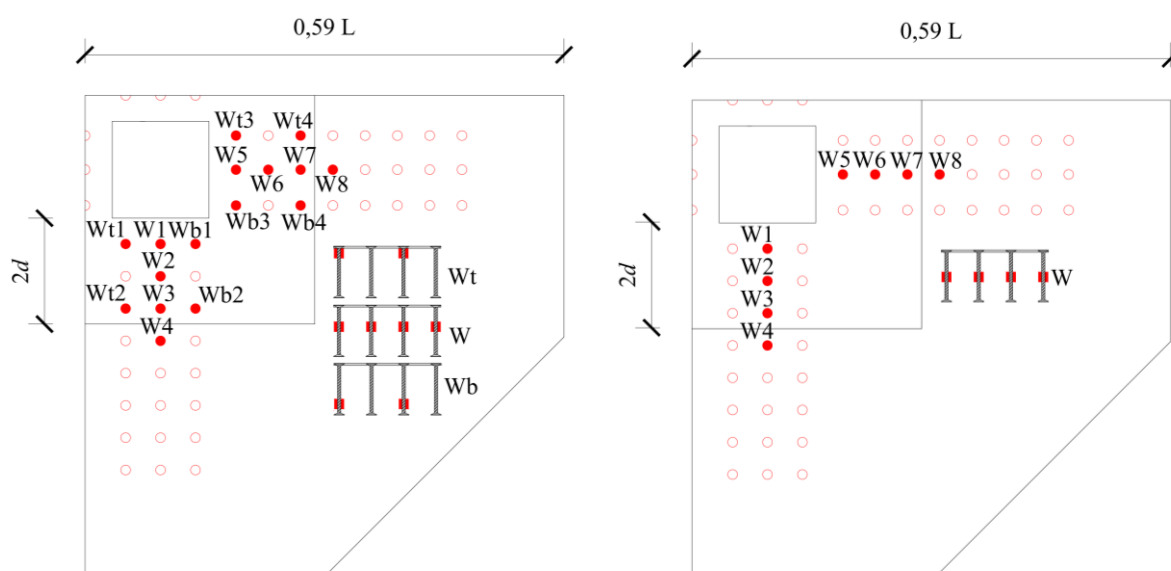


Figura 3.10 – Posicionamento da instrumentação de cisalhamento da segunda série.



a) SS-1,2-0

b) SS-1,2-100

Figura 3.11 – Posicionamento da instrumentação de cisalhamento da segunda série (continuação).

3.6 CONCRETO

3.6.1 Agregados Naturais

Os agregados naturais que foram utilizados nesta pesquisa foram areia natural de quartzo e brita comercialmente numerada como #1, oriunda de rochas calcárias. A caracterização da areia foi realizada segundo a ABNT NBR 16972 (2021) para massa unitária e a ABNT NBR 16916 (2021) para massa específica, assim como, a caracterização da brita #1 foi realizada conforme a ABNT NBR 16917 (2021) para massa específica e ABNT NBR 16972 (2021) para massa unitária. A graduação granulométrica foi feita de acordo com a ABNT NBR 17054 (2022). A brita apresentou teor de material pulverulento de 0,69% e o teor de umidade foi de 0,32%.

3.6.2 Agregados Reciclados de Concreto (ARCO)

O ARCO utilizado tem origem no beneficiamento de corpos de prova cilíndricos, oriundos do descarte de empresas de controle tecnológico do concreto de Belém no estado do Pará, apresentado na Figura 3.12. Foram usados somente corpos de prova de concreto com agregado graúdo de seixo para que pudesse ser identificado com facilidade nos ensaios de microscopia, as zonas de transição de cada tipo de agregado. Foram descartadas as amostras com brita e outros tipos de adições, presença de matéria orgânica e umidade. Ainda no processo de triagem, era observado visualmente se o material estava em boas condições, se as amostras estavam úmidas e se os corpos de prova estavam inteiros ou parcialmente inteiros. O concreto de origem

tinha a resistência à compressão conhecida na faixa de 25 à 35 MPa para utilização e beneficiamento. Para as duas séries de lajes realizadas neste trabalho, foram necessárias cerca de dez toneladas de corpos de prova britados, que após o processo de peneiramento se transformaram em seis toneladas de ARCO, que foram utilizados para produção das lajes.



Figura 3.12 – Descarte de corpos de prova de empresas de controle tecnológico do concreto em Belém-Pa.

O processo de trituração e peneiramento do material foi realizado na Universidade Federal do Pará, na Usina de Materiais da Faculdade de Engenharia Química, em Belém-PA. Foi utilizado um britador do tipo mandíbula regulado, gerando quantidade satisfatória de ARCO. Após essa etapa, o material foi separado e peneirado com o auxílio de um conjunto de peneiras com graduações de #19 mm e #4,8 mm. Neste sentido, a faixa granulométrica foi definida no intervalo entre passantes na #19 mm e retidos na de #4,8 mm. Os resíduos passantes na peneira de #4,8 mm, bem como os retidos na #19 mm, foram descartados. A Figura 3.13 apresenta os equipamentos utilizados na produção do ARCO.



(a) Britador de mandíbula



(b) Peneirador mecânico

Figura 3.13 – Equipamentos utilizados na produção dos agregados.

Após o processo de produção do ARCO, o material foi ensacado e transportado para a cidade Tucuruí, onde foi realizada as etapas de confecção e ensaios experimentais das lajes.

3.6.3 Cimento

Para a moldagem das lajes das duas séries deste trabalho, foi utilizado o cimento Portland CP II – F com características físicas e mecânicas de acordo com o estabelecido pela ABNT NBR 16697 (2018), que era o cimento disponível para comercialização em quantidade e preço adequado na região.

3.6.4 Dosagem e quantidade de materiais

Para a dosagem foram utilizadas as curvas de dosagem elaboradas por Santos *et al.* (2015) que realizou um programa experimental utilizando o método de dosagem IPT/EPUSP proposto por Helene e Terzian (1992). Os traços foram realizados em massa.

Para a Série 1, foram utilizados três traços distintos, considerando 3 percentuais de substituição de agregado gráúdo natural (AGN) por agregado gráúdo reciclado de concreto (ARCO): o de referência, com 100% de AGN; um com 30% de substituição de AGN por ARCO, e um com 100% de ARCO. Para a Série 2, foram utilizados somente dois traços: o de referência com

100% de AGN e com 100% de ARCO. Todos os materiais foram pesados com balança eletrônica e ensacados com 50 kg em cada para garantir o controle rigoroso dos materiais durante a concretagem conforme Figura 3.14.



Figura 3.14 – Materiais pesados e ensacados para o controle da dosagem

Para a Série 1, foi definido o percentual de substituição de 30 %, antes da publicação da NBR 15116 (2021) que definiu teor de substituição máxima de 20%, a partir da análise dos resultados de autores como Bai *et. al.* (2020), Medjigbodo *et. al.* (2018) e Corinaldesi (2010), que indicaram em seus estudos que, em uma substituição de até 30% de ARCO, é possível alcançar resistências próximas ao concreto com 100% de AGN. Após os resultados, da primeira de série de ensaios, foi definido que segunda série não contaria com o teor intermediário de substituição e contaria apenas com o traço de referência e com 100% de ARCO.

A Tabela 3.3 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais. A dosagem do concreto está apresentada na Tabela 3.4, onde pode ser verificado a relação água cimento (a/c), massa unitária (m), cimento (c), agregado miúdo (a), agregado graúdo (p), consumo de cimento, consumo de água e os 3 teores de substituição de agregado, sendo esses traços produzidos com um mesmo teor de argamassa, 51%, pretendendo o mesmo F_{cj} de 25 MPa.

Tabela 3.3 – Resultado dos ensaios de caracterização dos agregados.

Material	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Unitária (kg/dm ³)	Dimensão Máxima Característica (mm)	Módulo de Finura
Agregado Miúdo	2,57	1,54	2,38	2,41
Agregado Graúdo Natural	2,66	1,34	19,0	7,79
Agregado Graúdo Reciclado de Concreto	2,62	1,11	19,0	6,79

Tabela 3.4 – Quantidade de materiais por m³ para cada série de ensaio

ARCO	a/c	Consumo de AMN (kg/m ³)	Consumo de AGN (kg/m ³)	Consumo de ARCO (kg/m ³)	Consumo de cimento (kg/m ³)
0%	0,59	757,9	1057,2	0,0	342,5
30%	0,60	738,6	732,1	310,2	349,9
100%	0,66	731,4	0,0	1016,1	338,3

3.6.5 Método de produção do concreto

Para a produção do concreto de referência, foi adotada a ordem de mistura tradicional conforme a metodologia de Helene e Terzian (1992), que consistiu em adicionar os materiais na seguinte ordem: brita, 30 % da água de mistura, cimento, 50% da água de mistura, areia e os últimos 20% da água de mistura, conforme o esquema apresentado na Figura 3.15.

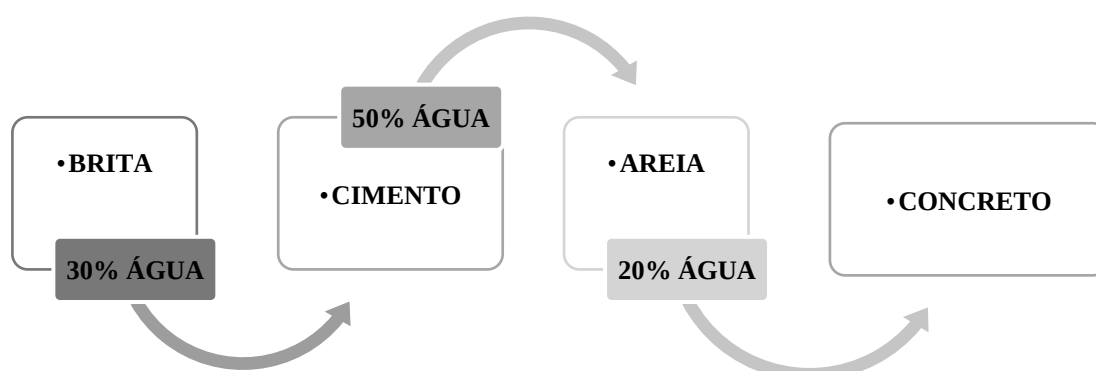


Figura 3.15 – Ordem tradicional de colocação dos materiais do concreto convencional

Para a produção do concreto com ARCO, foi utilizada a metodologia proposta por Cordeiro (2013) que, optou por não realizar a pré-molhagem do ARCO, não utilizar aditivos e nem adições, por considerar que essa seria a pior condição de mistura. O tempo de mistura adotado foi de 3 min e 23 segundos para cada etapa, em betoneira de eixo inclinado de 500 L. Para a ordem de mistura, optou-se por adaptar a metodologia de Cordeiro (2013), que buscou minimizar a quebra dos grãos com a redução do tempo que o ARCO permaneceu na betoneira durante o processo de mistura, a autora, inverteu a ordem utilizada na mistura tradicional, colocando 100% da areia no início da mistura e o ARCO sendo incorporado somente na última etapa. Neste trabalho, o ARCO foi incorporado em duas etapas na mistura, 30 % do ARCO no início da mistura e o restante no final do processo, como ilustrado na Figura 3.16.

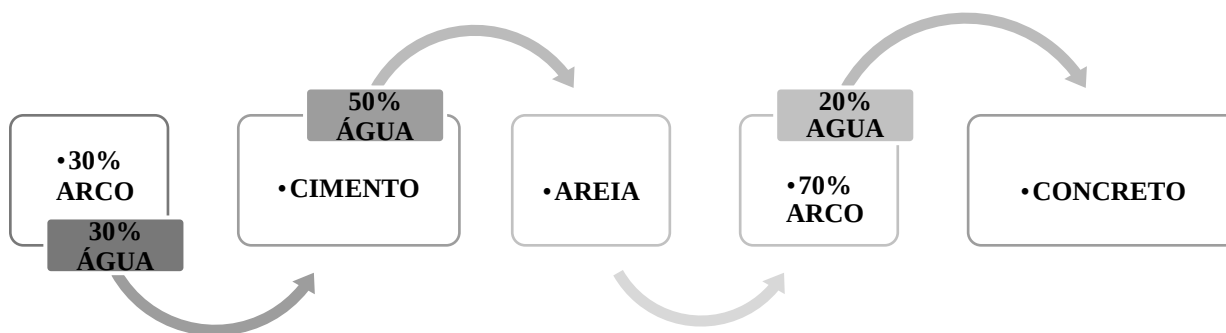


Figura 3.16 – Ordem de colocação dos materiais do concreto com ARCO

Para as duas séries, foram realizados, ensaio de abatimento de tronco de cone, para garantir a trabalhabilidade do concreto para um lançamento e adensamento adequados na fôrma e evitar a formação de ninhos de concretagem, de acordo com as especificações da ABNT NBR 16889 (2020). O adensamento do concreto foi feito com o auxílio de um vibrador de imersão, conforme as recomendações da ABNT NBR 14931 (2023).

Para o controle das propriedades mecânicas do concreto foram moldados corpos de provas, em tamanhos 10 x 20 cm para os ensaios de resistência a tração e compressão e 15 x 30 cm para os ensaios de módulo de elasticidade, em concordância com a ABNT NBR 16886 (2020), o item 4.1.1 deste trabalho apresenta os resultados obtidos nos ensaios experimentais. O processo de cura úmida dos corpos de prova e das lajes moldadas atenderam todas as especificações da ABNT NBR 6118 (2023).

3.7 SISTEMA DE ENSAIO

As lajes foram submetidas a testes em um sistema de reação metálico autossustentado com capacidade de 3000 kN. O equipamento de ensaio era composto por: um cilindro hidráulico com capacidade de 3000 kN; uma célula de carga com capacidade de 3000 kN e precisão de 1 kN; uma bomba elétrica para acionamento; quatro vigas metálicas robustas para distribuir a reação; oito barras de aço para suporte da reação; e oito placas de aço organizadas simetricamente em relação ao centro da laje, servindo como pontos de reação e assegurando um raio de carregamento de 1125 mm.

O carregamento foi aplicado de baixo para cima, elevando todo o sistema até alcançar o nível das porcas, que serviram como mecanismo de transferência dos esforços para as vigas de reação. As medições dos extensômetros nas armaduras de flexão e cisalhamento, LVDTs e

extensômetros na superfície do concreto foram captadas utilizando três módulos do sistema de aquisição de dados ADS LINKSYS. A Figura 3.17 mostra a implantação, o corte e uma vista 3D, sendo o raio da laje 1250 mm e o raio de aplicação do carregamento 1125 mm.

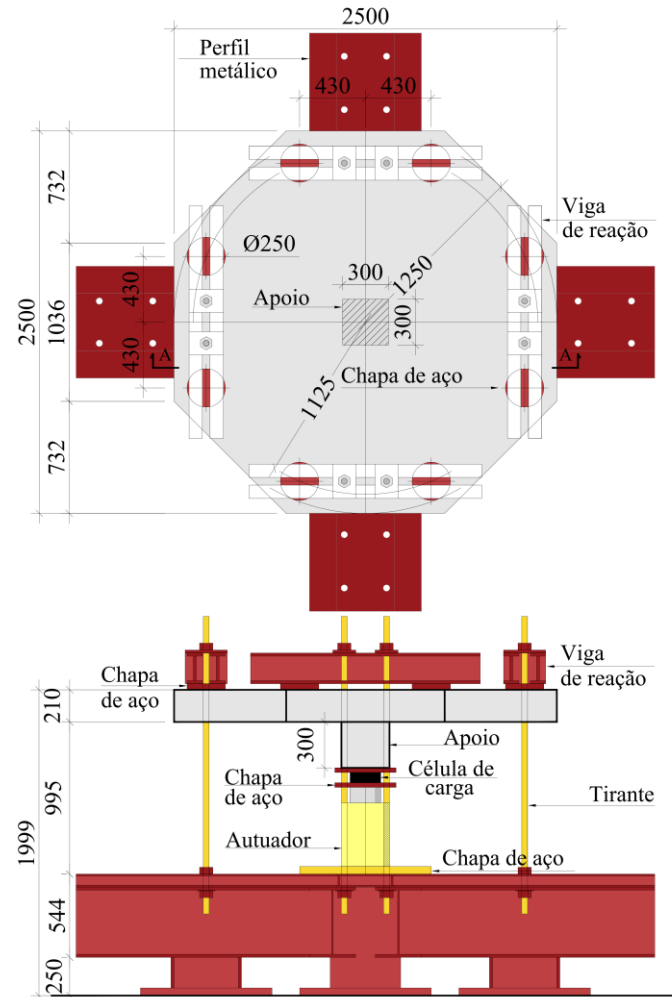


Figura 3.17 – Sistema de ensaio

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são apresentados os resultados das propriedades mecânicas dos materiais e resultados experimentais das lajes descritas no Capítulo 3 e que fizeram parte dos trabalhos de Ribeiro Júnior (2021) e Portilho (2023). São apresentados no item 4.1 os resultados referentes aos materiais, no item 4.2 os resultados dos modelos da Série 1 e no item 4.3 são apresentados os resultados dos modelos da Série 2.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Concreto

O concreto no seu estado fresco foi analisado quanto à sua trabalhabilidade através do ensaio de abatimento de tronco de cone, em acordo com a ABNT NBR 16889 (2020). Em virtude de a concretagem ter sido realizada in loco, com auxílio de uma betoneira de 400 l, as lajes precisaram de 7 a 9 betonadas para serem finalizadas e todos os traços foram avaliados quanto a trabalhabilidade. De acordo com o preconizado pela ABNT NBR 8953 (2015), concretos para fins estruturais com lançamento convencional deve apresentar abatimento de 100 a 160 mm, que foi atendido em todas betonadas para as dez lajes estudadas. No estado endurecido, as propriedades mecânicas analisadas foram: resistência a compressão do concreto conforme o preconizado pela ABNT NBR 5739 (2018), a resistência à tração por compressão diametral de acordo com a ABNT NBR 7222 (2011) e o módulo de elasticidade do concreto de acordo com a ABNT NBR 8522 (2021). As duas séries experimentais foram produzidas em períodos diferentes, por este motivo, são apresentados a seguir em duas etapas.

Para a Série 1, que foi a primeira a ser produzida, o controle do abatimento se tornou fundamental para entender a influência da variabilidade do ARCO em cada betonada e como meio de garantir uma boa trabalhabilidade do concreto durante o lançamento e foi ajustado ao longo de cada concretagem afim de atender aos padrões normativos para concretos estruturais, de acordo com o ajuste da relação a/c em função da taxa de ARCO. A Tabela 4.1 apresenta as propriedades do concreto na Série 1.

Tabela 4.1 – Propriedades do concreto – Série 1

Laje	a/c	Média abatimento do tronco de cone (mm)	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	E_{cm} (MPa)
S-0,7-0	0,59	132,78	20,73	2,57	26,72
S-0,7-30	0,59	124,38	21,92	2,38	24,78
S-0,7-100	0,65	124,29	23,05	2,41	22,48
S-1,2-0	0,59	122,78	22,78	3,48	25,26
S-1,2-30	0,57	126,67	21,52	2,95	27,47
S-1,2-100	0,62	119,38	21,44	2,48	22,42

A resistência à compressão das lajes se manteve na mesma faixa de resistência, 20 a 25 MPa, independente do teor de ARCO. As lajes S-1,2-30 e S-1,2-100 apresentaram a mesma resistência a compressão, apesar da relação a/c ser de 0,57 e 0,62 respectivamente. No entanto, a laje S-0,7-100 apresentou um ligeiro aumento na resistência à compressão mesmo apresentando uma relação a/c maior que a laje S-0,7-30.

A resistência à tração foi o parâmetro que sofreu maior variação quando comparadas as lajes com 0% de ARCO e 100% de ARCO. Para as lajes com taxa de armadura de flexão de 1.2% a redução na resistência à tração foi de aproximadamente 30%. Essa redução não pode ser observada nas lajes com taxa de armadura de 0,7%.

As lajes apresentaram redução no módulo de elasticidade de 16% e 11% para taxa de armadura de flexão de 0,7% e 1,2%, respectivamente, quando comparadas as lajes com 0% e 100% de ARCO. Essa redução indica uma redução na rigidez das peças com ARCO. A incorporação de ARCO gerou uma redução significativa do módulo elasticidade o que não ocorreu com a resistência a compressão do concreto. Este comportamento está em acordo com a comunidade científica, conforme citado por Hansen (1992), Etxeberria (2004), Casucio (2008) e Pacheco (2019). Os ensaios para avaliar as propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido foram realizados no mesmo dia em que foi realizado o ensaio da laje. Os gráficos destes parâmetros estão apresentados na Figura 4.1 abaixo.

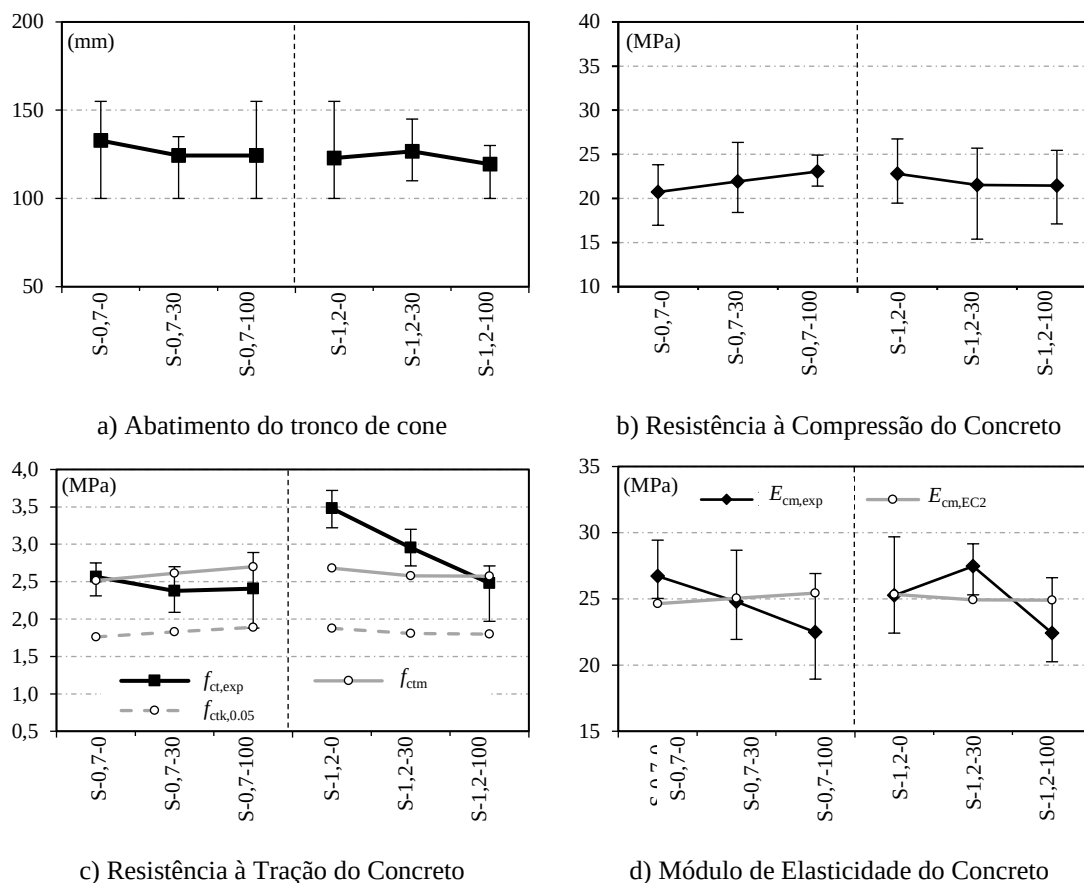


Figura 4.1 – Propriedades do concreto no estado fresco e endurecido – Série 1

Para a Série 2, as análises dos procedimentos executivos feitos durante a concretagem da primeira série proporcionaram uma segurança maior quanto a influência da variabilidade do ARCO durante a concretagem e moldagem das lajes, desse modo o controle da trabalhabilidade e os valores medidos no teste de abatimento do tronco de cone do concreto se deu de forma menos variável. Esse controle refletiu diretamente nos resultados das propriedades mecânicas desta série, uma vez que a variação dos resultados entre os modelos com 0% e 100% de ARCO foi reduzida significativamente, como pode ser observado na Tabela 4.2 abaixo.

Tabela 4.2 – Propriedades do concreto – Série 2

Laje	a/c	Média abatimento do tronco de cone (mm)	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	E_{cm} (MPa)
SS-1,2-0	0,59	125,00	23,76	2,48	21,68
SS-1,2-100	0,66	126,67	23,03	2,43	21,72
ST-1,2-0	0,60	119,38	20,38	2,24	22,75
ST-1,2-100	0,65	130,56	19,95	2,21	21,54

Os concretos com ARCO produzidos nesta série apresentaram menor trabalhabilidade em relação ao concreto com agregado natural, esta variação é justificada pela maior porosidade dos

agregados e consequentemente maior absorção de água. Contudo, foi possível manter a trabalhabilidade adequada para todos os modelos mesmo com as alterações realizadas. Analisando os resultados das propriedades mecânicas apresentados na Figura 4.2, é possível observar que não ocorreram variações significativas na resistência à compressão nas lajes com 100% de ARCO, resultado que corrobora com os resultados de trabalhos científicos que apontam que a utilização da porção graúda do ARCO tem pouca ou nenhuma influência nessa propriedade mecânica. A resistência a tração sofreu uma ligeira redução com a incorporação do ARCO, conforme observado na Figura 4.2-c. Nesta série a propriedade mais influenciada pela incorporação do ARCO foi o módulo de elasticidade da laje ST-1,2-100, conforme a Figura 4.2-d, que foi uma redução menor que 10% comparado ao concreto com agregado natural da laje ST-1,2-0.

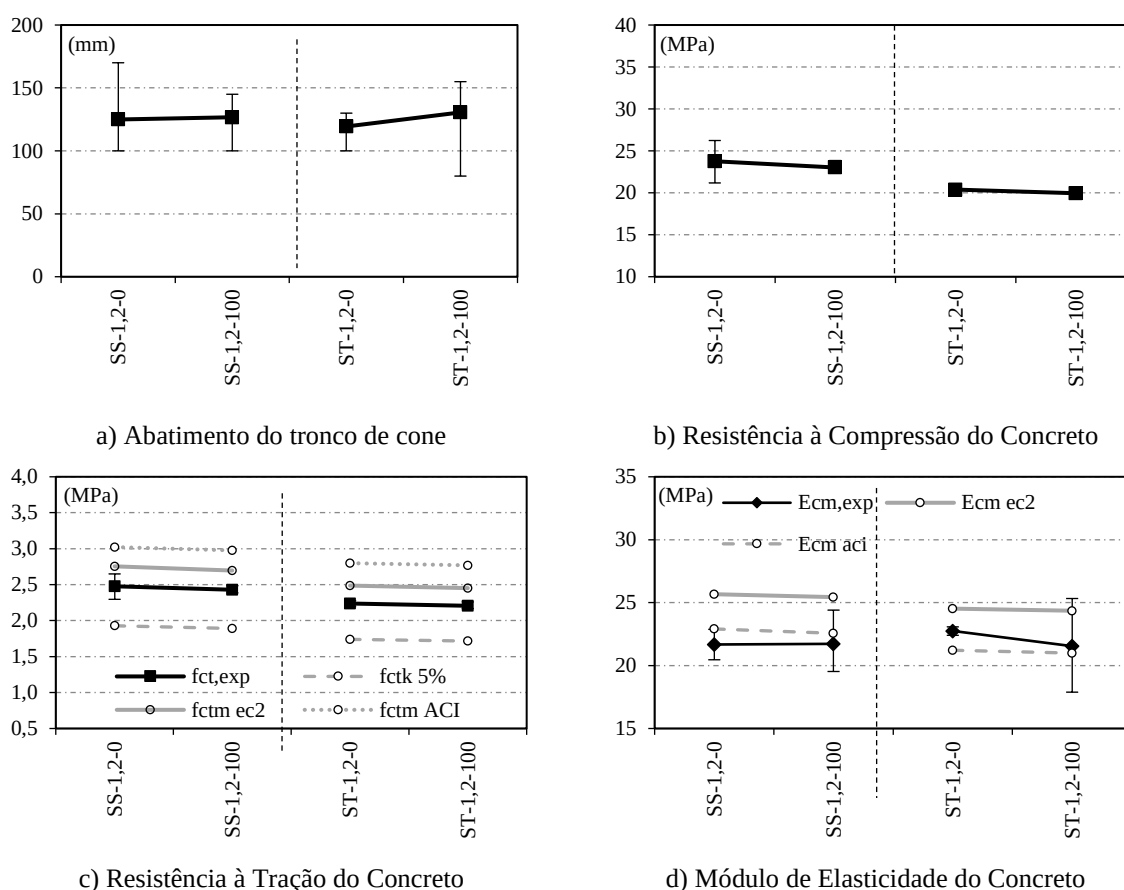


Figura 4.2 – Propriedades do concreto no estado fresco e endurecido – Série 2

4.1.2 Aço

As propriedades mecânicas do aço utilizado mostram que as amostras estão dentro dos limites da normalidade, para os ensaios realizados, os resultados dessa caracterização estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resumo das propriedades mecânicas do aço

Tipo de Barra	Ø (mm)	f_{ys} (MPa)		ε_{ys} (‰)	E_{ys} (GPa)	
		Média	Desvio Padrão		Média	Desvio Padrão
Estribo Individual	10	678,89	5,17	3,63	186,86	28,17
<i>Double Headed Studs</i>	10	510,47	40,46	2,71	207,66	2,08
Flexão – Série 1	25	525,72	21,52	2,53	207,97	0,77
Flexão – Série 1	12.5	624,28	8,02	2,87	217,26	0,81
Flexão – Série 2	16	570,13	11,44	2,88	198,21	3,97

f_{ys} é a tensão de escoamento da armadura;
 ε_{ys} é a deformação da armadura;
 E_{ys} é o módulo de elasticidade da armadura.

4.2 SÉRIE 1

4.2.1 Deslocamentos verticais

Os deslocamentos verticais das lajes foram medidos em 11 pontos específicos localizados na face superior das lajes conforme descrito no capítulo 3. A Figura 4.3, apresenta a média dos valores medidos nos dois sentidos das lajes, em função da razão entre o raio da laje e o raio de carregamento (r/r_q). Embora os deslocamentos tenham sido monitorados de forma contínua ao longo de todos os ensaios, os valores são apresentados em etapas de carga em relação à carga última das lajes (V_u).

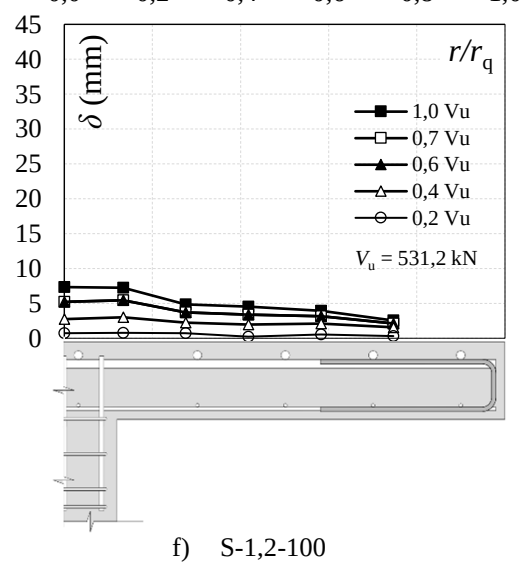
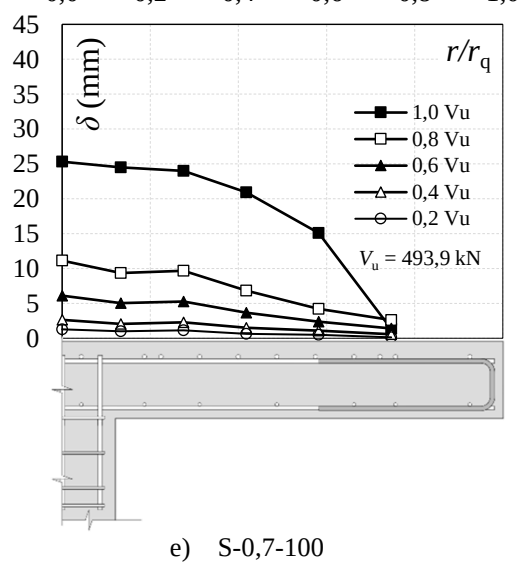
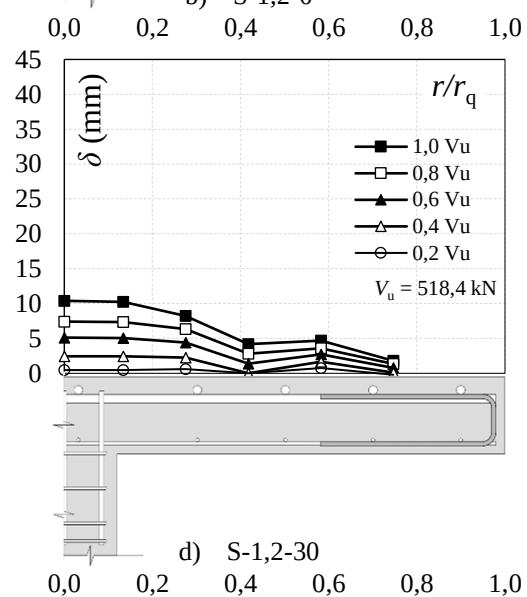
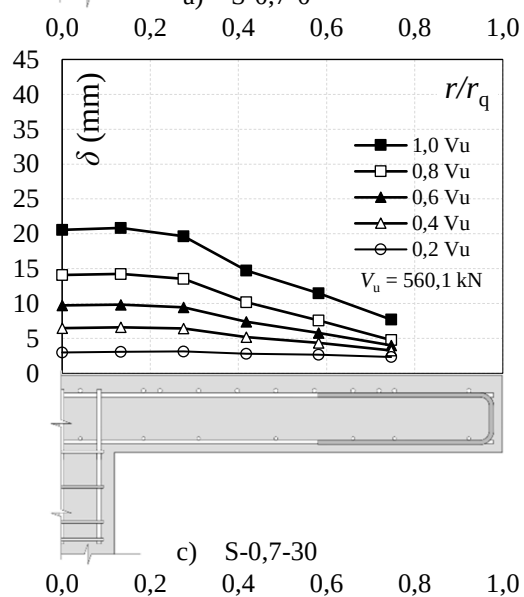
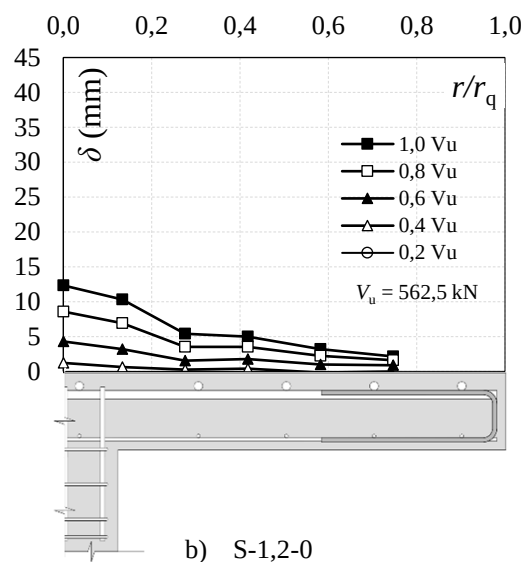
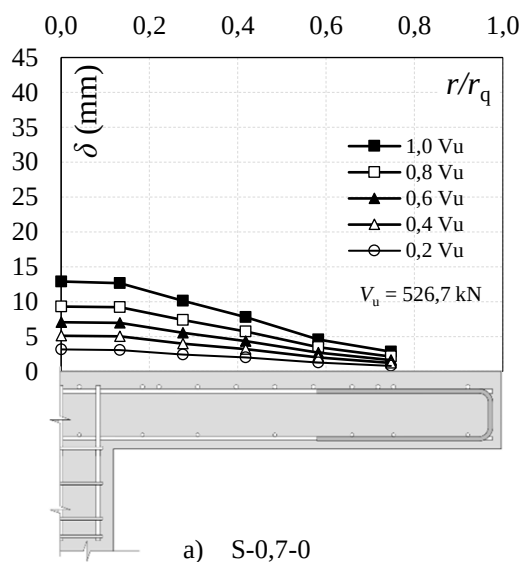


Figura 4.3 – Perfil de deslocamento das lajes ensaiadas

As lajes com taxa de armadura de flexão de 0,7% e substituição de agregados naturais por agregados reciclados de concreto (S-0,7-30 e S-0,7-100) apresentaram deslocamentos maiores em comparação às lajes com taxa de armadura de flexão de 1,2%. Esse resultado era esperado, já que o aumento da taxa de armadura de flexão eleva a rigidez dos modelos. A laje S-0,7-30 mostrou uma redução significativa no deslocamento medido pelo 4º LVDT no passo de carga correspondente a 1,0Vu, que indicou a formação do cone de ruptura à 470 mm do eixo do pilar, o que foi confirmado pelo mapa de fissuração apresentado no item 4.2.3.

A Figura 4.4 apresenta o comportamento carga-deslocamento das lajes testadas, servindo como referência para avaliar a rigidez das lajes e a influência do ARCO no comportamento das mesmas. É possível observar que o ARCO não teve impacto na rigidez das lajes, pois ambos os grupos exibiram comportamento rígido até 200 kN. A variação de deslocamento no momento da ruptura foi considerada desprezível, independentemente da taxa de armadura de flexão.

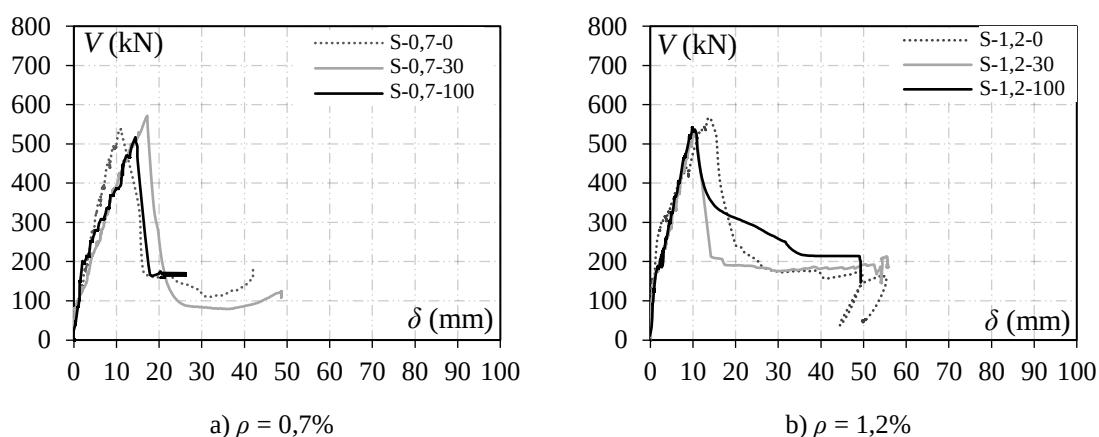


Figura 4.4 – Resposta carga-deslocamento das lajes testadas

4.2.2 Deformações no aço e no concreto

A Figura 4.5 apresenta o perfil de deformação na armadura de flexão e na superfície do concreto para o carregamento máximo aplicado nos ensaios. É possível observar que as armaduras de flexão foram pouco solicitadas, o que permite concluir que as lajes não sofreram ruptura por flexão devido ao esgotamento da capacidade resistente da armadura. As deformações na superfície do concreto também exibiram valores baixos, sendo mais evidentes nas proximidades dos pilares, mas ainda insuficientes para indicar esmagamento do concreto em peças submetidas à flexão. As Figura 4.6 a Figura 4.11 apresentam o comportamento das lajes à flexão através de gráfico carga-deformação de cada laje.

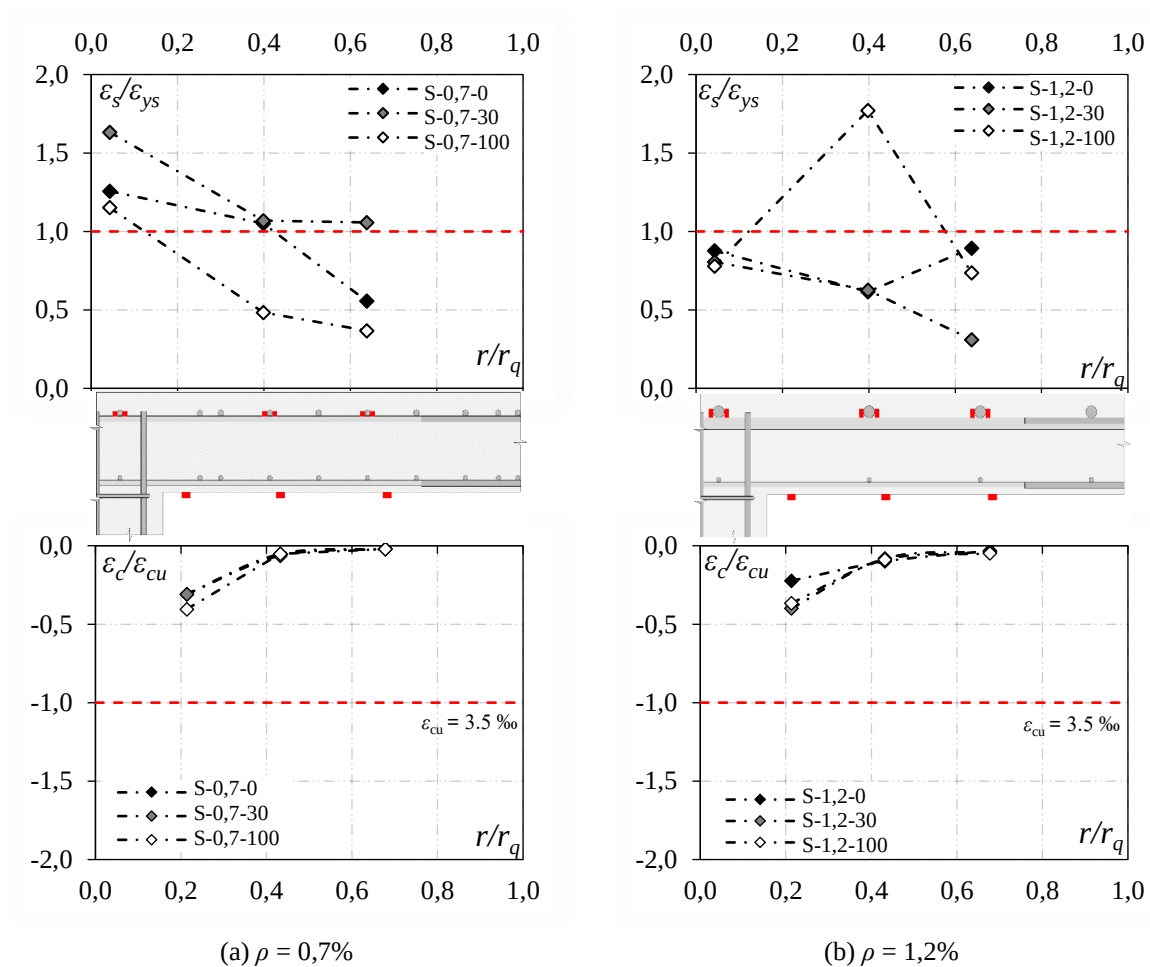


Figura 4.5 – Perfil de deformações nas armaduras de flexão e superfícies do concreto

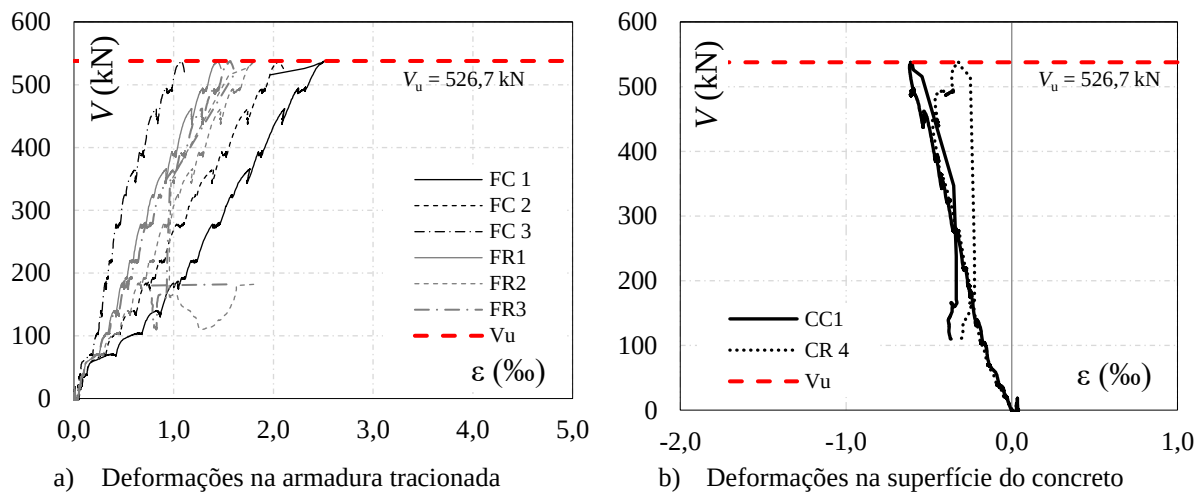
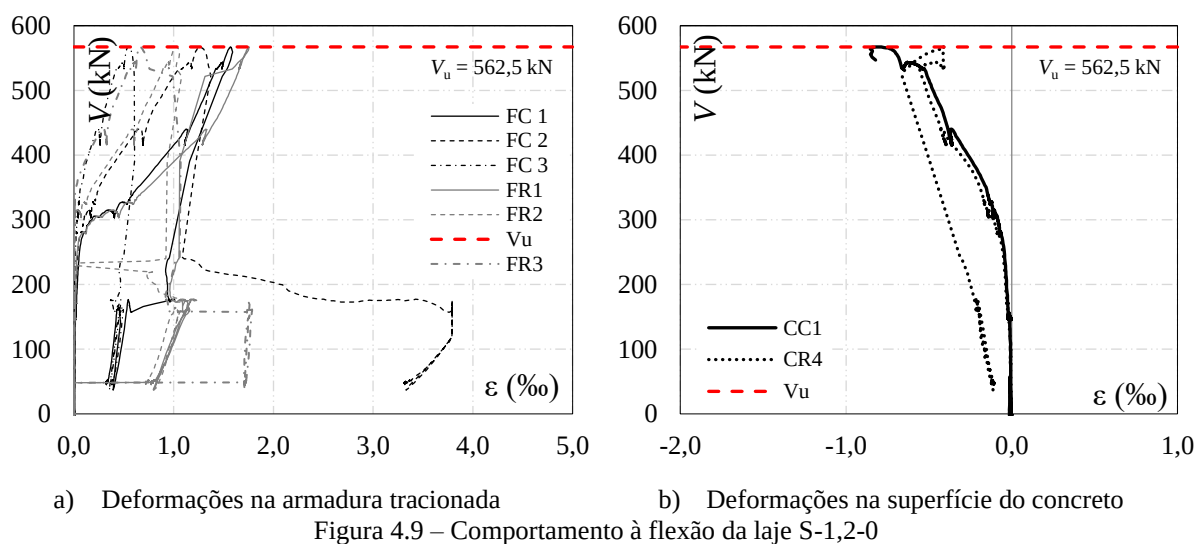
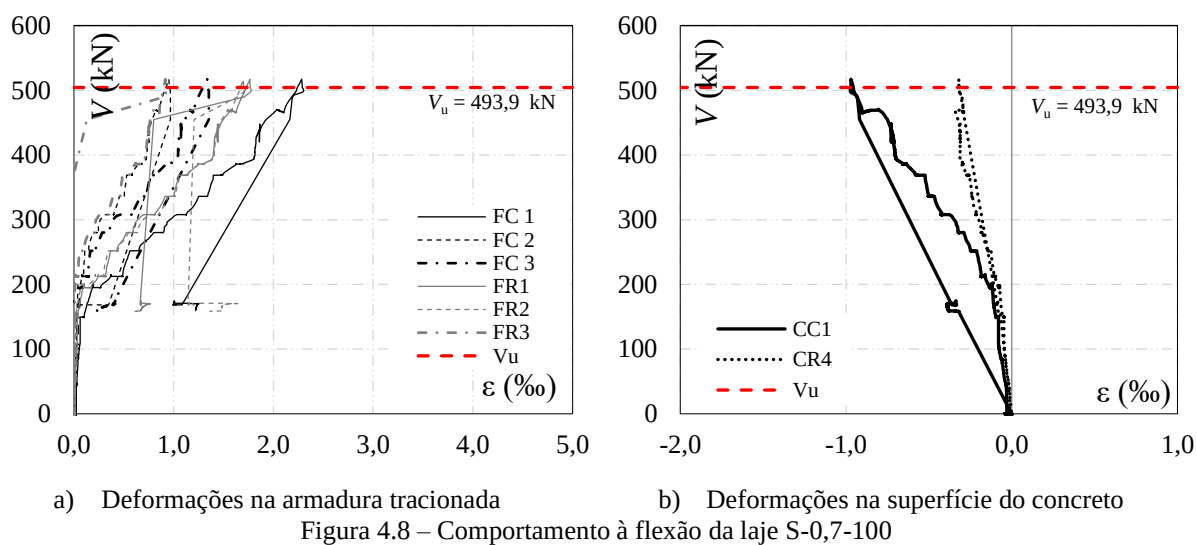
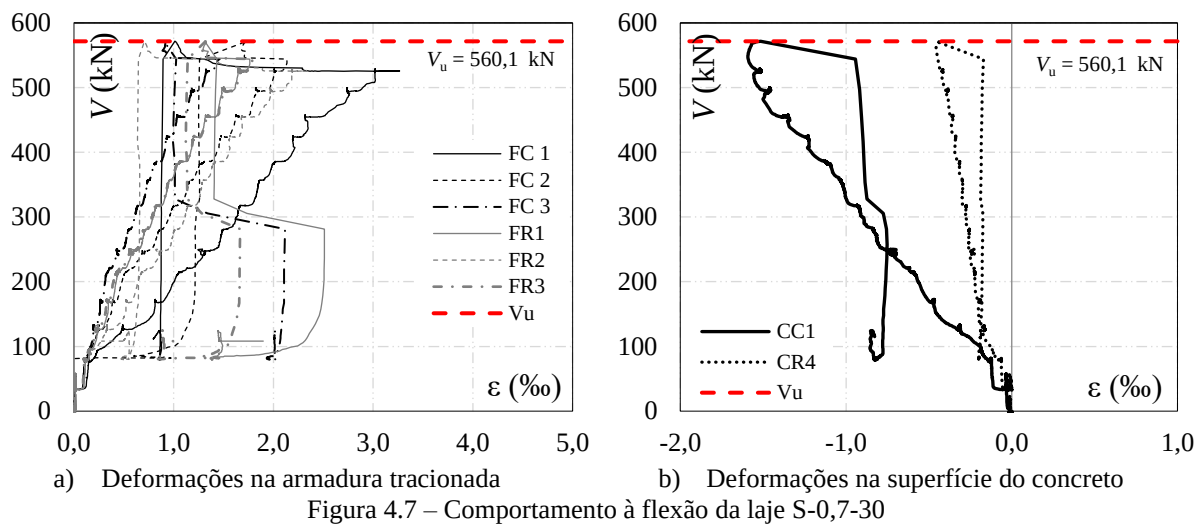


Figura 4.6 – Comportamento à flexão da laje S-0,7-0



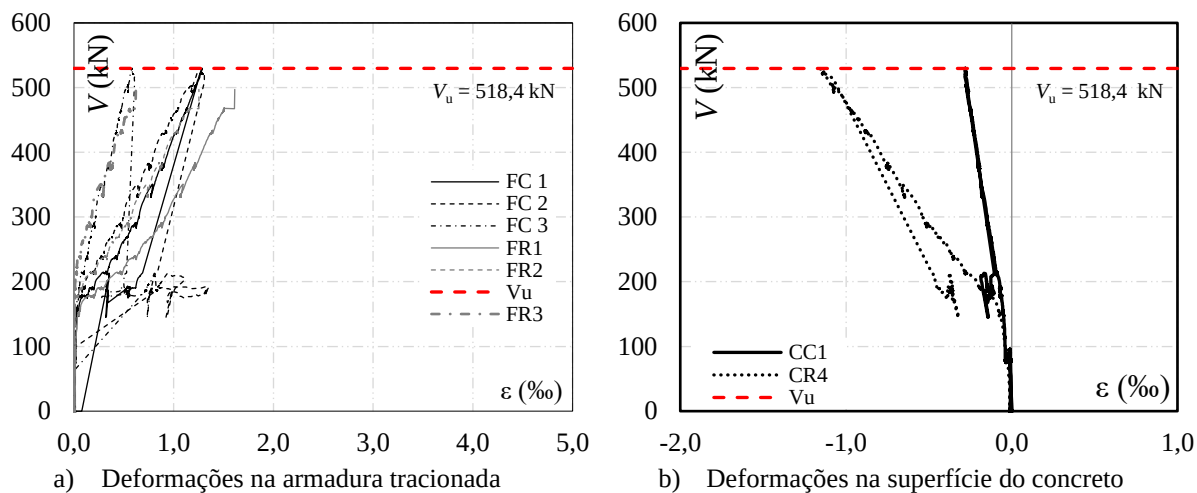


Figura 4.10 – Comportamento à flexão da laje S-1,2-30

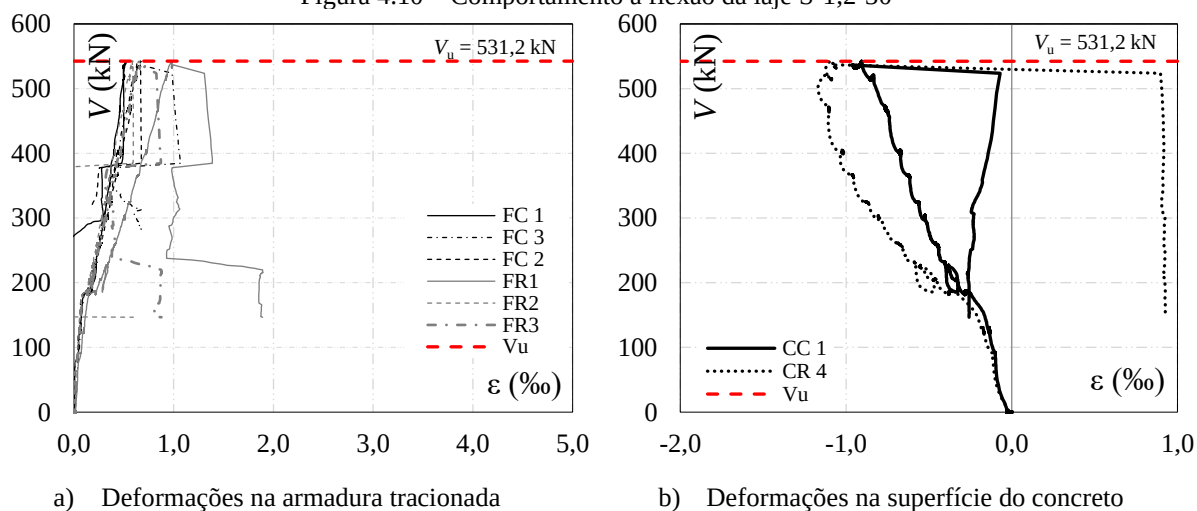


Figura 4.11 – Comportamento à flexão da laje S-1,2-100

4.2.3 Padrão de fissuração

o padrão de fissuração dos modelos foi determinado por meio da medição da abertura das fissuras com o auxílio de um fissurômetro. Foram monitoradas fissuras próximas à face do pilar, sendo uma radial e uma circunferencial. As fissuras apresentaram um comportamento estável e gradual com o aumento da carga, desde o seu surgimento até a ruptura. A Figura 4.12 apresenta o comportamento das lajes em relação à fissuração, com o gráfico carga (V) versus abertura de fissuras (w). As primeiras fissuras visíveis, relacionadas à flexão, surgiram próximas aos pilares, para as lajes com taxa de armadura de flexão de 0,7%, com carregamento próximo a 100 kN. Nessas lajes, as fissuras próximas aos pilares apresentaram maiores níveis de aberturas, como esperado. Para as lajes com taxa de armadura de flexão de 1,2%, a fissuração iniciou com carregamento próximo a 200 kN. A taxa de armadura de flexão foi capaz de aumentar a carga

de fissuração no estado limite de serviço, e os agregados reciclados pouco influenciaram na abertura de fissuras.

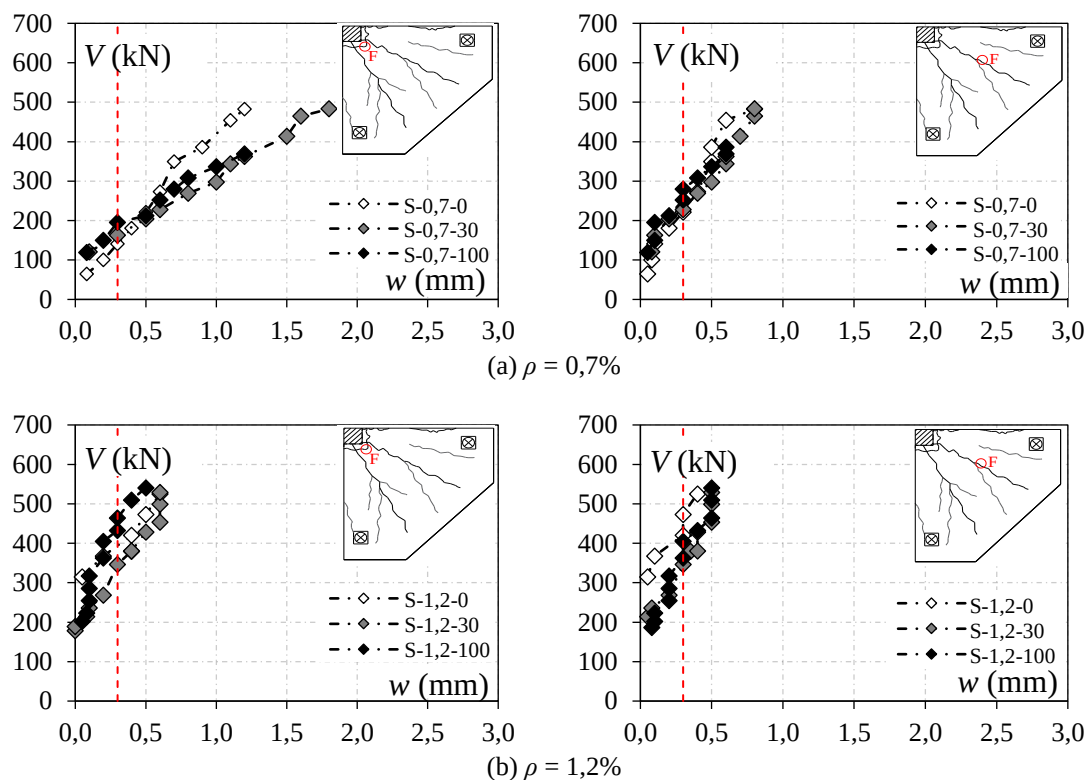
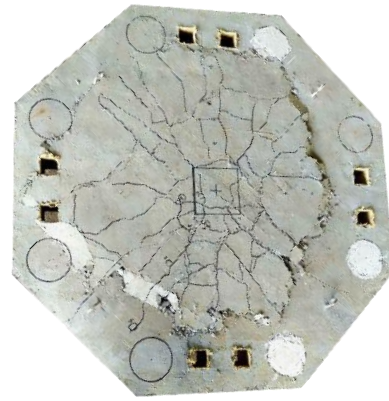
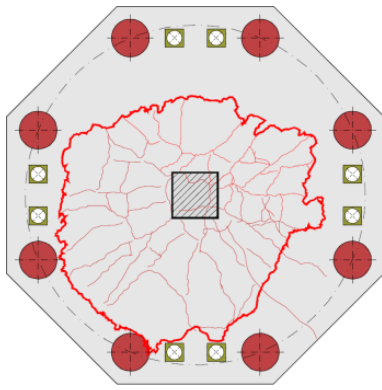
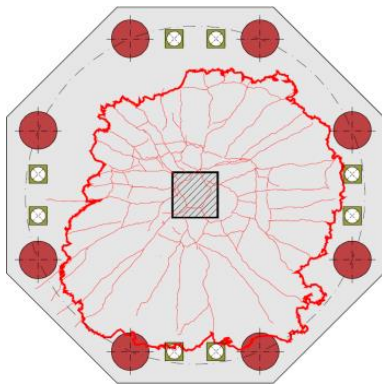


Figura 4.12 – Abertura de fissuras das lajes ensaiadas.

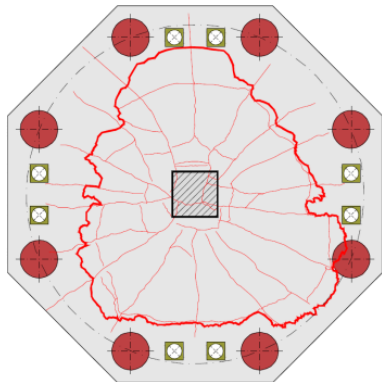
O mapa de fissuração das lajes S-0,7-0 e S-0,7-100 apresenta um padrão de fissuração semelhante, o que também é observado nas lajes com taxa de armadura de flexão de 1,2%. O padrão de fissuração na superfície superior das lajes teve início com fissuras tangenciais e radiais, que partem da região do pilar em direção às bordas. Posteriormente, ocorre o desenvolvimento de fissuras características de cisalhamento, formando um padrão circular ao redor do pilar e configurando uma superfície com formato de tronco de cone, típico da ruptura por punção. As Figura 4.13 e Figura 4.14, apresentam o mapa de fissuração e o aspecto final das lajes pós ruptura.



a) S-0,7-0

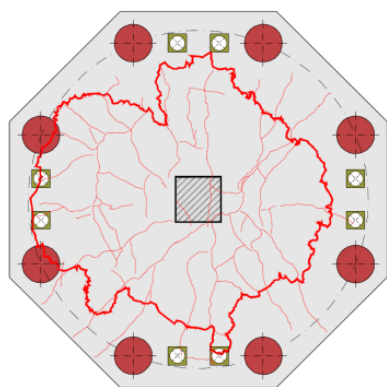


b) S-0,7-30

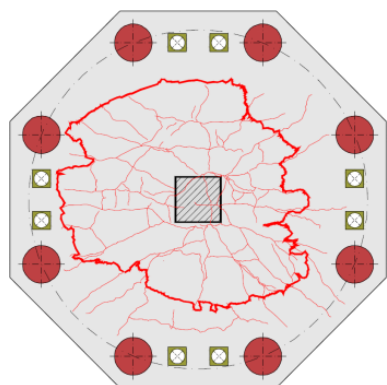


c) S-0,7-100

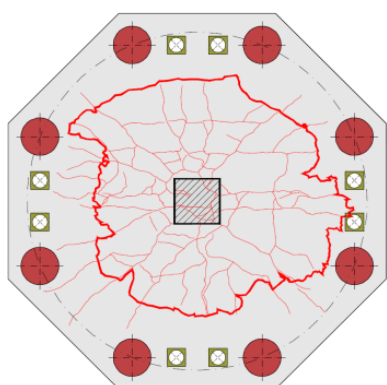
Figura 4.13 – Mapa de fissuração das lajes com $\rho = 0,7\%$.



a) S-1,2-0



b) S-1,2-30



c) S-1,2-100

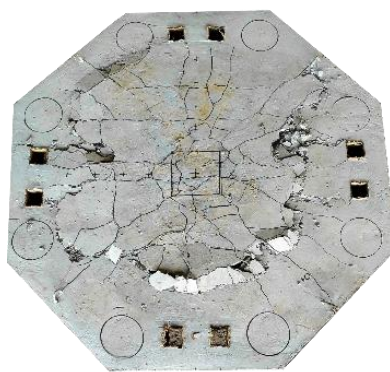


Figura 4.14 – Mapa de fissuração das lajes com $\rho = 1,2\%$.

4.3 SÉRIE 2

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais de quatro lajes lisas: duas de referência e duas com ARCO, utilizando dois tipos de armadura de cisalhamento. Desses modelos dois utilizam estribos individuais e dois utilizam conectores tipo *double head studs*.

4.3.1 Deslocamentos verticais

A Figura 4.15 e Figura 4.16 apresenta a média do perfil de deslocamentos dos dois sentidos das lajes testadas, em função da razão entre o raio da laje e o raio de carregamento (r/r_q). Embora

os dados tenham sido coletados continuamente ao longo de todo o ensaio, na imagem a seguir, eles são exibidos em passos de carga, em relação à carga de ruptura (V_c) da laje de referência S-1,2-0, pertencente à primeira série de ensaios deste estudo. Essa laje não possui agregado reciclado nem armadura de cisalhamento, abrangendo os resultados até o momento de ruptura da laje.

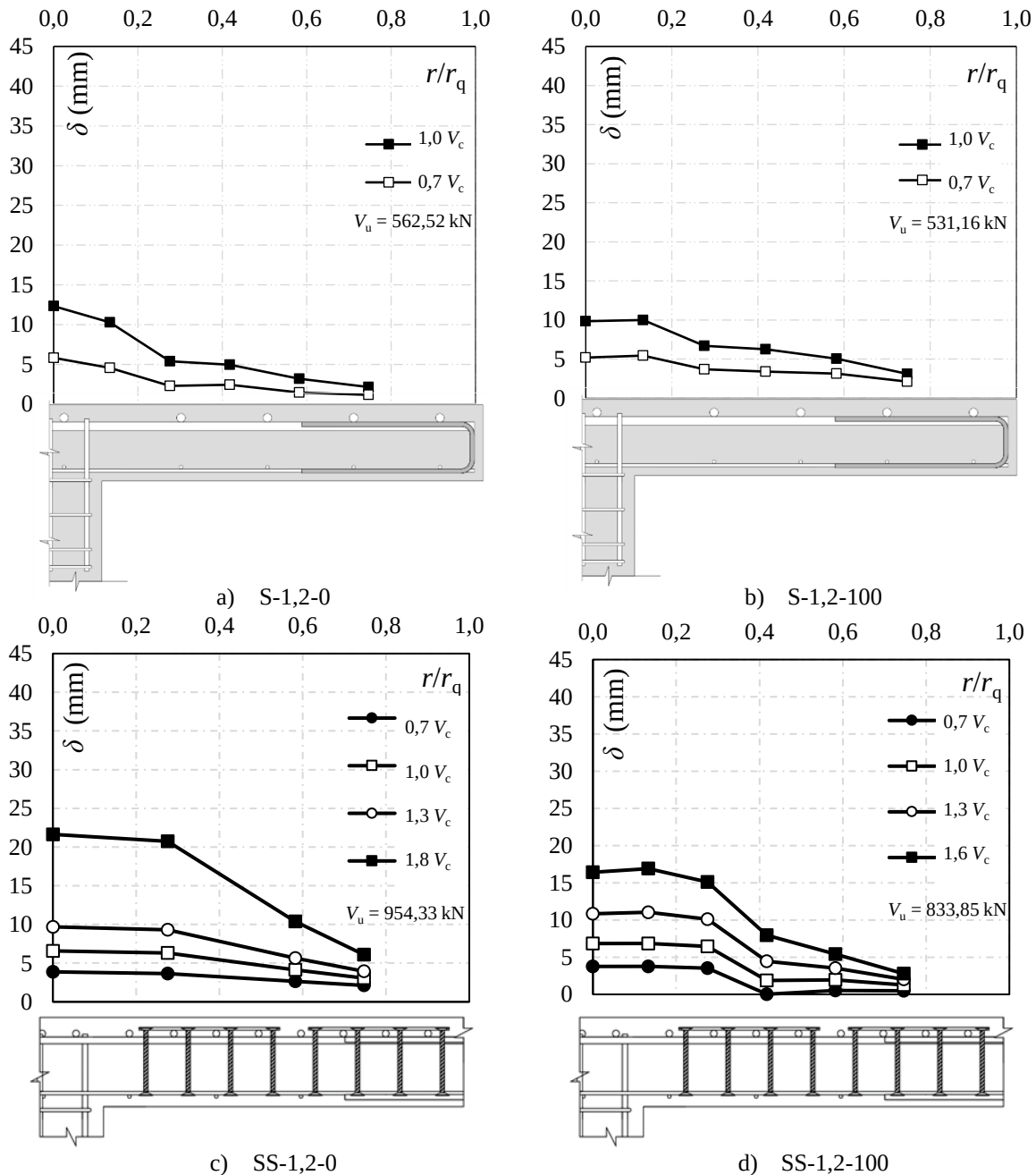


Figura 4.15 - Perfil carga-deslocamento das lajes testadas e lajes de referência

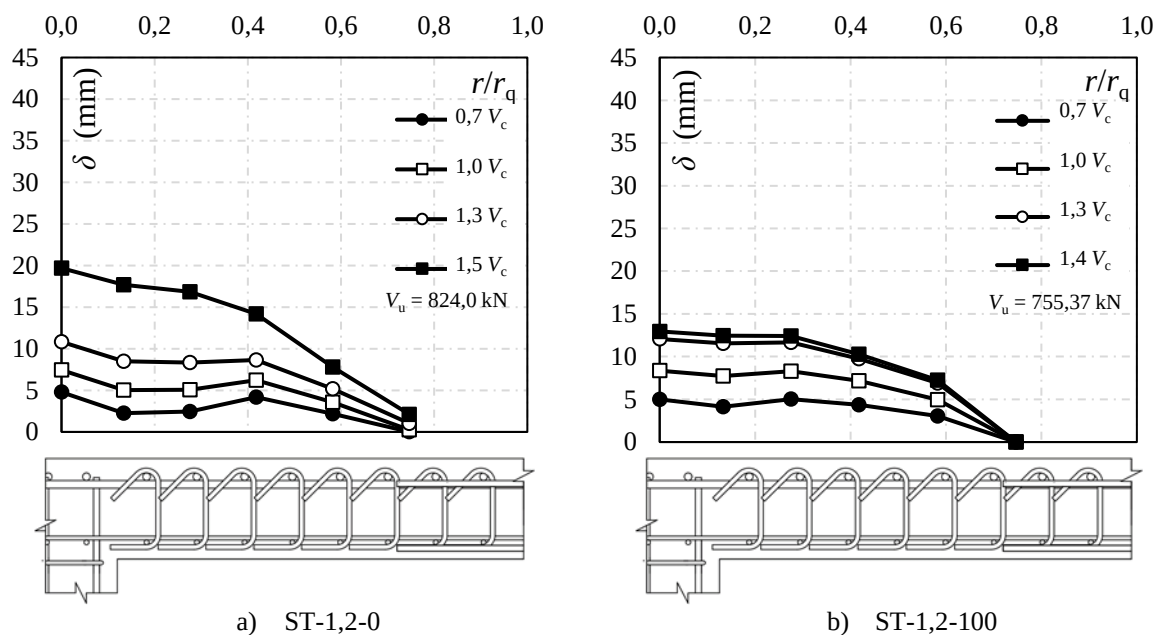


Figura 4.16 - Perfil carga-deslocamento das lajes testadas e lajes de referência (continuação).

A Figura 4.15 e a Figura 4.16 indicam que os LVDTs posicionados na face do pilar apresentaram resultados distintos dos LVDTs localizados no centro do pilar, o que pode ser justificado devido aos efeitos de deformações de cisalhamento adjacente a face do pilar. Essa discrepância pode ser atribuída aos efeitos de deformações de cisalhamento próximas à face do pilar, conforme observado em ensaios de Pereira Filho (2021) e relatado por Lips, Ruiz e Muttoni (2012). Ressalta-se que, durante os ensaios da laje SS-1,2-0, houve perda de algumas leituras, dificultando a obtenção de um gráfico tão preciso quanto os demais. No entanto, ainda foi possível identificar uma tendência de comportamento semelhante.

Ao analisar os passos de carga $1,0V_c$ e $1,3V_c$, verifica-se que as lajes com ARCO apresentaram valores de deslocamento na mesma ordem de grandeza das lajes com agregado natural. Isso evidencia que o agregado reciclado não influenciou significativamente o deslocamento das lajes.

A Figura 4.17 apresenta o comportamento carga-deslocamento das lajes ensaiadas, com o objetivo de avaliar o desempenho das armaduras de cisalhamento na rigidez das lajes e a influência do ARCO. A carga última utilizada como referência foi a da laje S-1,2-0, da primeira série de ensaios, com taxa de armadura de flexão de 1,2%, sem ARCO e sem armadura de cisalhamento. Para fins comparativos, também foram incluídos no gráfico os resultados da laje

S-1,2-100, com ARCO e taxa de armadura de flexão de 1,2%, mas sem armadura de cisalhamento.

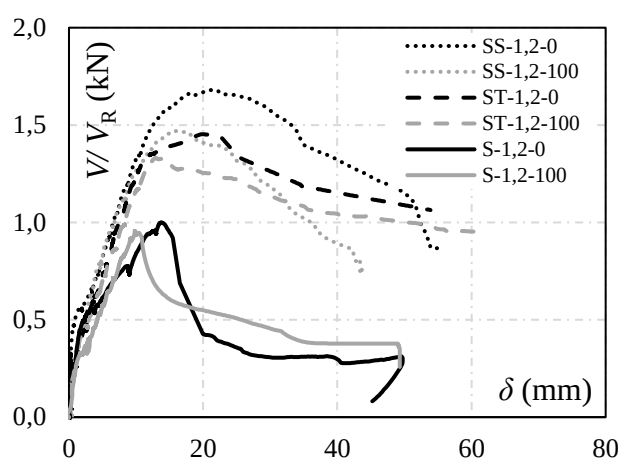


Figura 4.17 – Comportamento carga-deslocamento das lajes testadas.

A laje S-1,2-100, sem armadura de cisalhamento e com agregado reciclado, apresentou ruptura mais brusca, com a menor carga de ruptura e a segunda menor ductilidade entre as analisadas. De maneira semelhante, a laje de referência S-1,2-0, sem agregado reciclado e sem armadura de cisalhamento, também sofreu ruptura frágil. Esses comportamentos eram esperados, dado que a inserção de armadura de cisalhamento, conforme apontado na literatura, tende a aumentar a ductilidade das estruturas.

A laje SS-1,2-0, armada com *double headed studs*, demonstrou o melhor desempenho, com resistência 68% superior à da laje de referência e capacidade de deformação antes da ruptura 64% maior. Por outro lado, a laje ST-1,2-100, com estribos e ARCO, obteve menores níveis de resistência em comparação às demais com armadura de cisalhamento, embora ainda tenha mostrado um incremento de resistência relevante, de 33% em relação à laje S-1,2-0. A ruptura mais frágil foi observada na laje SS-1,2-100, equipada com *double headed studs* e ARCO, cuja capacidade de deformação antes da ruptura foi 21% menor que a da laje S-1,2-0.

Em síntese, as lajes com *double headed studs* registraram os maiores incrementos de carga, enquanto as lajes com estribos individuais (ST-1,2-0 e ST-1,2-100) apresentaram maior ductilidade pós-pico. Verificou-se ainda que as lajes sem agregado reciclado tiveram desempenho ligeiramente superior às com ARCO, embora os resultados tenham sido bastante próximos. Os incrementos de carga, em relação à laje de referência, foram os seguintes: 68 % para SS-1,2-0, 47% para SS-1,2-100, 45% para ST-1,2-0 e 33% para ST-1,2-100.

4.3.2 Deformações nas armaduras de flexão e no concreto

O comportamento à flexão das lajes SS-1,2-0, SS-1,2-100, ST-1,2-0 e ST-1,2-100 é apresentado na Figura 4.18 que apresenta os perfis de deformações circunferenciais nas barras de flexão (ε) e deformações na superfície do concreto (ε_c) em função da razão do raio de medição pelo raio de carregamento (r/r_q), considerando a deformação no instante da carga de ruptura de cada laje.

De modo geral, as armaduras de flexão não foram amplamente solicitadas, mesmo na laje SS-1,2-0, que alcançou maiores resistência e ductilidade. Essa laje apresentou o maior raio de escoamento, com apenas duas camadas de armadura de flexão escoando, afastando, assim, a possibilidade de ruptura por flexão devido ao esgotamento da armadura.

Ressalta-se ainda que as lajes com *double headed studs* alcançaram cargas maiores que as armadas com estribos individuais, o que pode estar relacionado com as diferenças de deformação notadas.

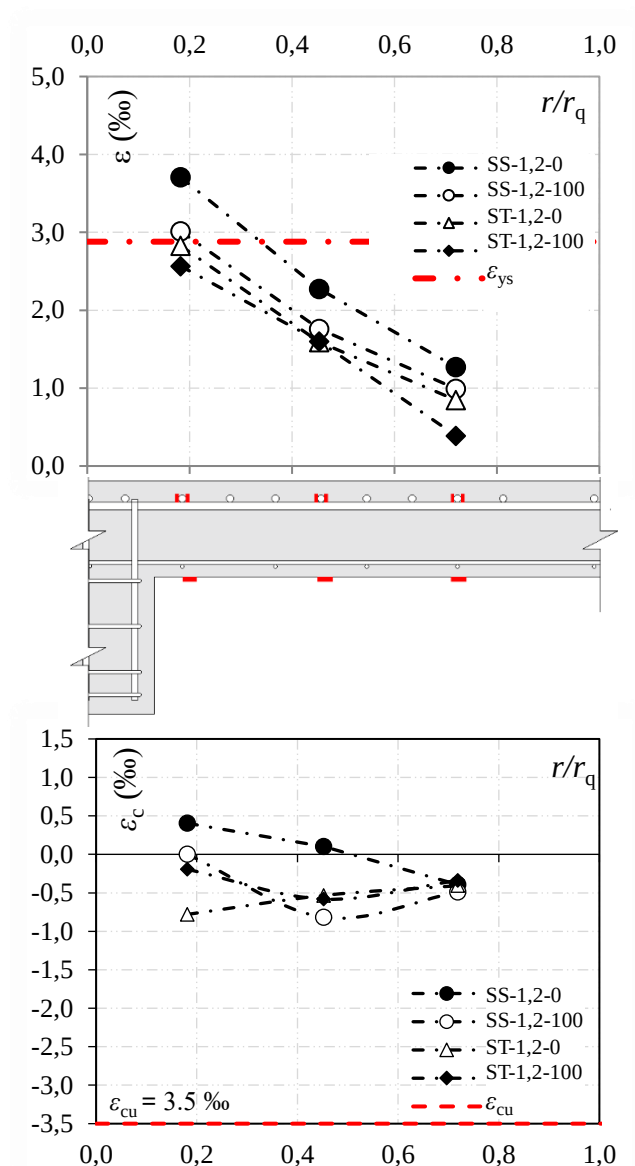


Figura 4.18 - Perfis de deformação circunferencial nas barras de flexão.

Em relação às deformações observadas na superfície do concreto, os valores obtidos indicam que não há risco de esmagamento nas peças submetidas à flexão. Adicionalmente, destaca-se que as maiores deformações foram localizadas nas regiões próximas aos pilares. Conforme explicado por Muttoni (2008), os valores positivos podem ser atribuídos ao aparecimento de tensões de tração que antecedem o puncionamento. Nas Figuras 4.19 a 4.22, são apresentadas as curvas de relação carga-deformação das barras de flexão instrumentadas, bem como da superfície do concreto, analisadas para cada laje individualmente.

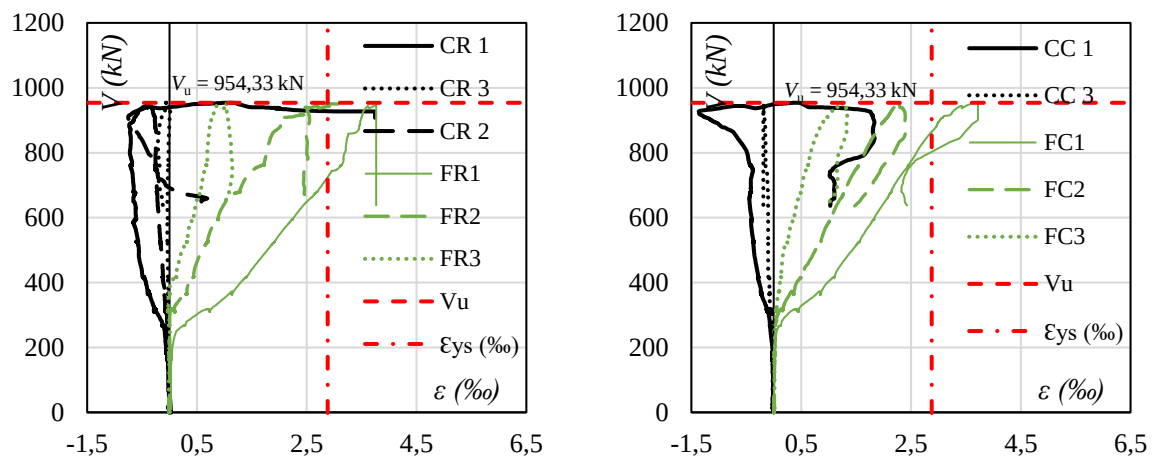


Figura 4.19 – Deformações na armadura tracionada e superfície de concreto da laje SS-1,2-0.

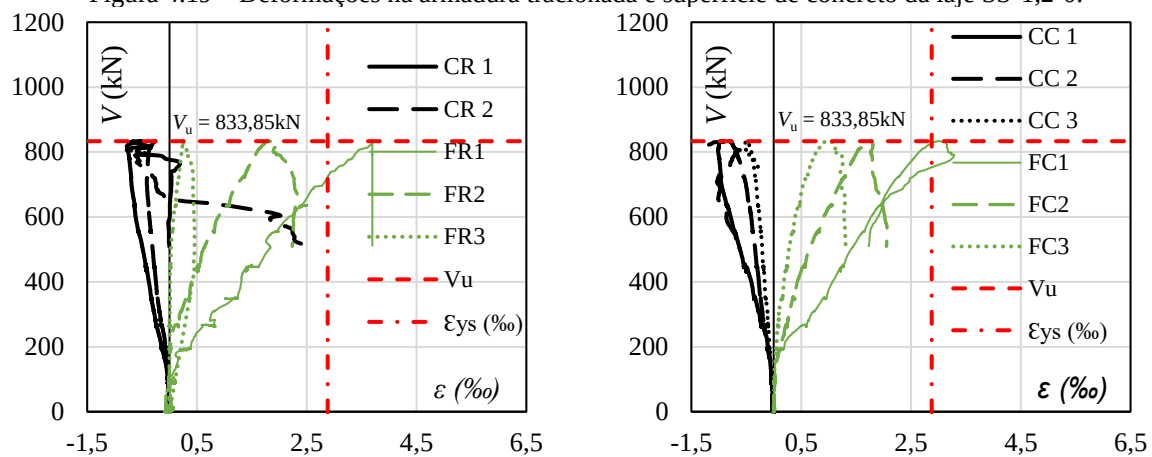


Figura 4.20 – Deformações na armadura tracionada e superfície de concreto da laje SS-1,2-100

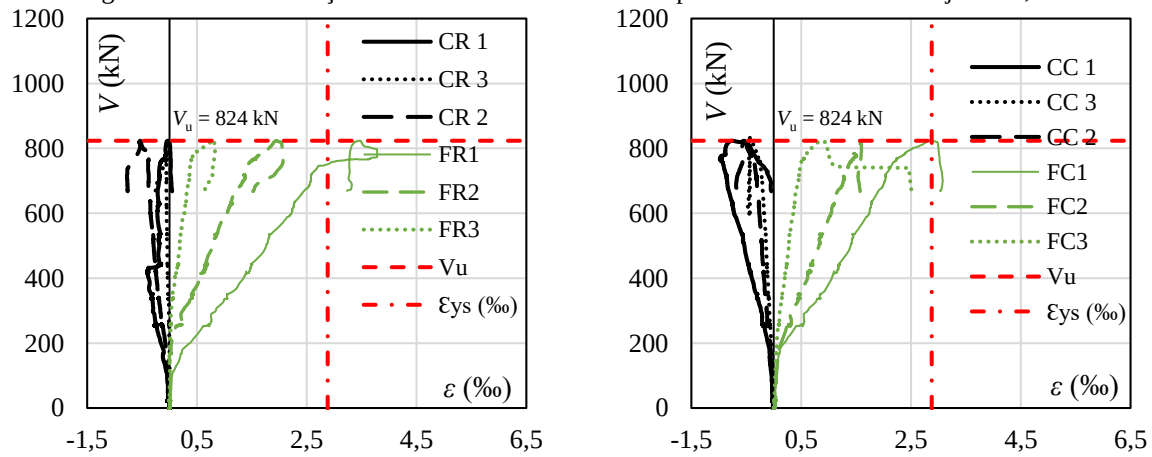
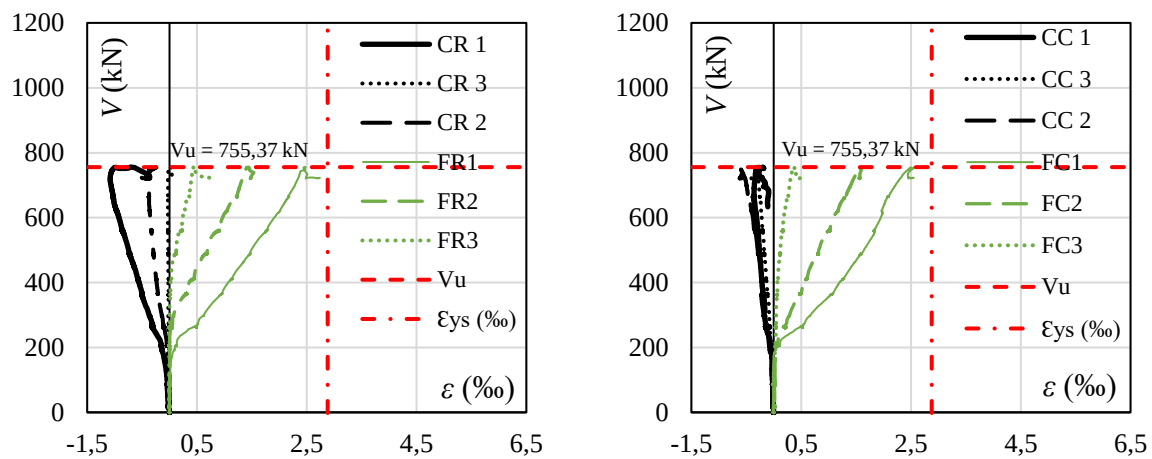


Figura 4.21 – Deformações na armadura tracionada e superfície de concreto da laje ST-1,2-0.



4.3.3 Deformações nas armaduras de cisalhamento

A Figura 4.23 apresenta as deformações médias por camada de armadura de cisalhamento das lajes, enquanto a Figura 4.24 mostra os perfis de deformações ao longo das lajes em função da relação entre a distância das camadas de armadura (s) e a altura útil de cada laje (d).

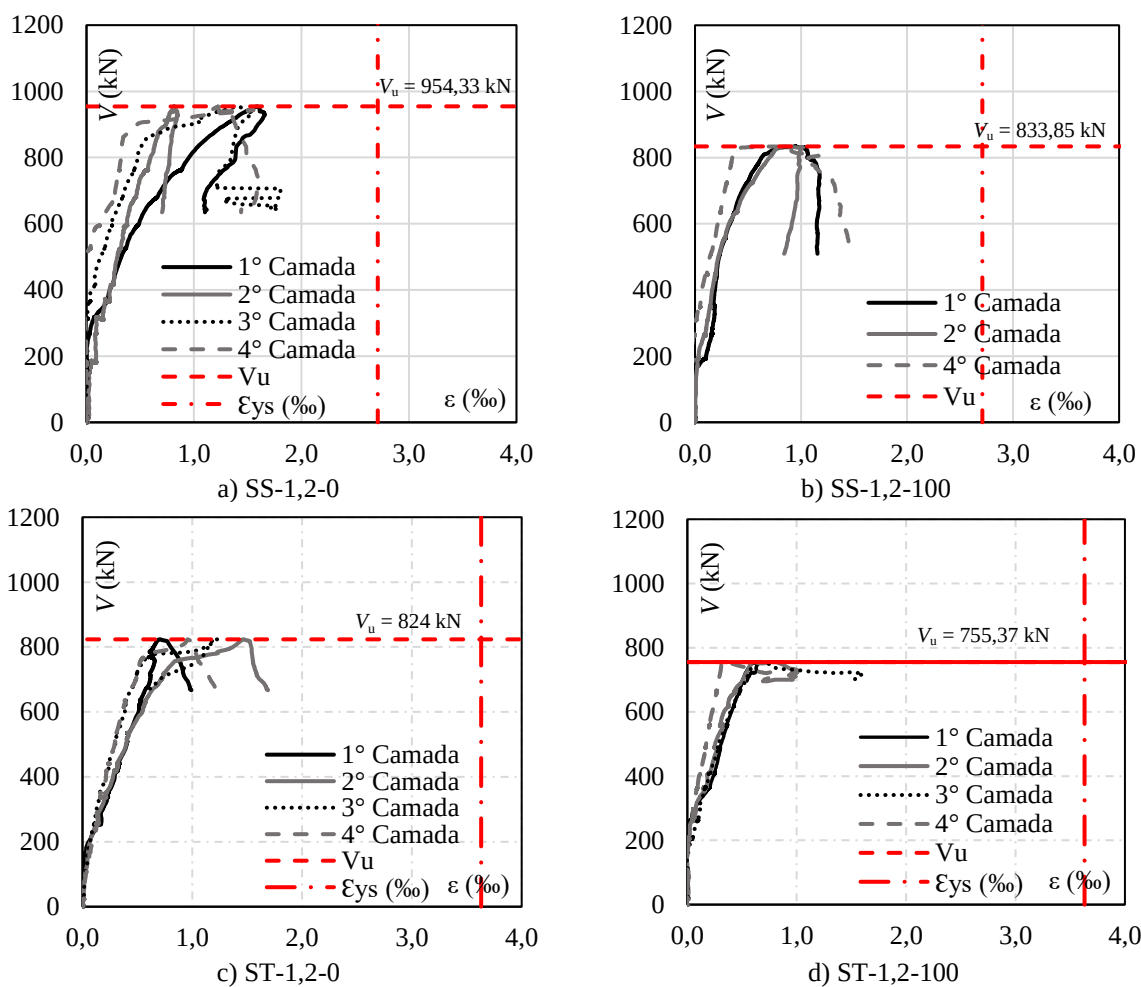


Figura 4.23 – Comportamento carga-deformação das lajes testadas.

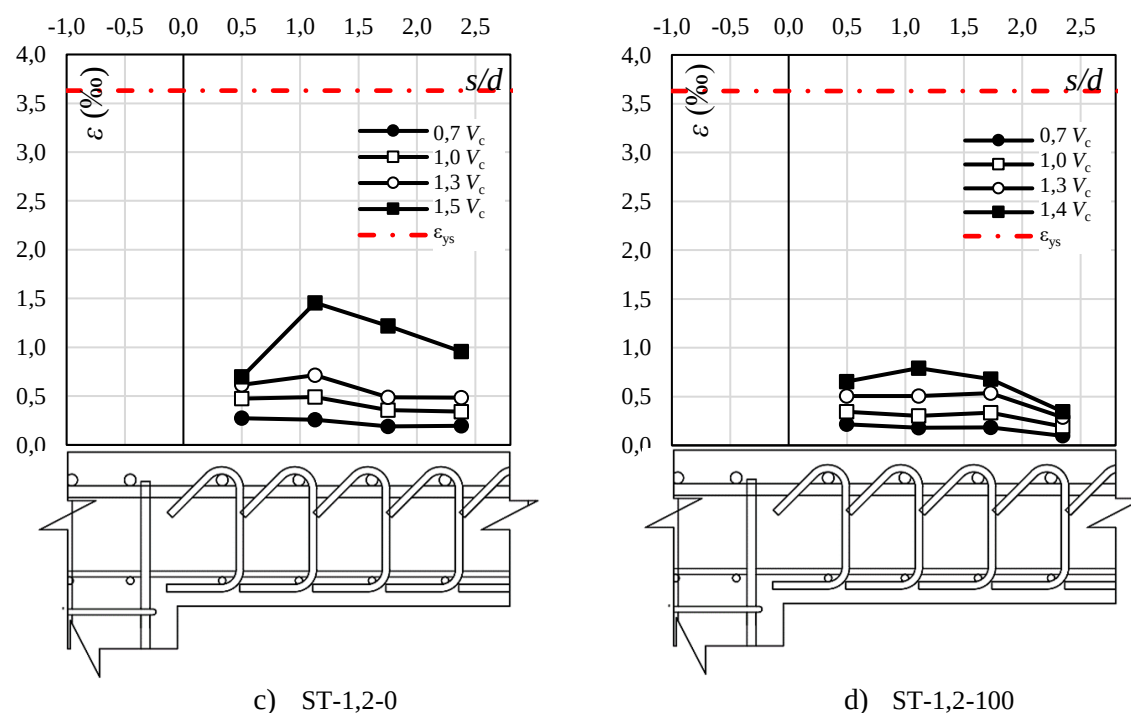
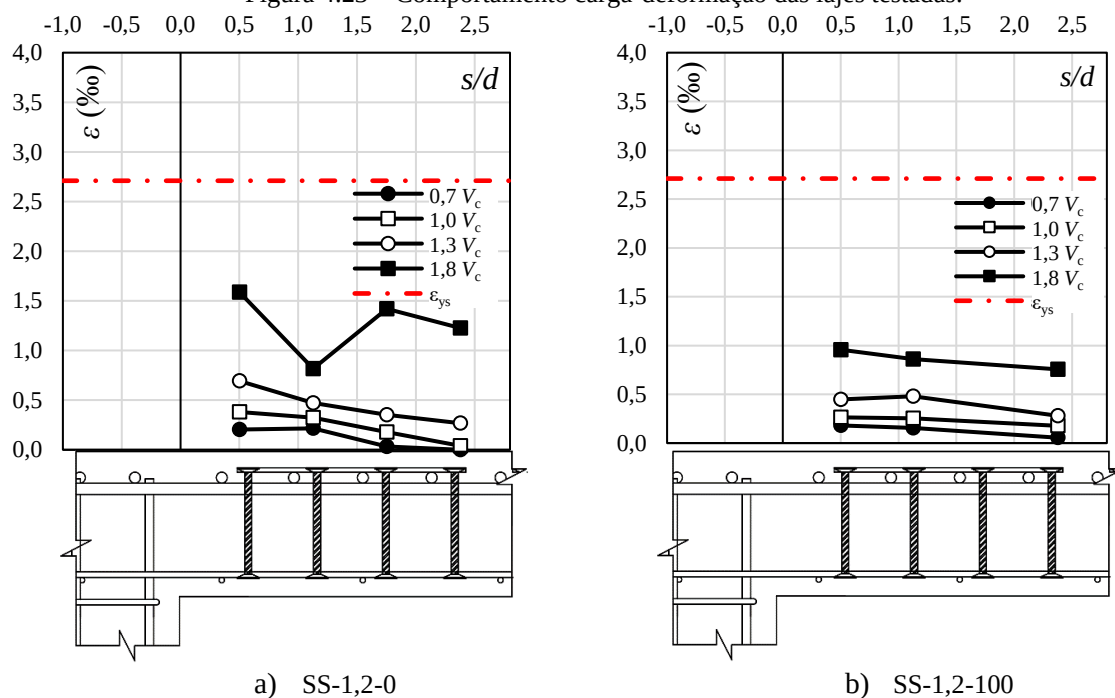


Figura 4.24 – Perfil de deformações de cisalhamento das lajes testadas.

Nas lajes produzidas com *double headed studs* (SS-1,2-0 e SS-1,2-100), foi identificado um comportamento típico de ruptura associado ao arrancamento do cone de concreto, evidenciando a fragilidade desse mecanismo. Esse comportamento é destacado nos gráficos de carga-deformação, sendo diretamente influenciado pela resistência do material e pelo tipo de agregado empregado (Figura 4.25). Devido à ausência de dados relacionados à terceira camada da

armadura de cisalhamento na laje SS-1,2-100, tais informações não foram representadas na imagem correspondente.



Figura 4.25 – Ruptura por arrancamento do cone de concreto na laje SS-1,2-0.

As lajes com estribos isolados (ST-1,2-0 e ST-1,2-100) apresentaram um comportamento diferenciado, caracterizado pela presença de um patamar próximo à carga máxima, o que sugere a ocorrência de desdobramento da armadura. Esse efeito foi ainda mais evidente na laje em que o agregado graúdo natural foi totalmente substituído por agregado reciclado de concreto, conforme demonstrado na Figura 4.26.



Figura 4.26 – Detalhe do estribo individual após a ruptura da laje.

4.3.4 Padrão de fissuração

O mapeamento do padrão de fissuração dos modelos ensaiados foi realizado com o monitoramento da abertura das fissuras, utilizando-se um fissurômetro. Durante os ensaios, o carregamento foi aplicado de forma contínua, sendo realizados intervalos específicos a cada etapa de carga para observar o comportamento das fissuras em cada laje. Foram monitoradas as fissuras de flexão adjacentes à face do pilar, uma das fissuras radiais e a fissura de cisalhamento tangencial.

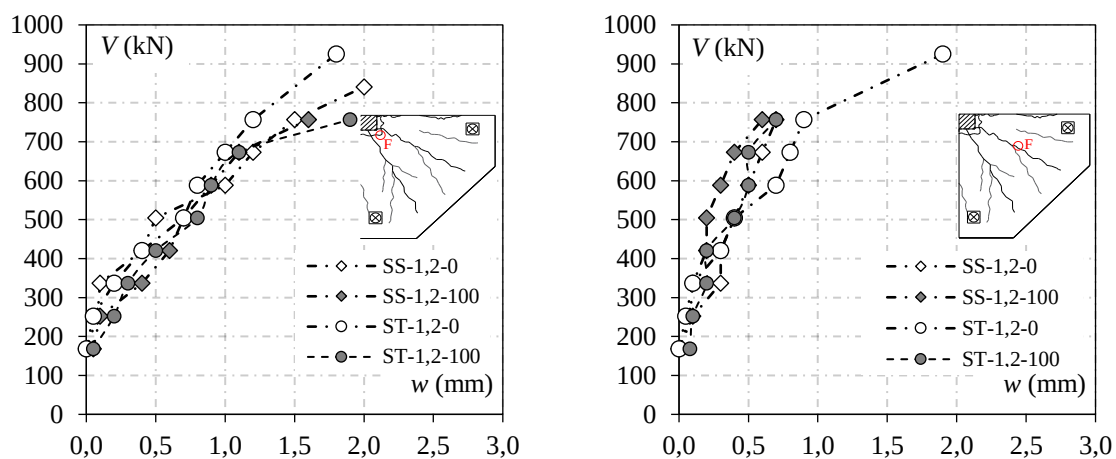
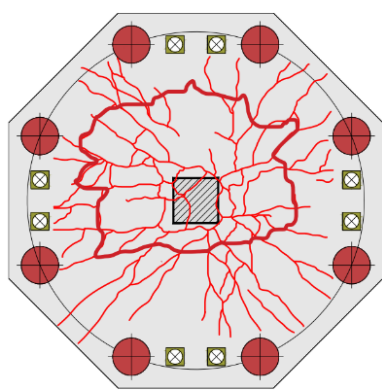


Figura 4.27 – Carga versus abertura de fissura.

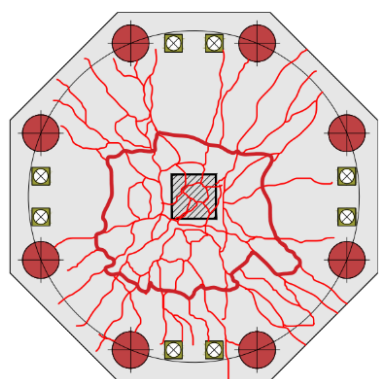
O comportamento das fissuras nas lajes ensaiadas é apresentado na Figura 4.27, por meio do gráfico de relação entre carga e abertura de fissuras. Já as Figuras 4.28 e 4.29 exibem o mapa de fissuração das lajes ensaiadas, representado por desenhos gerados em computador a partir da sobreposição de imagens reais das lajes.



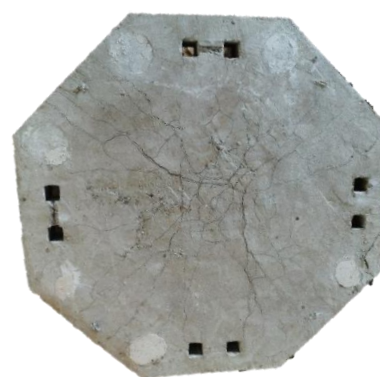
a) SS-1,2-0



b) SS-1,2-0

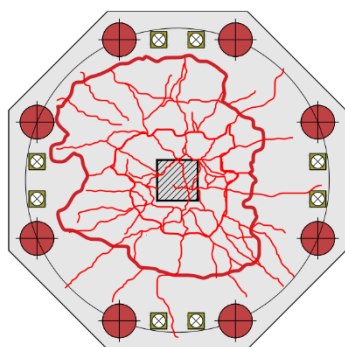


c) SS-1,2-100



d) SS-1,2-100

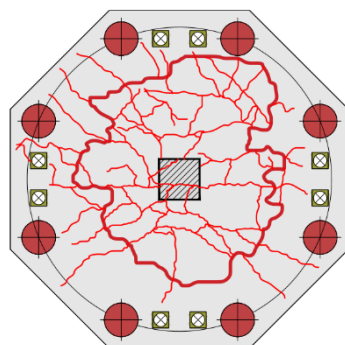
Figura 4.28 – Mapa de fissuração das lajes.



a) ST-1,2-0



b) ST-1,2-0



c) ST-1,2-100



d) ST-1,2-100

Figura 4.29 – Mapa de fissuração das lajes (continuação).

As primeiras fissuras surgiram em torno de 150 kN, sendo inicialmente causadas pelo momento radial. A primeira fissura observada foi uma fissura tangencial ao redor do pilar, seguida pelo aparecimento de fissuras radiais, originadas do momento circunferencial. Em níveis de carregamento próximos ao colapso, novas fissuras tangenciais apareceram, conforme descrito por Mueller et al. (1984).

O comportamento foi similar entre todas as lajes. A análise das figuras permitiu concluir que, embora as fissuras tenham surgido sob cargas semelhantes, nas lajes com *double headed studs* o concreto desempenhou um papel mais relevante no controle da abertura e propagação das fissuras, quando comparado às lajes com estribos.

Após o surgimento, as fissuras permaneceram estáveis até o momento do colapso. Observou-se ainda que as armaduras de cisalhamento auxiliaram na estabilização da fissura tangencial, a qual apresentou crescimento constante até o término do ensaio.

Conforme apontado por Eligehausen e Balogh (1995, apud Pereira Filho, 2021), a armadura de cisalhamento pode funcionar como pontos de entalhe no concreto, gerando zonas de fragilidade. Apesar das limitações técnicas que impediram o corte das lajes, as análises experimentais e os cálculos teóricos das resistências indicam que todas as lajes romperam por punção.

4.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Para estimar a resistência à flexão das lajes analisadas neste trabalho, foram utilizados os modelos propostos por Ferreira (2010) e Pereira Filho (2021). Para todas as lajes avaliadas, o modelo de Ferreira (2010) apresentou os menores resultados, os quais foram comparados às estimativas teóricas descritas na seção 4.5. A Tabela 4.4 a seguir apresenta os valores de resistência à flexão (V_{flex}) das lajes obtidos a partir dos dois modelos utilizados.

Tabela 4.4 – Resistência à flexão das lajes

Laje	V_u (kN)	Ferreira (2010) V_{flex} (kN)	Pereira Filho (2021) V_{flex} (kN)
S-0,7-0	526,75	803,2	963,2
S-0,7-30	560,07	821,7	985,5
S-0,7-100	493,92	825,5	990,5
S-1,2-0	562,52	1105,8	1473,4
S-1,2-30	518,42	1094,4	1456,5
S-1,2-100	531,16	1110,4	1476,4
SS-1,2-0	954,33	1168,0	1617,5
SS-1,2-100	833,85	1182,9	1603,6
ST-1,2-0	824,00	1140,3	1554,7
ST-1,2-100	755,37	1137,8	1541,6

4.5 ESTIMATIVAS NORMATIVAS

4.5.1 Série 1

Foi realizada uma análise normalizada dos resultados experimentais para cada taxa de armadura de flexão das lajes da primeira série deste trabalho. Essa análise foi realizada segundo as recomendações da Eurocode 2 (2014) e do ACI 318 (2019) e a partir das equações destas normas a carga última, V_u , foi dividida por todos os parâmetros normativos que definem a estimativa de resistência teórica, assim os parâmetros foram normalizados em função somente da carga última, conforme as equações abaixo. A Equação 25 apresenta a normalização segundo o Eurocode 2 (2014) e a Equação 26 descreve a normalização do ACI 318 (2019).

$$V_u / (\lambda_{EC2} (\rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot d \cdot u_{1,EC2}) = V_{u,N,EC2} \quad \text{Equação 25}$$

$$V_u / (f_c)^{1/3} \cdot d \cdot u_{1,ACI} = V_{u,N,ACI} \quad \text{Equação 26}$$

A Figura 4.30 apresenta esta análise normalizada da perda da capacidade resistente das lajes com ARCO comparadas as lajes de referência com agregados graúdos convencionais, realizada com o Eurocode 2 (2014) e pelo ACI 318 (2019), onde é possível observar um comportamento normalizado muito semelhante das duas normas. A Eurocode 2 (2014) apresentou uma perda na capacidade resistente de 4% para a laje com a maior taxa de armadura e de 11% para a laje com menor taxa de armadura, nas lajes com 100 % de ARCO. No entanto para as lajes com 30% de ARCO, foi observado um ganho de 3% para a lajes com a taxa de armadura de flexão de 0.7% e uma perda de 6% na capacidade resistente das lajes com 1,2% de taxa de armadura de flexão

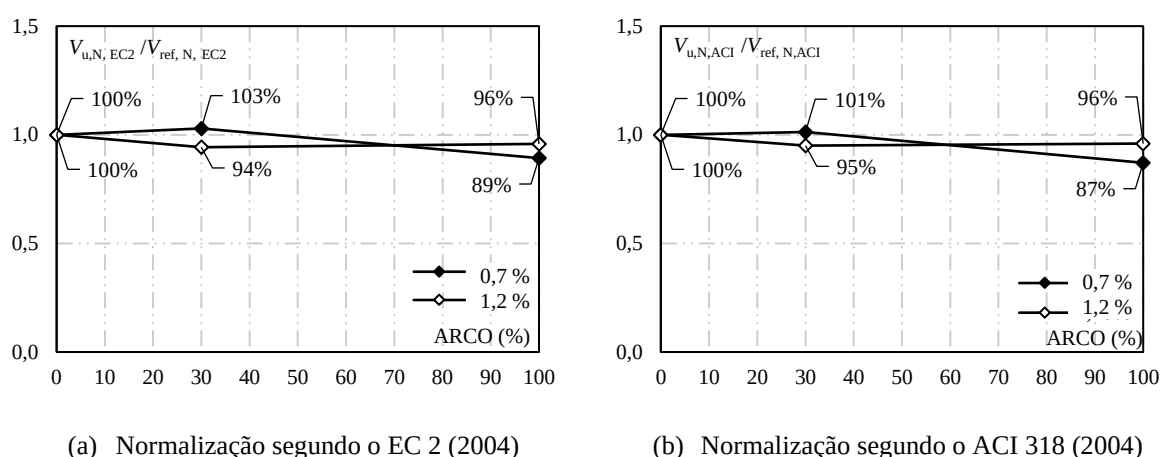


Figura 4.30 – Normalização dos resultados experimentais X normativos.

Uma análise avaliando somente as cargas últimas das lajes com as lajes de referência com 0% de ARCO também foi realizada, apresentada na Figura 4.31. Esta análise permitiu observar uma perda na capacidade resistente de 6% para lajes com 100 % de ARCO. No entanto para as lajes com 30% de ARCO, S-0.7-30 e S-1,2-30, foi observado um ganho de 6% para as lajes com taxa de armadura de flexão de 0.7% e uma perda de 8% na capacidade resistente das lajes com 1,2% de taxa de armadura de flexão. Assim a dispersão dos resultados não pode ser atribuída somente a inserção do ARCO.

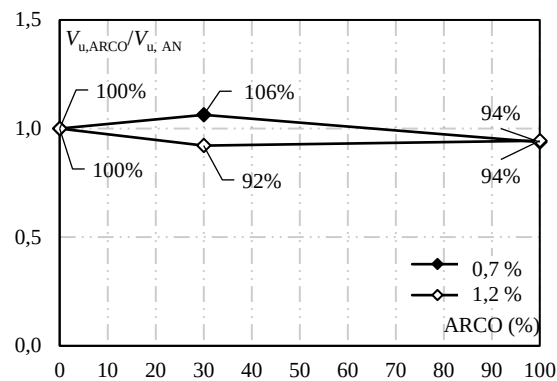


Figura 4.31 –Resultados experimentais $V_{u,ARCO}/V_{u,AN}$ x %ARCO.

Um estudo analítico foi realizado afim de verificar o nível de segurança das previsões teóricas para lajes com ARCO submetidas à punção. As normas técnicas utilizadas nesse estudo foram: ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2019), Eurocode 2 (2014) e *fib* Model Code 10 (2013).

A Tabela 4.5 resume os principais parâmetros para o dimensionamento à punção, força experimental e as estimativas encontradas no estudo analítico. A taxa de substituição de ARCO não influenciou ao ponto de deixar as previsões do Eurocode 2 (2014) inseguras para as lajes com a menor taxa de armadura de flexão. A laje com teor de substituição de ARCO de 30% não apresentou redução no nível de segurança em relação à laje de referência. A laje com teor de substituição de 100% apresentou uma redução de 13% no nível de segurança, que não foi suficiente para tornar a previsão pelo Eurocode 2 (2014) insegura. A ABNT NBR 6118 (2014) apresentou previsões inseguras para quatro das seis lajes estudadas.

Como pode ser observado, as estimativas teóricas do Eurocode 2 (2014) e *fib* Model Code 10 (2013) tiveram desempenho inferior ao nível de segurança desejado ($V_u/V_{teo} = 1$) para as lajes com maior taxa de armadura de flexão (taxa de variação de 1.01 ± 14) independente do teor de substituição de ARCO uma vez que a laje de referência apresentou nível de segurança semelhante as lajes com ARCO. O ACI mesmo não tendo nenhuma consideração para utilização de concreto com ARCO apresentou recomendações seguras e precisas para todas as lajes (taxa de variação de 1.12 ± 6).

Tabela 4.5 – Resumo dos resultados experimentais e previsões normativas

Laje	S-0,7-0	S-0,7-30	S-0,7-100	S-1,2-0	S-1,2-30	S-1,2-100
RCA (%)	0	30	100	0	30	100
f_c (MPa)	20,73	21,92	23,05	22,78	21,52	21,44
V_u (kN)	526,75	560,07	493,92	562,52	518,42	531,16
Modo de Ruptura	PUN	PUN	PUN	PUN	PUN	PUN
$V_u/V_{NBR6118}$	1,07	1,11	0,96	0,87	0,82	0,83
$V_u/V_{ACI 318}$	1,17	1,18	1,02	1,16	1,11	1,12
$V_u/V_{EC 2}$	1,13	1,16	1,01	0,91	0,86	0,87
V_u/V_{MC10}	1,31	1,31	1,12	0,96	0,92	0,93
V_u/V_{flex}	0,66	0,68	0,60	0,51	0,47	0,48

4.5.2 Série 2

A Tabela 4.6 resume os resultados experimentais de resistência à punção (V_u) e compara esses valores com as previsões normativas descritas no item 2.3 do Capítulo 2, conforme as normas ACI 318 (2019), Eurocode 2 (2014), ABNT NBR 6118 (2014), *fib* Model Code 10 (2013), além da previsão de ruptura por flexão. A tabela inclui apenas resistências teóricas calculadas para falhas dentro da zona de armaduras de cisalhamento, seja por tração diagonal ($V_{R,cs}$) ou por esmagamento da biela próximo ao pilar ($V_{R,max}$), excluindo falhas fora dessa região ($V_{R,out}$), conforme o dimensionamento prévio das peças.

Embora fosse desejável realizar o corte das lajes para determinar o plano de ruptura, restrições técnicas impediram sua execução. Por essa razão, utilizaram-se as estimativas normativas e os resultados experimentais para classificar os modos de ruptura. Esses resultados indicaram que todas as lajes testadas apresentaram ruptura por punção. Foram adotadas siglas para representar os modos de ruptura: PUN para lajes sem armadura de cisalhamento com tração diagonal, IN para lajes com ruptura por tração diagonal cruzando as armaduras de cisalhamento, MAX para lajes com ruptura por esmagamento diagonal adjacente ao pilar e FLEX para ruptura por flexão.

Em relação aos modos de ruptura das lajes, observou-se que não houve ruptura por flexão, uma vez que a laje mais próxima da carga de ruptura por flexão apresentou uma relação V_u / V_{flex} igual a 0,59. A possibilidade de ruptura por esmagamento diagonal adjacente ao pilar também foi descartada, pois as deformações máximas do concreto ultrapassaram -1%. Assim, todas as lajes romperam por tração diagonal cruzando as camadas de armaduras de cisalhamento, sendo atribuída a sigla IN.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.6, conclui-se que as previsões para as lajes, fundamentadas nas normas ACI 318 (2019) e Eurocode 2 (2014), mostraram comportamentos semelhantes, com a maioria das lajes situadas na faixa de segurança adequada. A exceção foi a laje SS-1,2-100, que apresentou uma diferença de 12% em relação à estimativa do ACI 318 (2019).

Tabela 4.6 - Resumo dos resultados experimentais e previsões normativas

Laje	S-1,2-0	SS-1,2-0	SS-1,2-100	ST-1,2-0	ST-1,2-100
Armadura de cisalhamento	-	Double Headed Stud	Double Headed Stud	Estribo Individual	Estribo Individual
V_u (kN)	562,5 2	954,33	833,85	824,0	755,37
Modo de Ruptura	PUN	IN	IN	IN	IN
V_u / V_c	1	1,7	1,48	1,46	1,34
V_u / V_{flex}	0,51	0,82	0,70	0,72	0,66
EC2	$V_u / V_{R,cs}$	1,13	0,98	1,02	0,94
	$V_u / V_{R,max}$	0,56	0,97	0,96	0,97
	$V_u / V_{R,EC2}$	0,97	1,13	1,02	0,94
	Modo de Ruptura	PUN	IN	IN	IN
ACI	$V_u / V_{R,cs}$	-	0,97	1,34	1,23
	$V_u / V_{R,max}$	-	1,02	1,25	1,16
	$V_u / V_{R,ACI}$	1,2	1,02	1,34	1,23
	Modo de Ruptura	PUN	MAX	IN	IN
MC1 0	$V_u / V_{R,cs}$	1,03	1,11	1,00	0,93
	$V_u / V_{R,max}$	-	1,00	0,97	0,89
	$V_u / V_{R,MC10}$	1,03	1,11	1,00	0,93
	Modo de Ruptura	PUN	IN	IN	IN
NBR	$V_u / V_{R,cs}$	-	0,64	0,71	0,65
	$V_u / V_{R,max}$	0,41	0,72	0,71	0,72
	$V_u / V_{R,NBR}$	0,9	0,72	0,71	0,66
	Modo de Ruptura	PUN	MAX	IN	MAX

5 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Este capítulo teve como objetivo avaliar o desempenho das seguintes normas e projetos normativos: ACI 318 (2019), ABNT NBR 6118 (2014), Eurocode 2 (2014), *fib* Model Code 2010 (2013). A avaliação foi realizada por meio da comparação entre as previsões de ruptura por punção de lajes lisas com e sem armadura de cisalhamento e os resultados experimentais de disponíveis na literatura, complementados pelos resultados apresentados no capítulo quatro, organizados em forma de banco de dados. Os bancos de dados de lajes lisas convencionais utilizados neste trabalho foram produzidos por Pereira Filho (2016) para lajes lisas sem armadura de cisalhamento e por Pereira Filho (2021) para as lajes armadas ao cisalhamento. Para as lajes lisas com ARCO e sem armadura de cisalhamento, foi produzido um banco de dados com os trabalhos que foram tratados no item 2.4 deste trabalho e este banco de dados foi incorporado nas análises do item 5.1 a seguir. Para lajes lisas com ARCO e com armadura de cisalhamento não foram encontrados trabalhos na literatura para serem discutidos e incorporados no item 5.2.

5.1 BANCO DE DADOS DE LAJES SEM ARMADURAS DE CISALHAMENTO

5.1.1 Considerações Gerais

Para as lajes da primeira série, sem armadura de cisalhamento, a análise foi realizada com o intuito de avaliar a influência de diversos parâmetros que influenciam na resistência à punção na relação ($V_u/V_{Rc,teo}$) e o comportamento das lajes lisas com ARCO sem armadura de cisalhamento comparadas as lajes lisas do banco de dados utilizado por Pereira Filho (2016) modificado. Os parâmetros analisados foram: taxa de armadura de flexão (ρ), altura útil (d), razão entre o raio de carregamento e a altura útil (r_q/d) e a razão entre o perímetro do pilar e a altura útil (u_0/d). Esta análise foi realizada a partir da distribuição de $V_u/V_{Rc,teo}$ em função destes parâmetros, confrontados por uma linha preta cheia que representa o limite característico de segurança ($V_u = V_{Rc,teo}$) e por uma linha preta tracejada que representa o limite de segurança de cálculo ($V_u = V_{Rcd,teo}$), utilizando os fatores de minoração da resistência de cada norma.

Foram considerados para essa análise, lajes com carregamento centrado, altura útil maior que 85 mm, resistência à compressão maior que 20 MPa e lajes com armadura de flexão com resistência entre 400 e 700 MPa. A Tabela 5.1 apresenta um resumo das características das lajes do banco de dados utilizado nessa análise.

Tabela 5.1 - Características das lajes do banco de dados adaptado de Pereira Filho (2016)

Autor	Nº de Lajes	r_q (mm)	C (mm)	Seção	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	d_g (mm)	f_{ys} (MPa)	E_s (GPa)	V_u (kN)
Tomaszewicz (1993)	13	1100 - 2500	100 - 200	- S	88 - 275	1,5 - 2,6	64,3 - 119,0	16	500	200	330 - 2450
Marzouk E Hussein (1991)	10	750	150 - 300	- S	90 - 120	0,7 - 2,1	42 - 80	20	490	200	249 - 645
Regan (1986)	11	685 - 1372,5	54 - 250	- S	93 - 200	0,8 - 1,5	29 - 53,3	10 - 20	464 - 628	200	170 - 825
Bernaert E Puech (1966)	6	685	203	S	114 - 124	0,01 - 0,017	20,6 - 41,4	16	432	200	328 - 439
Manterola (1966)	3	1500	100 - 450	- S	107	0,5	26,4 - 34,2	16	451	200	175 - 294
Moe (1961)	5	890	203 - 305	- S	114	1,1 - 1,5	20,8 - 24,5	38	399 - 483	171 - 195	343 - 433
Lips <i>et al.</i> (2012)	4	1500	130 - 340	- S	193 - 353	1,5 - 1,6	30,5 - 42,5	16	562 - 583	210	1135 - 2491
Birkle <i>et al.</i> (2008)	3	1150 - 2000	250 - 350	- S	124 - 260	1,1 - 1,5	31,4 - 36,2	14 - 20	488 - 531	195 - 200	483 - 1046
Guandalini <i>et al.</i> (2004)	11	750 - 3000	130 - 260	- S	96 - 464	0,25 - 1,5	27,6 - 40,5	4 - 16	400 - 633	200	118 - 2153
Hallgren (1996)	6	1200	250	C	194 - 202	0,3 - 1,2	84,1 - 108,8	18	596 - 634	195 - 231	565 - 1041
Ramdane (1993)	15	1372	150	C	98 - 102	0,6 - 1,3	33,6 - 127	10 - 20	550 - 650	200	169 - 405
Tolf (1988)	4	1189	250	C	197 - 200	0,5 - 0,8	28,6 - 31,7	32	657 - 670	200	444 - 603
Marti <i>et al.</i> (1977)	1	1300	300	C	143	1,5	43,2	10	558	206	628
Pralong <i>et al.</i> (1979)	1	1300	300	C	171	1,2	32,8	8	515	204	626
Schaefer (1978)	2	840	120 - 210	- C	113 - 170	0,6 - 0,8	23,1 - 23,3	32	420 - 450	200	280 - 460
Ladner (1973)	1	600	226	C	109	1,2	39,7	32	541	200	362
Kinnunem e Nylander (1960)	4	855	150 - 300	- C	117 - 128	0,8 - 1,1	30,8 - 34,9	32	441 - 456	210	255 - 430

Diante desse banco dados, foram reunidas 67 lajes lisas com ARCO sem armadura de cisalhamento, somadas às seis lajes da primeira série de ensaios desse trabalho que compõem

o programa experimental dessa pesquisa afim de se realizar um estudo comparativo. A Tabela 5.2 apresenta o resumo das lajes lisas com ARCO utilizadas como referências neste trabalho.

Tabela 5.2 - Características das lajes do banco de dados das lajes lisas com ARCO

Autor	Nº de Lajes	r_q (mm)	C (mm)	Seção	u_0/d	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	d_g (mm)	f_{ys} (MPa)	E_s (GPa)	V_u (kN)
Rao <i>et al.</i> (2012)	6	500	100	S	11,76	34	0,63	30,86 - 34,35	20	415	200	41,4 – 48,2
Reis <i>et al.</i> (2015)	8	500	150	S	8,33	72	0,93	35,1 – 37,1	22,4	640	200	152,2 – 174,8
Francesconi <i>et al.</i> (2016)	15	500	200	S	22,85	35	0,56	50,8 – 71,1	12	450	200	64,9 – 72,5
Mahmoud <i>et al.</i> (2018)	8	550	100	S	5,71	70	0,72	31,6 – 39,7	12,5 – 25	510	200	122,0 – 172,5
Xiao <i>et al.</i> (2019)	8	700	200	S	2,02	99	1,14	28,5– 39,9	25	334,59	200	303,4 – 320,0
Sahoo E Singh (2020)	12	550	150	S	2,00	75	1,16	28,4 – 43,7	12,5	487	200	205,2
Saadon <i>et al.</i> (2022)	4	380	60	S	3,00	60	0,014	17,38 – 25,36	-	693	200	84,85 – 94,46
Leelatanon <i>et al.</i> (2022)	10	700	200	S	8,00	73	0,015	22,2 – 28,1	18,9 – 19,1	-	-	150,4 – 260,9
Este trabalho	12	1125	300	S	7,28	165	0,7 – 1,4	20,7– 23,0	19	550	200	493,9– 562,5

5.1.2 Análise Comparativa Dos Resultados Experimentais e Recomendações Normativas

A análise comparativa das normas apresentada na Figura 5.1, representa de forma gráfica a análise da precisão das recomendações onde observa-se uma comparação da linha de tendência dos resultados com a situação ideal ($V_u = V_{Rc,teo}$). Nos gráficos são representados o banco de dados produzido por Pereira Filho (2016) simbolizado por quadrados na cor cinza, o banco de dados de lajes lisas com ARCO sem armadura de cisalhamento representado por quadrados na cor preta e as lajes do programa experimental deste trabalho, representadas por quadrados na cor vermelha. As recomendações normativas mostraram-se eficientes na estimativa da resistência a punção de lajes lisas com ARCO.

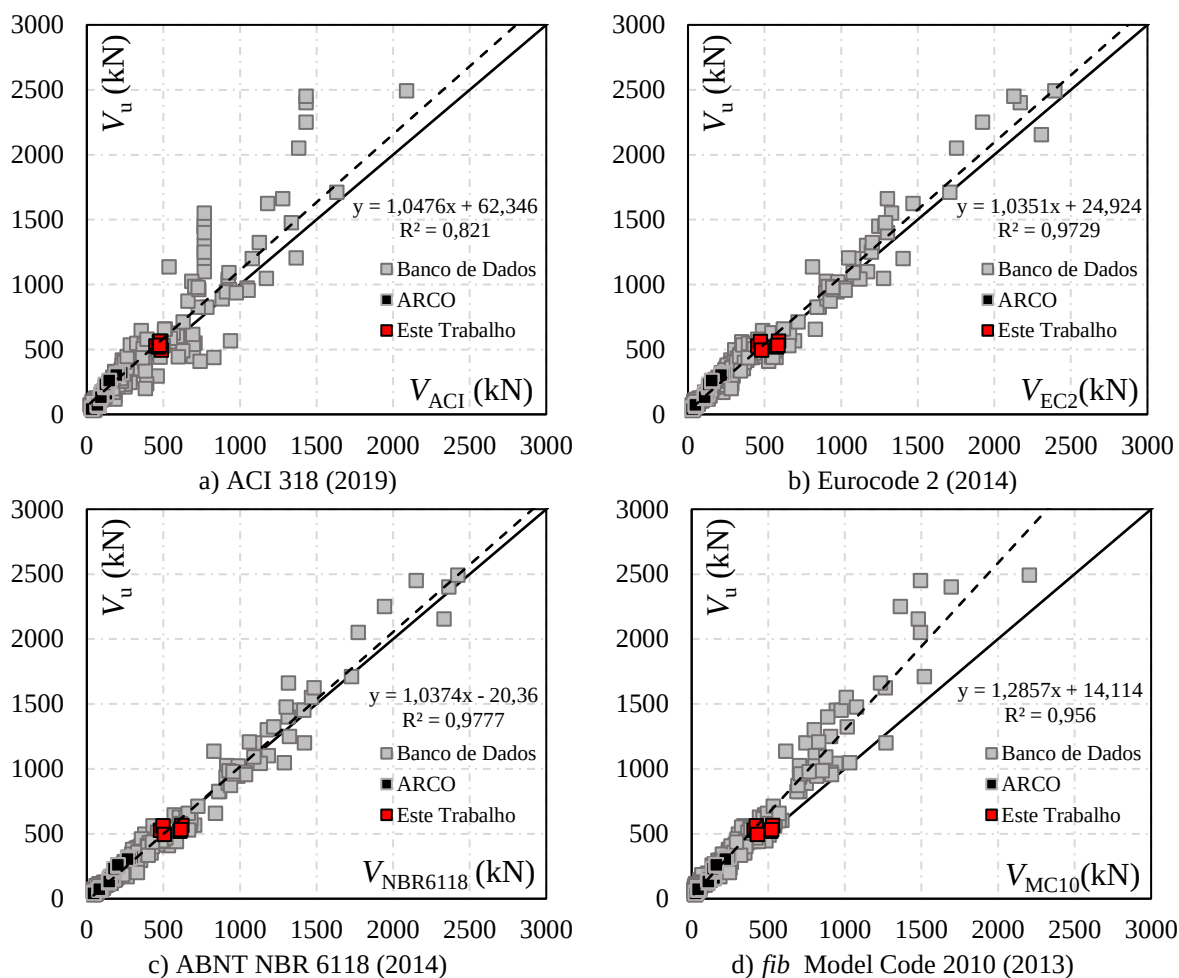


Figura 5.1 – Análise comparativa dos resultados experimentais e recomendações normativas

5.1.3 Influência de d na Relação $V_u/V_{Rc,teo}$

Segundo Pereira Filho (2016), a análise da influência de d na relação $V_u/V_{Rc,teo}$ indicou que os resultados do ACI 318 (2014) foram influenciados pela altura útil principalmente para lajes com d acima de 200 mm, apresentando uma redução nos resultados e até contra a segurança uma vez que o modelo não considera o efeito escala nas suas recomendações. Nas normas Eurocode 2 (2014) e ABNT NBR 6118 (2014), o efeito escala é limitado de modo que as estimativas aparentam não representar os resultados experimentais. O *fib* Model Code 2010 (2013) estimou com precisão os efeitos da influência da altura útil na resistência à punção.

As lajes lisas com ARCO encontradas na literatura apresentavam altura útil máxima de 72 mm, o que tornou a análise comparativa ao banco de dados insuficiente, uma vez que as lajes apresentadas no mesmo possuíam d com valor mínimo de 88 mm, desse modo para uma análise comparativa de lajes com ARCO que demonstrem um comportamento à punção mais evidente

foi necessário a avaliação de lajes com altura útil maior, como pode ser verificado na Figura 5.2.

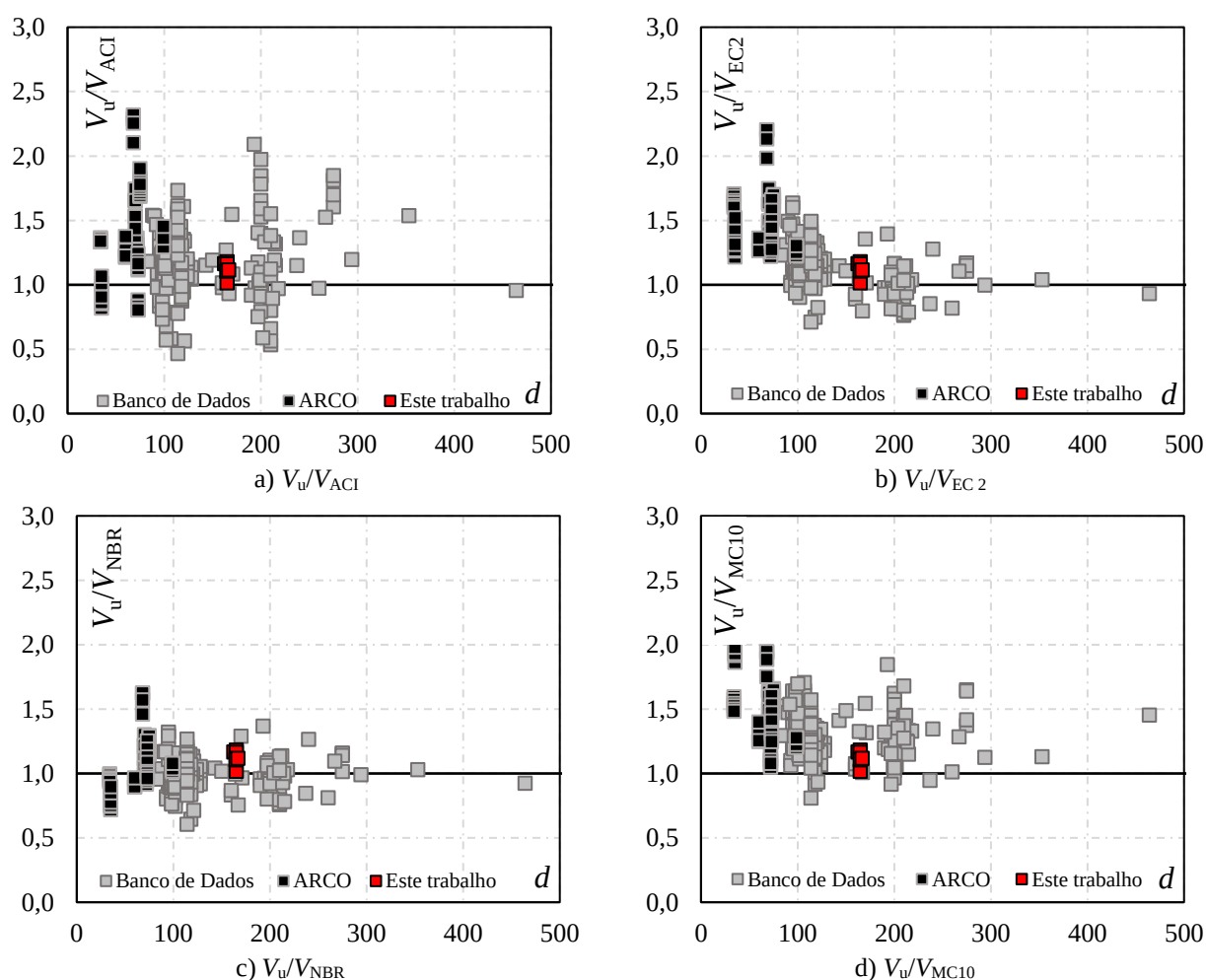


Figura 5.2 – Influência de d na relação $V_u/V_{Rc,teo}$

5.1.4 Influência de ρ na Relação $V_u/V_{Rc,teo}$

Pereira Filho (2016) afirma que a taxa de armadura de flexão exerce um forte impacto nas previsões teóricas do ACI 318 (2014) uma vez que este modelo desconsidera a influência desse parâmetro nas suas recomendações, mostrando-se inseguro para lajes pouco armadas ($\rho < 0,6\%$), sendo progressivamente conservador conforme a taxa de armadura de flexão aumenta. Isso não ocorre nos modelos do Eurocode 2 (2014) e ABNT NBR 6118 (2014) uma vez que apresentam um crescimento dos resultados com o aumento da taxa de armadura, evidenciando que a proporcionalidade da raiz cúbica da taxa de armadura pode não ser a mais adequada para representar a influência da taxa de armadura de flexão. As recomendações do *fib* Model Code 2020 (2013) mantêm a média de seus resultados aproximados nas diferentes classes, mostrando que

considerar a rotação da laje em suas previsões descreve a influência da taxa de armadura de flexão com precisão. Desse modo, as lajes produzidas neste trabalho têm como objetivo avaliar a influência da variação da taxa de armadura de flexão na resistência à punção de lajes lisas com ARCO uma vez que as taxas encontradas na literatura são muito semelhantes às taxas analisadas no banco de dados de lajes lisas de concreto convencional sem armadura de punção e diversos autores citados ressaltam a influência deste parâmetro, como pode ser verificado na Figura 5.4.

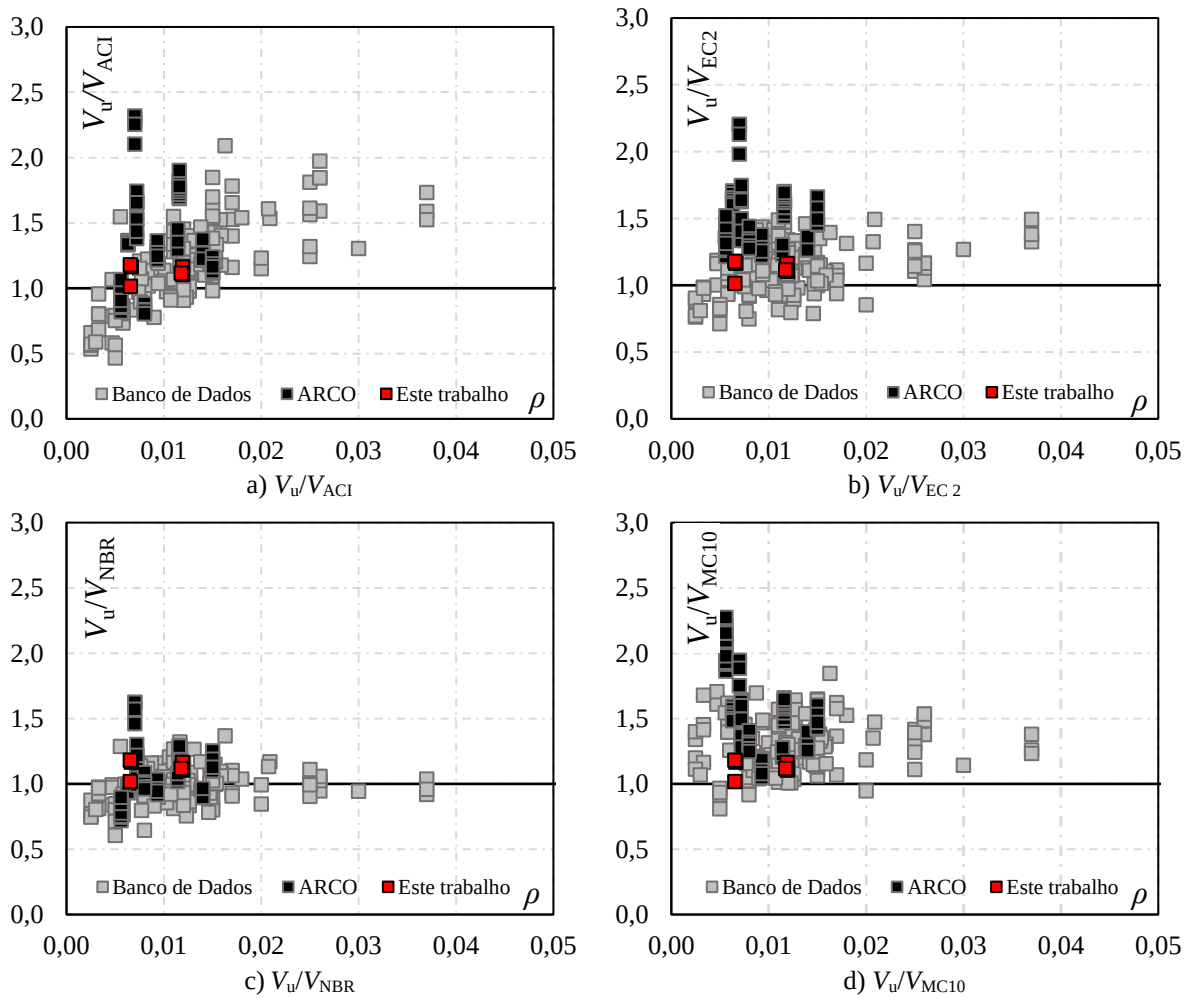


Figura 5.3 – Influência de ρ na relação $V_u/V_{RC,teo}$

5.1.5 Influência de r_q/d na Relação $V_u/V_{RC,teo}$

O banco de dados definido por Pereira Filho (2016) apresentou uma forte dispersão nas previsões normativas do ACI 318 (2014) em função de r_q/d uma vez que este código não considera o efeito escala nas suas recomendações. No entanto, este comportamento não ocorre para as previsões do Eurocode 2 (2014) e ABNT NBR 6118 (2014) em virtude da limitação do efeito escala. Para o *fib Model Code 2010* (2023), as estimativas foram mais precisas quanto a

influência de r_q/d . Deste modo, o programa experimental proposto neste trabalho confirmou a influência de parâmetros físico na resistência à punção, a partir da variação de r_q e d , conforme Figura 5.5.

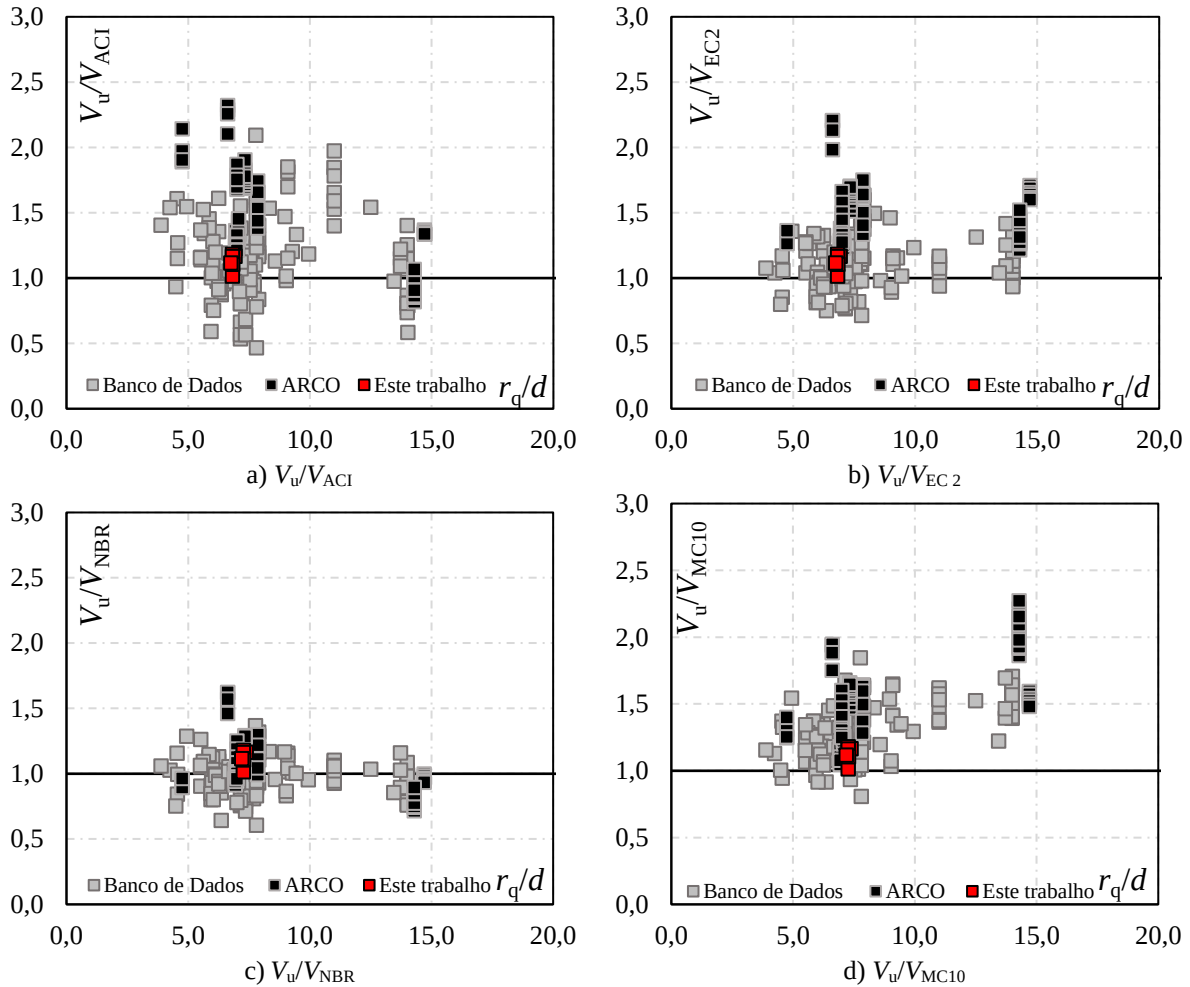


Figura 5.4 – Influência de r_q/d na relação $V_u/V_{RC,teo}$

5.1.6 Influência de u_0/d na Relação $V_u/V_{RC,teo}$

A análise da relação u_0/d avalia a as proporções do pilar em relação à altura útil da laje, Pereira Filho (2016), ressalta que embora o ACI 318 (2014) apresente uma tendência decrescente nos resultados conforme as dimensões do pilar aumentam, as lajes que se enquadram na faixa u_0/d menor que 4, são em maioria com taxas de armadura de flexão acima de 1,5% e as que se enquadram na faixa acima de 12 tem taxa de armadura inferiores, o que pode tornar a interpretação equivocada. Em virtude da limitação do efeito escala imposta pelo Eurocode 2 (2014), os resultados desta norma apresentam crescimento devido à altura útil menores. A NBR 6118 (2014) não apresentou resultados que demonstrassem influência de u_0/d em $V_u/V_{RC,teo}$. Os

resultados apresentados para o *fib* Model Code 2010 (2013) evidenciam que as lajes com u_0/d maiores que 8 apresentaram um crescimento na média devido a forma quadrada dos pilares e a limitação de u_0 imposta pela norma não representar com precisão o comportamento experimental.

Deste modo, a análise da influência de u_0/d em $V_u/V_{RC,teo}$ se mostra importante uma vez que o programa experimental desta pesquisa possui valores de u_0/d considerados adequados aos utilizados no banco de dados de Pereira Filho (2016), conforme Figura 5.5.

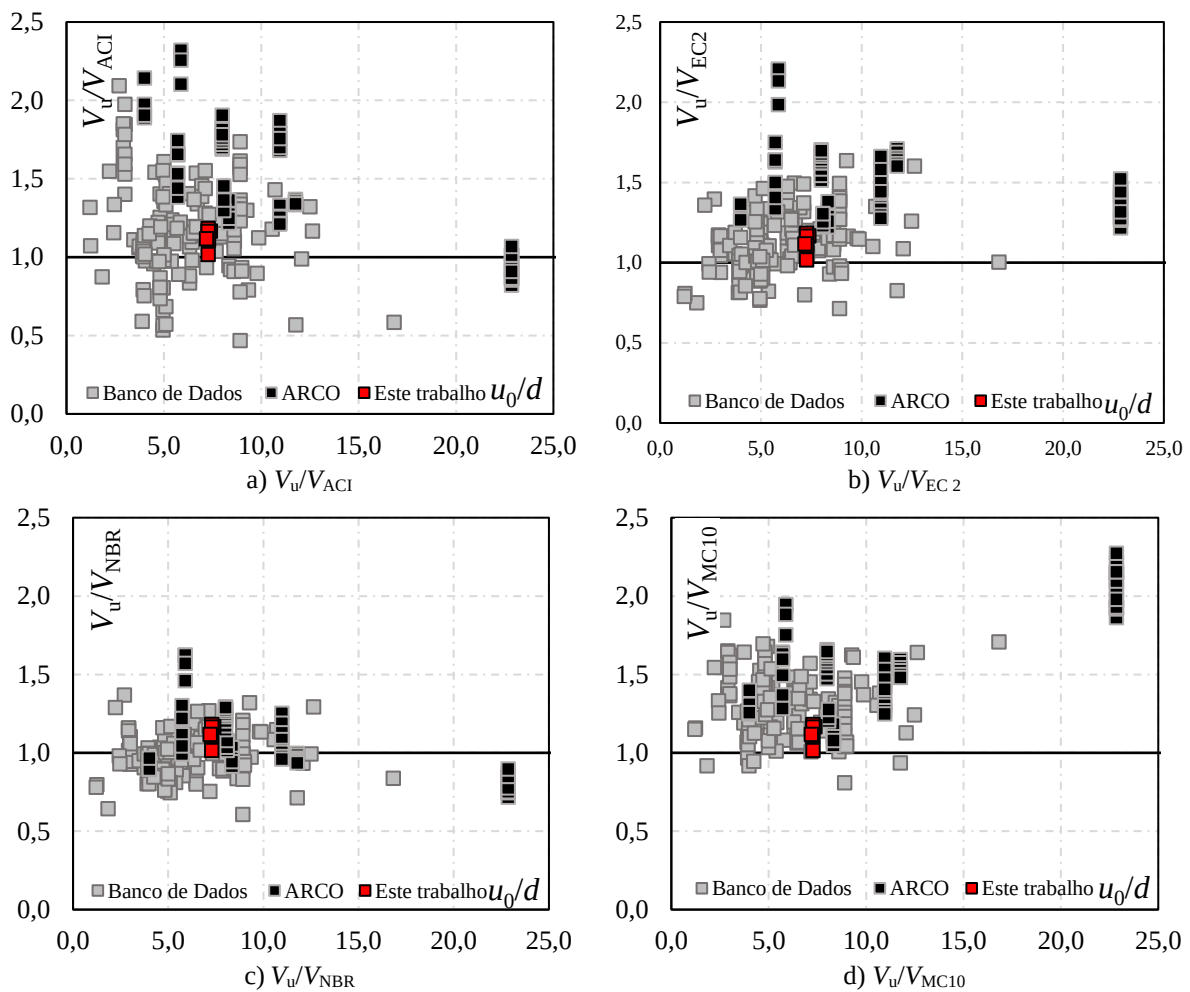


Figura 5.5 - Influência de u_0/d na relação $V_u/V_{RC,teo}$

5.2 BANCO DE DADOS DE LAJES COM ARMADURAS DE CISALHAMENTO

5.2.1 Considerações Gerais

Para as lajes da segunda série, com armadura de cisalhamento, as análises do banco de dados foram direcionadas para avaliar a eficácia das normas na verificação da resistência à punção em lajes armadas com diferentes tipos de armaduras de cisalhamento e com a incorporação de ARCO. O banco de dados de Pereira Filho (2021), incluiu armaduras de cisalhamento do tipo estribo individual (“single leg”) e conectores de aço tipo “stud”, permitindo comparar o desempenho desses sistemas e a precisão das normas na estimativa da resistência à punção. Pereira Filho (2021) ressalta que embora as recomendações normativas não contemplem todos os tipos de armaduras de cisalhamento presentes no banco de dados, geralmente sugerindo detalhamentos semelhantes aos conectores de aço e estribos bem ancorados, como os utilizados neste programa experimental, a capacidade das normas de avaliar a resistência à punção em lajes reforçadas com armaduras de cisalhamento e ARCO foi analisada de forma sistemática.

O banco de dados de Pereira Filho (2021) foi produzido considerando 216 resultados de lajes lisas com diversos tipos de armaduras de cisalhamento obtidos em 46 trabalhos de diversos autores, analisando somente lajes submetidas a carregamento centrado e que apresentaram ruptura por punção. Para as análises deste capítulo foram considerados somente os grupos de armaduras de conectores de aço e estribos bem ancorados, a Figura 5.6 apresenta os modelos de armaduras de cisalhamento dos trabalhos que foram selecionados. Para o grupo de conectores de aço, foram considerados 3 modelos, *double headed studs* (Figura 5.6-a), *studs rail* (Figura 5.6-b) e seções “I” (Figura 5.6-c) todos com ancoragem na altura ou ultrapassando as barras de flexão inferiores e superiores; No grupo de estribos bem ancorados encontram-se estribos fechados (Figura 5.6-d), estribos abertos na parte superior (Figura 5.6-e) ou inferior (Figura 5.6-f), estribos contínuos (Figura 5.6-g), estribos de perna única (Figura 5.6-h) e estribos abertos inclinados (Figura 5.6-i) com todos com ancoragem envolvendo as barras de flexão inferiores e superiores.

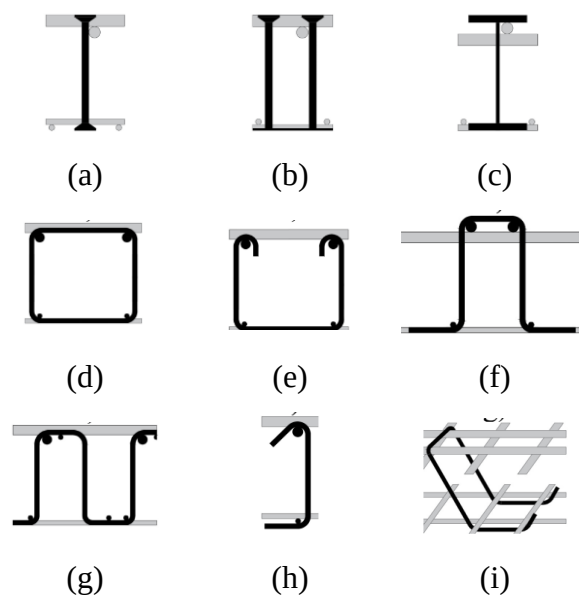


Figura 5.6 – Armaduras de cisalhamento utilizadas nas análises (adaptado de Pereira Filho, 2021).

Nas Tabela 5.3 e Tabela 5.4 são apresentadas de forma resumida as características geométricas e propriedades dos materiais das lajes selecionadas para compor o banco de dados das análises deste tópico. São apresentados os autores, o número de lajes ensaiadas aoi de aplicação de carga das lajes (r_q), diâmetro ou lado do pilar (c) para lajes com pilares com seções circulares (C) ou quadrados (S), altura útil (d), taxa de armadura de flexão (ρ), resistência média à compressão do concreto (f_c), diâmetro máximo do agregado graúdo (d_g), também são apresentados a tensão de escoamento (f_{ys}) e modulo de elasticidade (E_s) da armadura de flexão.

Tabela 5.3 – Resumo das características das lajes do banco de dados armadas com conectores de aço adaptado de Pereira Filho (2021).

Autor	Nº de lajes	r_q (mm)	c (mm)	Seção	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	d_g (mm)	f_{ys} (MPa)	E_s (MPa)
Ferreira <i>et al.</i> (2014)	10	1124	270 - 450	C e S	140 - 144	1,5 - 2,0	47,0 - 50,0	9,5	540	213
Regan (2009)	3	1378	300	S	150	1,5 - 1,8	25,6 - 33,1	16	500	210
Lips, Ruiz e Muttoni (2012)	10	1380	130 - 440	S	193 - 353	1,5 - 1,6	30,5 - 36,6	16	557	210
Birkle (2004)	11	1000 - 1900	250 - 350	S	124 - 260	1,1 - 1,5	29,0 - 36,3	16	488 - 531	195 - 200
Beutel (2002)	10	1200	200 - 263	C	250 - 350	0,5 - 1,3	23,2 - 37,3	16	889	197
Broms (2007)	2	1215	300	S	141 - 151	1,2 - 1,3	38,4 - 38,8	16	520	210
Gosav <i>et al.</i> (2016)	5	1000	300	S	157 - 217	1,2 - 1,3	17,5 - 23,8	16	583	200
Halvonik e Majtanova (2018)	4	1180	180	C	200	1,6	28,1 - 41,0	16	538 - 577	200
Ricker <i>et al.</i> (2017)	1	1200	300	S	165	1,9	22,9	16	605	202
Einpaul <i>et al.</i> (2016.1)	2	1300	260	S	200 - 10	1,5 - 1,6	31,0 - 36,0	16	515 - 590	200
Einpaul <i>et al.</i> (2016.2)	3	765 - 1926	260	S	203 - 211	1,5 - 1,6	30,9 - 32,7	16	510	200
Furche e Bauermeister (2017)	2	1200	263	C	250	1,3 - 2,3	29,9 - 31,2	16	905	200
Cantone <i>et al.</i> (2019)	4	765 - 1100	260	S	203 - 212	1,5 - 1,6	31,9 - 37,0	16	570 - 586	200
Regan e Samadian (2001)	4	1445	200	S	159 - 160	1,3 - 1,6	37,6 - 43,0	20	540 - 670	210
Mokhtar <i>et al.</i> (1985)	7	900	250	S	116	1,4	23,0 - 40,0	16	672	210
Vaz <i>et al.</i> (2009)	5	825	150	C	89 - 91	1,4	38,7 - 39,4	16	673	210
Dam <i>et al.</i> (2017)	3	1525	305	S	217	0,9 - 1,3	33,0 - 42,1	13	450 - 460	200
Gomes e Regan (1999)	4	1445	200	S	153 - 158	1,3	34,5 - 39,2	16	670	585
Este Trabalho	2	1125	300	S	159 - 162	1,2	29,2	19	527	192

Tabela 5.4 – Resumo das características das lajes do banco de dados armadas com estribos bem ancorados nas barras de flexão adaptado de Pereira Filho (2021).

Autor	Nº de lajes	r_q (mm)	c (mm)	Seção	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	d_g (mm)	f_{ys} (MPa)	E_s (MPa)
Schmidt, Kueres e Hegger (2019)	11	1200 - 1700	280 - 400	S	224 - 322	1,4	30,3 - 37,8	16	510 - 574	200
Lima (2020)	3	1124	300	S	143 - 148	0,9 - 1,0	29,9 - 30,0	9,5	549 - 593	188 - 197
Vollum <i>et al.</i> (2010)	6	1372	270	S	174	0,6 - 1,3	23,2 - 27,2	20	567	210
Oliveira, Melo e Regan (2000)	4	855	120	S	93 - 105	1,2 - 1,5	60,0 - 62,9	25	575 - 695	218 - 232
Trautwein (2001)	3	1350	200	S	139 - 164	1,2 - 1,4	40,6 - 45,7	19	560	228
Andrade (2000)	7	855	120	S	89 - 100	1,3 - 1,5	36,2 - 51,9	25	571	238
Beutel e Hegger (2002)	2	1200	400	S	190	0,8	21,9 - 29,8	16	532 - 549	221
Lips <i>et al.</i> (2010)	10	1468	130 - 520	S	193 - 354	1,5 - 1,6	30,4 - 37,1	16	580 - 709	200
Hegger <i>et al.</i> (2007)	1	1200	290	S	160	1,96	29,8	16	558	200
Yamada <i>et al.</i> (1992)	7	750	300	S	167	1,1	25,9 - 27,8	16	568	210
Chana e Desai (1992)	9	1200	400	S	188 - 210	0,8 - 0,9	30,6 - 36,3	16	520	210
Regan (1980)	4	1293	240	S	128	1,3	26,7 - 35,2	16	518	210
Regan e Samadian (2001)	2	1445	200	S	160	1,1	39,8 - 44,1	16	540	210
Einpaal <i>et al.</i> (2016)	1	1468	260	S	205	1,5	0,7	16	576	210
Este Trabalho	2	1125	300	S	160	2,0	20	19	527	192

5.2.2 Desempenho as Armaduras de Cisalhamento

Diante do banco de dados produzido por Pereira Filho (2021), foram adicionadas as lajes lisas com armadura de cisalhamento sem ARCO (SS-1,2-0 e ST-1,2-0) e com ARCO (SS-1,2-100 e ST-1,2-100) produzidas neste programa experimental para avaliar o desempenho das armaduras de cisalhamento através da análise do incremento de resistência, medido através da razão entre carga última (V_u) observada nas lajes e a resistência da laje de referência, S-1,2-0, sem armadura de cisalhamento e sem ARCO (V_{Ref}) produzida na primeira série de ensaios. Para as lajes analisadas por Pereira Filho (2021) foram consideradas as lajes de referência de cada autor e para aqueles que não tinha uma referência direta no trabalho original foi utilizada a previsão de resistência para lajes sem armadura de cisalhamento da ABNT NBR 6118 (2014) por apresentar

resultados com a média da razão (V_u/V_{Ref}) mais de 1,00, por ter a equação que melhor considera os parâmetros que influenciam na resistência a punção, segundo Pereira Filho (2019).

Os resultados são apresentados em gráficos diferentes para conectores de aço e estribos bem ancorados e aqueles que ficaram acima da zona sombreada representam aqueles mais eficientes e aqueles abaixo da zona sombreada, menos eficientes. Na Figura 5.7 é possível observar que as lajes com ARCO apresentaram desempenho das armaduras de cisalhamento semelhantes as lajes com concreto convencional do banco de dados produzidos por Pereira Filho (2021).

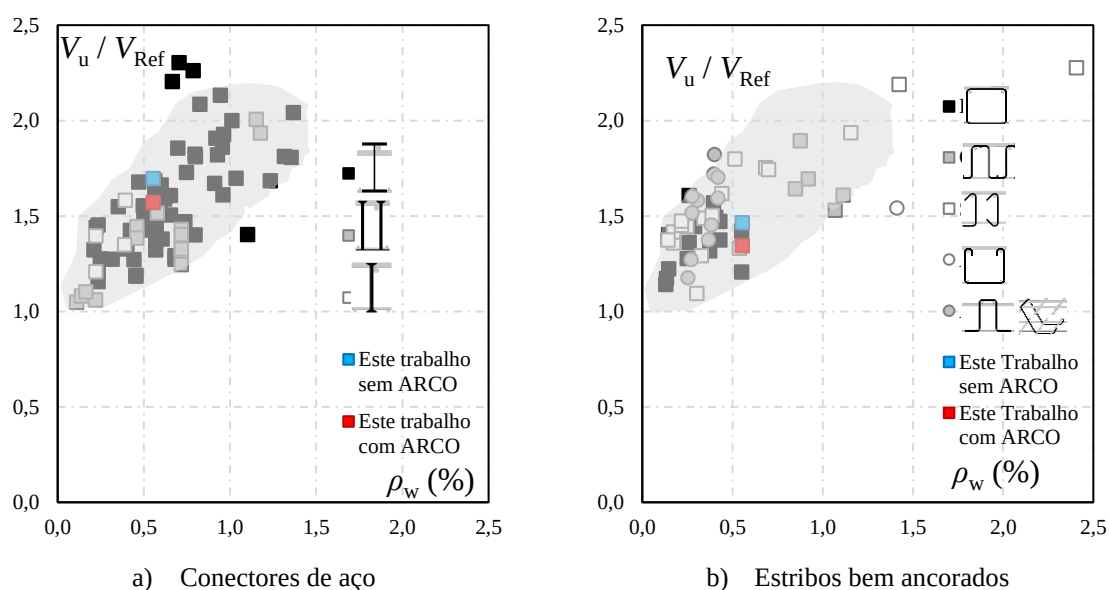


Figura 5.7 – Desempenho das armaduras de cisalhamento para lajes com concreto convencional e com ARCO

5.2.3 Desempenho das equações das normas nas estimativas de resistência à punção em lajes armadas ao cisalhamento

Nesta seção, as Figura 5.8 a Figura 5.11 avaliam a previsão das recomendações das normas ($V_u/V_{R,teo}$) em função da taxa de armadura de cisalhamento. Assim como realizado por Pereira Filho (2021) não foram incluídas lajes com ruptura fora da região das armaduras de cisalhamento, dessa forma as previsões das normas foram definidas a partir do menor valor de resistência entre as equações para determinar a resistência à punção dentro da região das armaduras de cisalhamento e para o esmagamento da biela de concreto adjacente ao pilar.

Os resultados apresentados no banco de dados de lajes lisas com concreto convencional de Pereira Filho (2021) demonstram que as recomendações precisam de limitações nas equações para o esmagamento da biela como forma de minimizar previsões inseguras em lajes com taxas

de armadura de cisalhamento elevadas. Apesar da alta dispersão dos resultados demonstrada nos resultados do banco de dados para o ACI 318 (2019) este modelo apresentou resultados apropriados ou próximo do apropriado para os dois grupos de lajes com estribos produzidas neste trabalho. O Eurocode 2 (2014) apresentou resultados dispersos para o banco de dados de lajes com conectores e menos dispersos para lajes com estribos e com nível de segurança adequado para os dois tipos de armadura para as lajes ensaiadas neste programa experimental. A ABNT NBR 6118 (2014) não apresentou resultados seguros para nenhuma das armaduras utilizadas neste trabalho ficando as lajes com ARCO com comportamento semelhante às lajes sem ARCO. O *fib* Model Code 10 (2013) apresentou segurança adequada para os dois grupos de armaduras de cisalhamento para as lajes com concreto convencional e com ARCO.

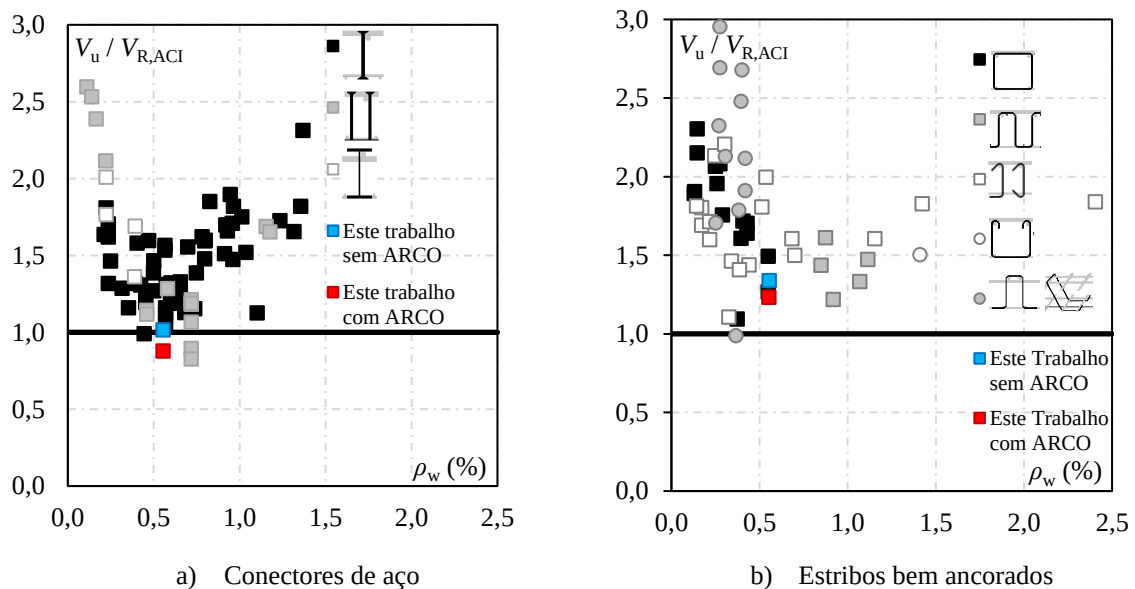
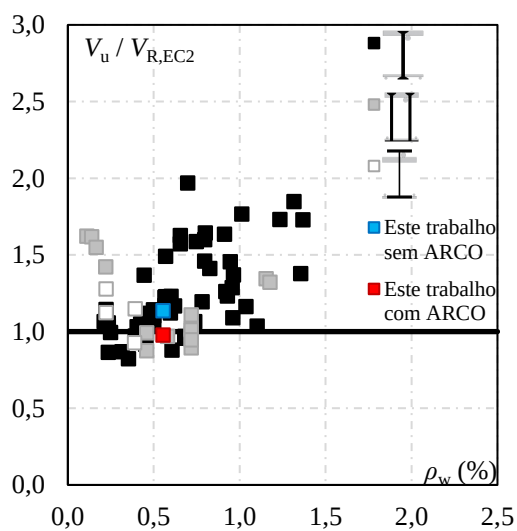
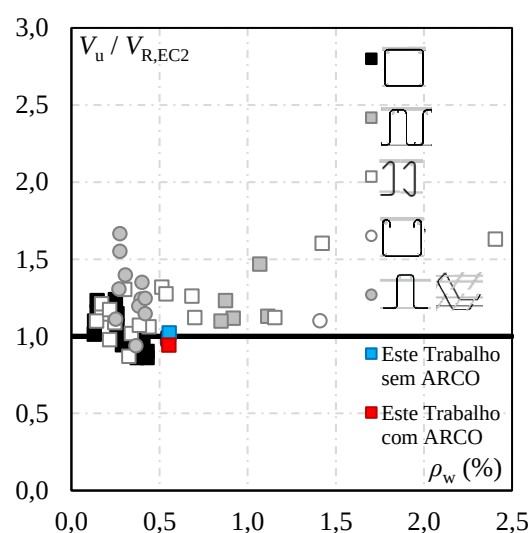


Figura 5.8 – Desempenho das equações do ACI 318 (2019) para resistência à punção em lajes armadas ao cisalhamento com concreto convencional e com ARCO

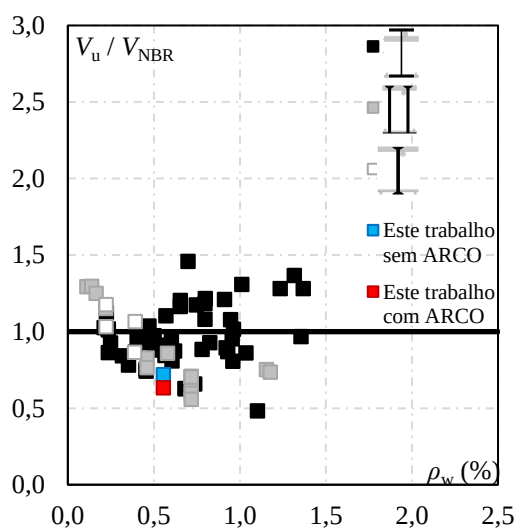


a) Conectores de aço

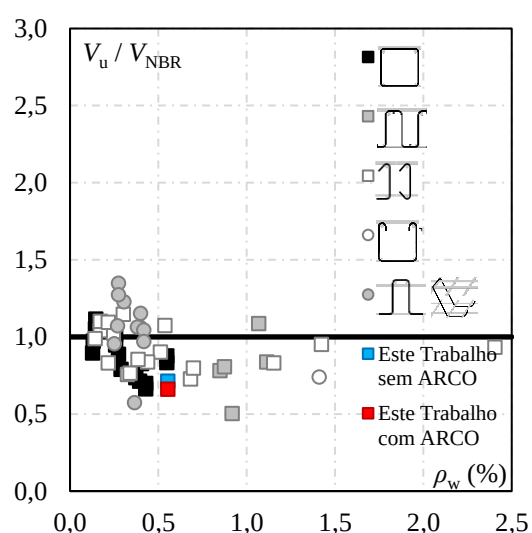


b) Estribos bem ancorados

Figura 5.9 – Desempenho das equações do Eurocode 2 (2014) para resistência à punção em lajes armadas ao cisalhamento com concreto convencional e com ARCO



a) Conectores de aço



b) Estribos bem ancorados

Figura 5.10 – Desempenho das equações da NBR 6118 (2014) para resistência à punção em lajes armadas ao cisalhamento com concreto convencional e com ARCO

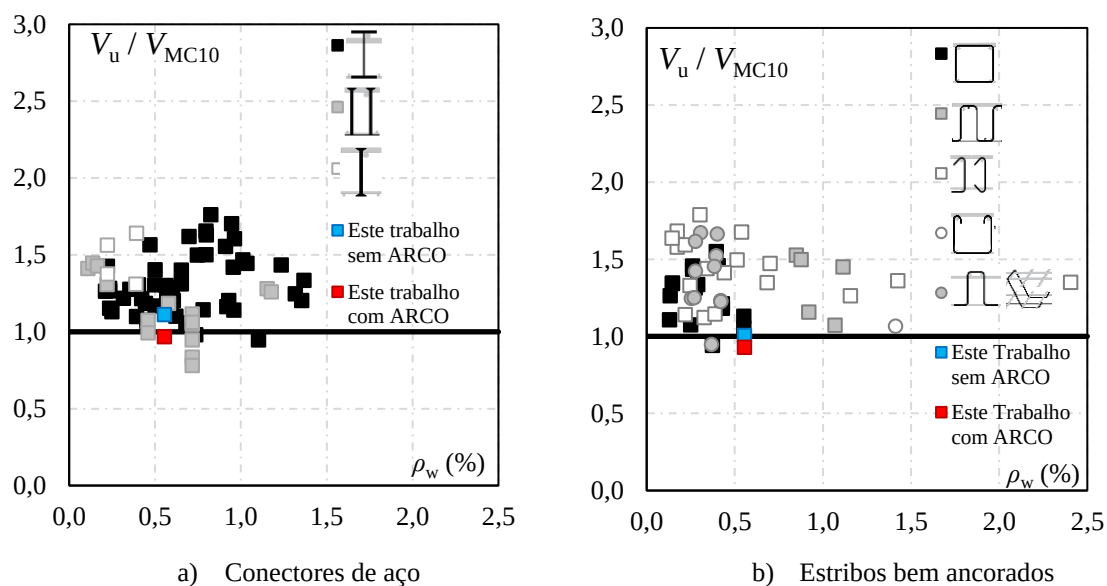


Figura 5.11 – Desempenho das equações do MC 10 (2013) para resistência à punção em lajes armadas ao cisalhamento com concreto convencional e com ARCO

5.2.4 Análise da precisão das normas na estimativa de resistência à punção para lajes com concreto convencional e com ARCO

Os gráficos das Figura 5.12 a 5.13 comparam as previsões normativas para resistência ao cisalhamento de lajes com concreto convencional e com ARCO, com o eixo y representando as cargas de ruptura (V_u) e o eixo x as resistências previstas nas normas ($V_{R,teo}$). A linha cheia preta indica a condição ideal ($V_u = V_{R,teo}$) e a linha tracejada mostra a tendência dos dados, com coeficiente angular e R^2 avaliando segurança e dispersão, respectivamente. O R^2 , quanto mais próximo de 1,0, indica menor dispersão e maior aderência dos dados à linha de tendência.

A ABNT NBR 6118 (2014) apresentou as previsões mais inseguras para as lajes do banco de dados, como relatado por Pereira Filho (2021) e o ACI 318 (2019) mais conservador, especialmente para lajes com conectores de aço, esse comportamento se repetiu para as lajes deste programa experimental.

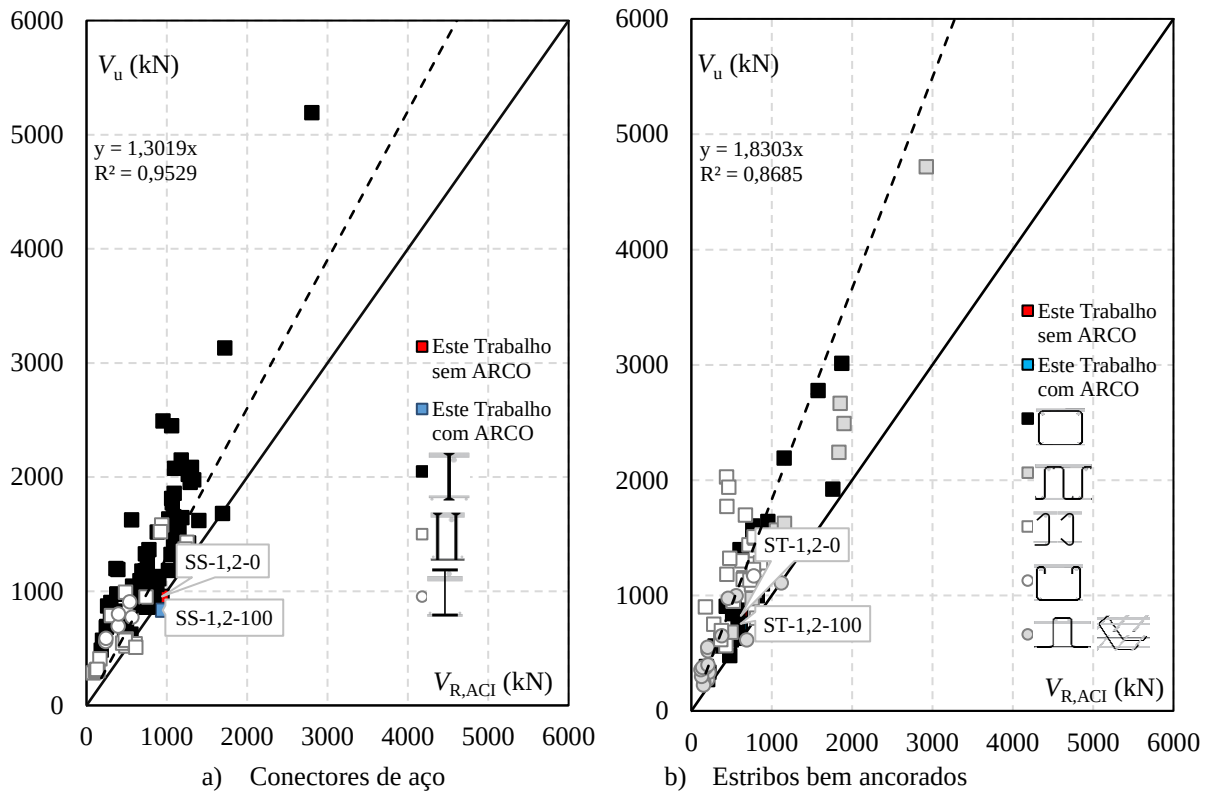


Figura 5.12 - Análise da precisão do ACI 318 (2019) na estimativa de resistência à punção de lajes com concreto convencional e com ARCO

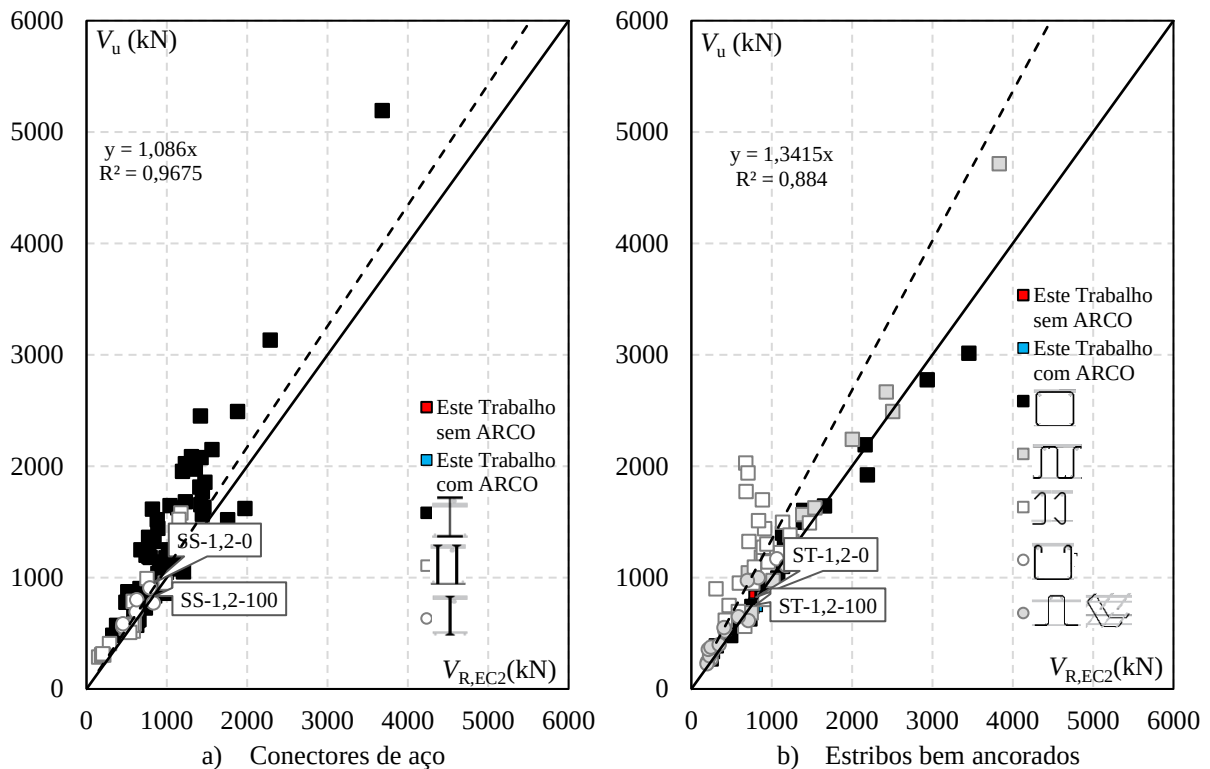


Figura 5.13 - Análise da precisão do EC2 (2014) na estimativa de resistência à punção de lajes com concreto convencional e com ARCO

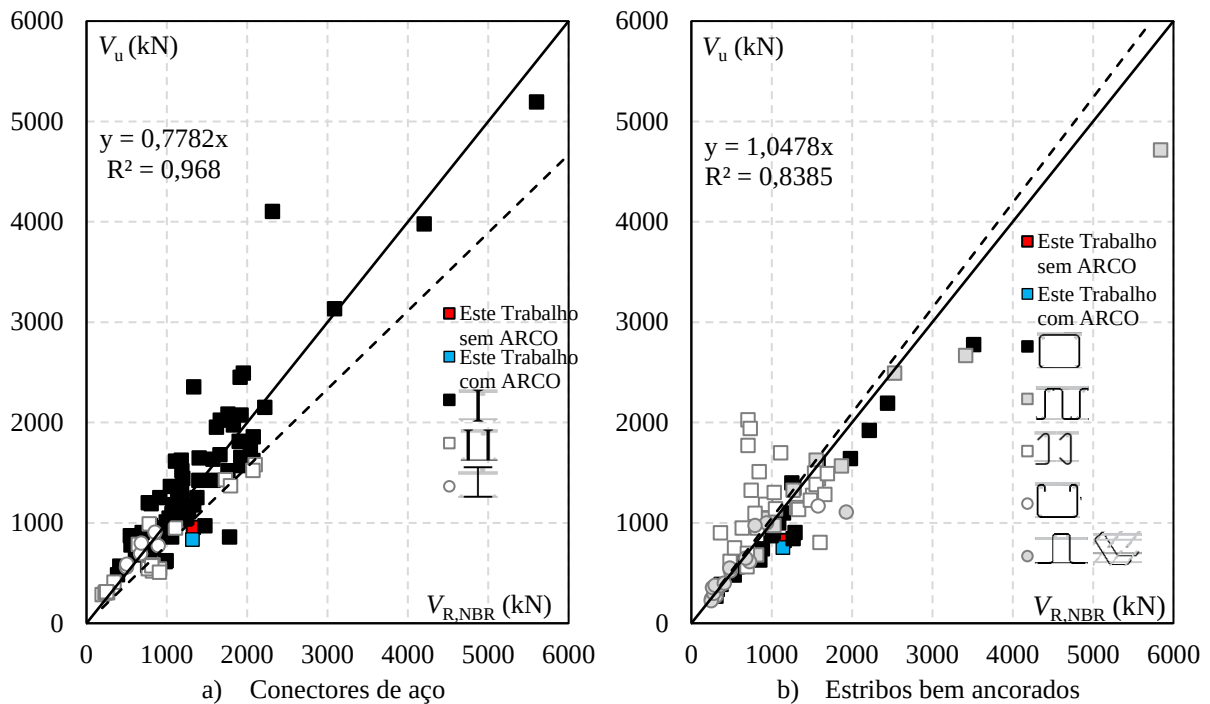


Figura 5.14 - Análise da precisão do NBR 6118 (2014) na estimativa de resistência à punção de lajes com concreto convencional e com ARCO

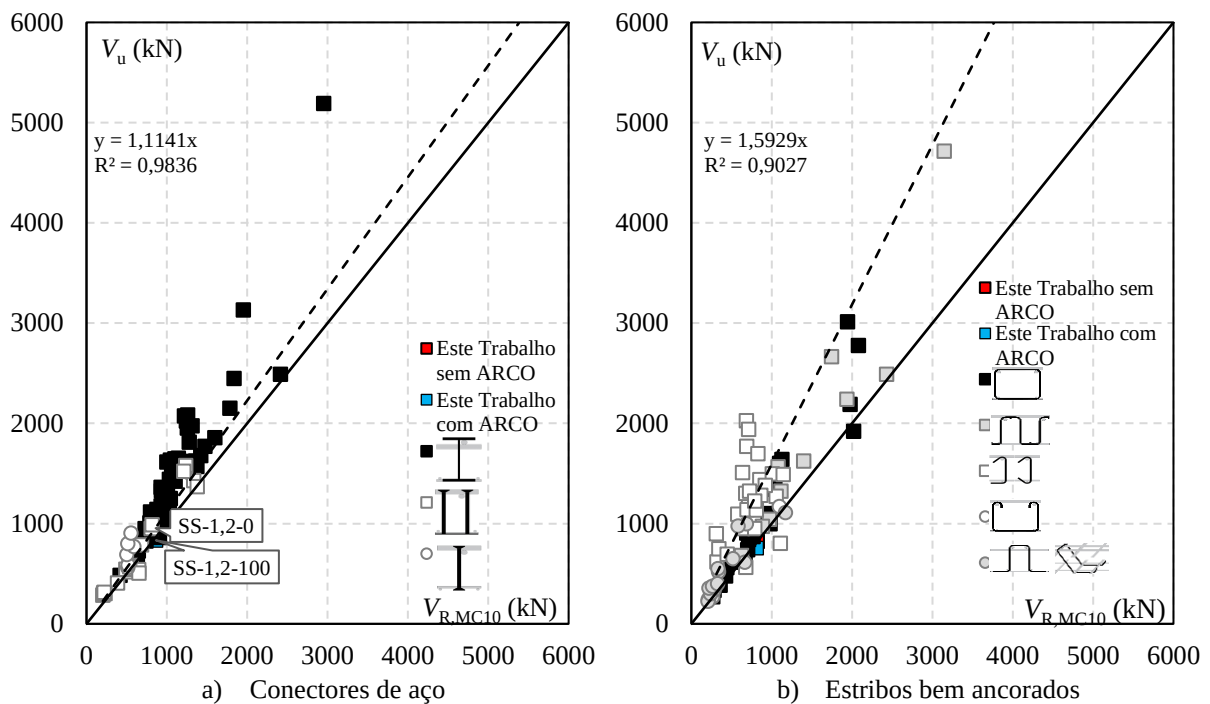


Figura 5.15 - Análise da precisão do MC10 (2013) na estimativa de resistência à punção de lajes com concreto convencional e com ARCO

6 CONCLUSÕES

6.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões dos resultados obtidos no programa experimental composto dos testes experimentais de 10 modelos de ligações laje-pilar para investigar os efeitos da substituição de agregados naturais (AN) por agregados reciclados de concreto (ARCO), com e sem armadura de cisalhamento. O efeito da substituição de AN por ARCO foi discutido tanto em termos das propriedades mecânicas do concreto quanto em relação ao comportamento e resistência ao cisalhamento por punção das lajes testadas.

- Os resultados relacionados à caracterização das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido nas duas Séries analisadas neste trabalho, mostraram pouco impacto da substituição de AN por ARCO. A trabalhabilidade permaneceu adequada, e a resistência à compressão do concreto foi praticamente inalterada pelo aumento da taxa de substituição de ARCO. A resistência à tração do concreto e o módulo de elasticidade apresentaram algumas variações; no entanto, essas variações estão relacionadas à variabilidade intrínseca na qualidade dos agregados reciclados e não necessariamente à taxa de substituição de ARCO.
- Com a substituição de AN por ARCO, não foi observada interferência significativa no padrão de fissuração ou na capacidade de carga em que as lajes ultrapassaram o estado limite de serviço de abertura de fissuras. Essa observação foi baseada na avaliação de nas duas Séries, com destaque para a Série 1 onde foi possível avaliar esse comportamento para as diferentes taxas de armadura de flexão.
- A incorporação de ARCO não afetou significativamente a rigidez à flexão na fase pré-fissuração, independentemente do módulo de elasticidade do concreto. No entanto, a laje S-1,2-0 manteve sua rigidez inicial até um nível de carga maior que os outros, mas isso se deve à maior resistência à tração do seu concreto, resultando em fissuração tardia. Na fase pós-fissuração, a adição de ARCO não interferiu na resposta à flexão das lajes. No entanto, a laje S-0.7-0 apresentou um comportamento mais rígido do que as outras devido ao maior módulo de elasticidade de seu concreto. Notavelmente, o comportamento pós-pico de todas as lajes foi frágil, independentemente da inclusão de ARCO.

- Para as lajes da Série 2, em resumo, as lajes com *double headed studs* apresentaram os maiores incrementos de carga. As lajes com estribos individuais, ST-1,2-0 e ST-1,2-100, apresentaram a maior ductilidade pós pico. Observou-se também que as lajes sem agregado reciclado apresentaram incremento superior às lajes com ARCO, embora os valores obtidos tenham sido bem próximos. Em síntese, os incrementos de carga para cada laje desta série de ensaios, em relação à laje referência foram, respectivamente: 68 % para SS-1,2-0, 47% para SS-1,2-100, 45% para ST-1,2-0 e 33% para ST-1,2-100.
- Os resultados apresentados neste trabalho foram comparados com os resultados de testes em lajes com concreto convencional. A comparação indica que a substituição de agregados naturais por agregados reciclados de concreto tem pouco impacto na resistência à punção das lajes de concreto armado.

6.2 ANÁLISES DAS RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

- O desempenho das recomendações normativas do ACI 318 (2019), ABNT NBR 6118 (2014), Eurocode 2 (2014) e *fib* Model Code (2013), foi analisado comparando as previsões de ruptura de lajes lisas com concreto convencional com os resultados experimentais dos bancos de dados para lajes sem armadura de cisalhamento de Pereira Filho (2016) e para lajes com armadura de cisalhamento foi utilizado o banco de dados de Pereira Filho (2021), incluindo nesses bancos de dados os resultados experimentais das lajes estudadas neste trabalho.
- Para a Série 1, composta por lajes lisas sem armaduras de cisalhamento, substituição de ARCO não comprometeu a segurança das previsões do Eurocode 2 (2014) para lajes com menor taxa de armadura de flexão. A laje com 30% de substituição manteve o nível de segurança da referência, enquanto a de 100% apresentou redução de 13%, ainda dentro de limites seguros. Em contraste, a ABNT NBR 6118 (2014) mostrou previsões inseguras em quatro das seis lajes estudadas. O Eurocode 2 (2004) e o *fib* Model Code 10 (2013) tiveram desempenho abaixo do nível de segurança desejado para lajes com maior taxa de armadura, independentemente do teor de ARCO. O ACI 318 (2019), por outro lado, apresentou recomendações seguras e precisas para todas as lajes, mesmo sem considerar o uso de concreto com ARCO.
- Em contrapartida, para Série 2, para lajes lisas com armadura de cisalhamento, o ACI 318 (2019) geralmente estimou valores de resistência à punção mais baixo do que os

resultados experimentais. Por outro lado, o Eurocode 2 (2014) apresentou estimativas de resistência ligeiramente inseguras para as três lajes testadas com $\rho = 1,2\%$, independentemente do uso de agregados reciclados de concreto. Deve-se notar que o Eurocode 2 (2014) considera a influência da taxa de armadura de flexão das lajes. Vale ressaltar que, os resultados experimentais deste trabalho para lajes lisas com armadura de cisalhamento e ARCO não foram comparados com resultados experimentais de outros autores, por não terem sido encontrados trabalhos semelhantes na literatura.

- A ABNT NBR 6118 (2023) apresentou resultados inseguros para a maioria das lajes, para as duas séries de ensaios, reforçando a necessidade de alterações em suas recomendações para garantir a segurança das previsões teóricas da norma.
- De modo geral, a comparação dos novos resultados apresentados neste trabalho com os resultados dos bancos de dados de testes em lajes com concreto convencional indica que a substituição de agregados naturais por agregados reciclados de concreto tem pouca influência na resistência à punção das lajes de concreto armado. No entanto, é evidente a necessidade de mais testes em lajes com escala real, abrangendo um espectro mais amplo de variáveis, como a classe de resistência à compressão do concreto, a altura adequada da laje, o tamanho e a geometria do pilar e o uso de armaduras de cisalhamento, entre outros parâmetros.

6.3 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar as prescrições normativas segundo as atualizações das normas ABNT NBR 6118 (2023), *fib* Model Code 2020 (2023) e Eurocode 2 (2023).
- Avaliar os ajustes necessários nas recomendações das normas para a consideração sobre os agregados reciclados de concreto.
- Verificar a influência do uso de aditivos e adições no concreto, e da pré-molhagem dos agregados reciclados de concreto no comportamento mecânico dos concretos empregados em elementos estruturais.
- Verificar a utilização de outros tipos e arranjos de armadura de cisalhamento em lajes com ARCO.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJAYI, S.O.; OYEDELE, L.O.; BILAL, M.; AKINADE, O.O.; ALAKA, H.A.; OWOLABI, H.A.; KADIRI, K.O. Waste effectiveness of the construction industry: Understanding the impediments and requisites for improvements, **Resour Conserv Recycl** 102 (2015) 101–112. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2015.06.001>.

AKHIMIEN, N.G.; LATIF, E.; HOU, S.S. Application of circular economy principles in buildings: A systematic review, **Journal of Building Engineering** 38, 102041, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.102041>.

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and Demolition Waste Generation and Properties of Recycled Aggregate Concrete: A Global Perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262-281, mar. 2018.

AMARASINGHE, I.; HONG, Y., STEWART, R.A. Development of a material circularity evaluation framework for building construction projects, **J Clean Prod** 436, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140562>.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318. **Building Code Requirements for Structural Concrete**, Farmington Hills, Michigan, 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318: **Building code requirements for structural concrete and Commentary**. Farmington Hills, EUA, 2019.

AMORIM, P.; DE BRITO J.; EVANGELISTA, L. Concrete Made with Coarse Concrete Aggregate: Influence of Curing on Durability, **Article in Aci Materials Journal**, 27, 2012. <https://www.researchgate.net/publication/235939398>.

ANDRA, H. P. e MATTHAEI, O. Effectiveness of Punching Shear Reinforcement a Question of Rotational Capacity. **International Workshop on Punching Shear Capacity on RC Slabs**, Proceedings, Stockholm, Sweden, pp. 163-170, 2000.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. São Paulo, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004). **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos**. NBR 15115. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004). **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos**. NBR 15116. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004). **Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação**. NBR 15113. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004). **Resíduos sólidos de construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projetos, implantação e operação**. NBR 15114. Rio de Janeiro.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116: **Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: **Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: **Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16917: **Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: **agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: **Agregados – Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 6118: **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2023.

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

BAIRAGI, N. K.; RAVANDE, K.; PAREEK, V. K. (1993), **Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates**. Resources, Conservation and Recycling, 9, 109-126.

BAZANT, Z. P. (1984). **Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal**. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, V. 110, No.4, Apr. 1984, pp. 518-535.

BAZANT, Z. P. e CAO, Z. (1987). **Size effect in punching shear failure of slabs**. ACI Structural Journal, Vol. 84, pp. 44-53, Jan/Febr.

BAZANT, Z. P.; OZBOLT, J. e ELIGEHAUSEN, R. (1994). **Fracture Size Effect: Review of Evidence for Concrete Structures**. Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No.8. pp. 2377-2398.

BEHERA, M.; BHATTACHARYYA, S.K.; MINOCHA, A.K.; DEOLIYA, R.; MAITI, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials** 68, pg 501-516.

BEHERA, M.; BHATTACHARYYA, S.K.; MINOCHA, A.K.; DEOLIYA, R.; MAITI, S. (2014). **Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review**. Construction and Building Materials 68, pg 501-516.

BERNAERT, M., PUECH, M. (1966). **Compte Rendu des Travaux du Groupe de Travail Poinçonnement**. Comité Européen du Béton: Dalles, Structures planes. CEB-Bull. d'Information No. 57, Paris.

BEUTEL, R. **Punching of Flat Slabs with Shear Reinforcement at Inner Colluns**. Alemanha, 267 pp. (em Alemão). 2002.

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.

BIRKLE, G. (2004). **Punching of Flat Slabs: The Influence of Slab Thickness and Stud Layout**. Tese de Doutorado. Department of Civil Engineering, University of Calgary, Calgary. Canadá. 152 pp.

BIRKLE, G. e DILGER, W.H. (2008). **Influence of Slab Thickness on Punching Shear Strength**. *ACI Structural Journal*. Vol. 105, Nº 2 Março-Abril.

BRANTSCHEN, F. **Influence of bond and anchorage conditions of the shear reinforcement on the punching strength of RC slabs**. 2016. 227 f. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2016.

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.

BROMS C.E., Shear Reinforcement for Deflection Ductility of Flat Plates, **Structural Journal**,696–705, 1990. <https://doi.org/10.14359/2988>

BROMS, C. E. Ductility of Flat Plates: **Comparison of Shear Reinforcement Systems**. *ACI Structural Journal*, v. 104, n. 6, p. 703-711, 2007.

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

BUCK, A. D. Recycled concrete as a source of aggregate. **ACI Journal**, 74, 212–219, 1977.

BUTLER L, WEST JS, TIGHE SL(2013). **Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength**. Constr Build Mater, 47:1292–301.

BUTLER, L.; WEST, J. S.; TIGHE, S. L. (2011). **The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement**. Cement and Concrete Research 41, 1037–1049.

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.

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.

Canadian Standards Association (CSA) (2004). **Design of concrete structures for buildings**. CSA-A23.3-04. Rexdale, Ontario, Canada.

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.

CARDOSO, A. C. **Efeito da Adição de Agregados Reciclados na Resistência ao Cisalhamento de Vigas de Concreto Armado**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, 2018.

CASUCCIO, M., *et al.*, Failure mechanism of recycled aggregate concrete. **Construction And Building Materials**, 2007.

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.

CHANA, P.S.; DESAI, S.B., Design of shear reinforcement against punching, **The Structural Engineer**, Vol.70, No.9, 5 May, pp.159-164, 1992.

CLASSEN, M.; KALUS, M. Punching Shear Response Theory (PSRT) – A two degree of freedom kinematic theory for modeling the entire punching shear vs. deformation response of RC slabs and footings, **Eng Struct** 291 , 2023. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116197>.

Comité Euro-International du Béton (1993). **CEB-FIP Model Code 1990**. London, Thomas Telford.

CORINALDESI V. (2010). **Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates**. **Constr Build Mater**, 24:1616–20.

D. PEDRO A.; J. DE BRITO A.; L. EVANGELISTA. **Mechanical characterization of high performance concrete prepared with recycled aggregates and silica fume from precast industry**; *Journal of Cleaner Production* 164, 939-949, 2017.

DAM, T. X.; WIGHT, J. K.; PARRA-MONTESINOS, G. J. Behavior of Monotonically Loaded Slab-Column Connections Reinforced with Shear Studs. **ACI Structural Journal**, n. 114, p. 221–232, 2017.

DANTATA, N.; TOURAN, A. e Wang J. (2005). **An analysis of cost and duration for deconstruction and demolition of residential buildings in Massachusetts**. *Resour. Conserv. Recycl.* 44.

DE JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. (2009), **Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate**. *Construction and Building Materials*, n. 23, p. 872–877.

DIN EN 1992-1-1 (2011). 2011-01. **Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau**. Deutsche Fassung, 2010.

DURAN, X.; LENIHAN, H. E O'REGAN, B. (2006). **A model for assessing the economic viability of construction and demolition waste recycling—the case of Ireland**. *Resour. Conserv. Recycl.* 46, 302–320. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.08.003>.

EDER, M. A. (2011). **Inelastic Behaviour of Hybrid Steel/Concrete Column-to-Flat Slab Assemblages**. Tese de Doutorado. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College. London.

EHE (2008). **Code on Concrete Structures**. Espanha.

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.

EINPAUL, J., BUJNAK, J., RUIZ, M. F., MUTTONI, A.. **Study on Influence of Column Size and Slab Slenderness on Punching Strength**. ACI Structural Journal. Vol. 113, Nº 1 Jan/Fev. 2016.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards a circular economy: business rationale for an accelerated transition**, 2015.

ELSAHAFFEY, A. E.; RISK, E.; MARZOUK, H. e HADDARA, M. R. (2011). **Prediction of Punching Shear Strength of Two-Way Slabs**. Engineering Structures. Vol. 33. Pp. 1742-1753.

ELSANEDDY, H. M.; AL-SALLOUM, Y. A. e ALSAYED, S. H. (2013). **Prediction of Punching Shear Strength of HSC Interior Slab-Column Connections**. KSCE Journal of Civil Engineering. :Vol. 17, Nº2. Pp. 473-485.

ELSTER e HOGNESTAD (1956). **Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs**. ACI Journal, Proceedings. Vol. 53, Nº 1 Julho.

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

ETXEBERRIA, M. “**Experimental study on microstructure and structural behaviour**”, Tese de Doutoramento, Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, 2004.

ETXEBERRIA, M.; MARÍ, A.R.; VÁZQUEZ, E. Recycled aggregate concrete as structural material, **Materials and Structures/Materiaux et Constructions** 40, 529–541, 2007. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9161-5>.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A. R.; BARRA, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research** 37, 735–742.

EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL ETA-12/0454 (2012). **Double Headed Studs as Punching Reinforcement**. Langenfeld, Alemanha.

FERREIRA, M. P. (2010). **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.

FERREIRA, M. P.; MELO, G. S. S. A.; VOLLUM, R. L. **Punching of Reinforced Concrete Flat Slabs with Double-Headed Shear Reinforcement**. ACI Structural Journal, v. 111, n. 1, p. 1–12, 2014.

FERREIRA, M. P.; PEREIRA FILHO, M. J. M.; FREITAS, M. V. P.; LIMA NETO, A. F.; MELO, G. S. S. A. Experimental Resistance of Slab-Column Connections with Pre- Fabricated Truss Bars as Punching Shear Reinforcement. **Engineering Structures**. v. 233, 2021.

FIB MODEL CODE 2010 (2003). **fib Model Code 2010, First complete draft—V. 2, Bulletin 56, fib** . Lausanne, Switzerland, Abril, 288.

fib MODEL CODE 2010. Fédération Internationale du Béton (*fib*), 2013: **Model Code for Concrete Structures 2010**. Lausanne: Special Activity Group 5, 390 p. 2013.

fib MODEL CODE 2020. Fédération Internationale du Béton (*fib*), 2023: **Model Code for Concrete Structures 2020**. 2023.

FORTEBOA, B. G. *et al.* Cortante-fricción de los hormigones reciclados. **Materiales de Construcción**, v. 60, n. 299, p. 53–67, 30 set. 2010.

FRANCESCONI, L.; PANI, L.; STOCHINO, F. Punching shear strength of reinforced recycled concrete slabs, **Constr Build Mater** 127, 248–263, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.094>.

FURCHE, J., SIBURG, C., BAUERMEISTER U. **Highly Effective Lattice Punching Shear Reinforcement**. Publicação Especial, ACI v. 321 p. 1-12, 2017

GARDNER, N. J. (1990). **Relationship of the Punching Shear Capacity of Reinforced Concrete Slabs with Concrete Strength**. ACI Structural Journal. Vol. 87. Nº 1. Pp 66-71.

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

GU Z., J. WANG, D. GAO, J. ZHAO, Effects of steel *fib* ers on the flexural behavior of recycled concrete beam: Testing and analysis, **Journal of Building Engineering** 85, 108718, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108718>.

GUANDALINI e MUTTONI (2004). **Symmetrical punching tests on slabs without transverse reinforcement**. Test Report. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne. Switzerland; 2004. 85 pp.

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

HALLGREN, M. (1996). **Punching Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Slabs**. Tese de Doutorado, KTH Stockholm, TRITA-BKN. Bulletin No. 23, 150p.

HALLGREN, M. (2001). **Punching of High Strength Concrete Slabs**. **CEB-*fib* Bulletin Nº 13 Punching of Structural Concrete Slabs**. pp. 172-175

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.

HASSAN, M.; AHMED, E. A.; ASCE, M.; BENMOKRANE, B. Punching Shear Behavior of Two-Way Slabs Reinforced with FRP Shear Reinforcement, **J. Compos. Constr.**, pp. 1-13, 2015.

HEGGER, J.; HAUSLER, F.; RICKER, M.. Zur maximalen Durchstanztragfähigkeit von Flachdecken. **Beton- und Stahlbetonbau**, v 102, n.11, pp. 770-777, 2007.

HELENE P.R.I; TERZIAN, P. (1992). **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo, Pini, Brasília, SENAI.

IGNJATOVIC I. S.; MARINKOVICS. A. B. , TOŠIC N. (2017). **Shear behaviour of recycled aggregate concrete beams with and without shear reinforcement**. Engineering Structures 141.

KANTERS, J. Circular building design: An analysis of barriers and drivers for a circular building sector, **Buildings** 10 ,2020. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS10040077>.

KATZ, A. (2003). **Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete**. Cement and Concrete Research 33, 703– 711.

KHAN, A. (1984). **Recycled concrete—a source for new aggregate**. Cem. Concr. Aggr. 6 (1) 17–27.

KINNUNEN, S.; NYLANDER, H. Punching of concrete slabs without shear reinforcement, Transactions No 158 **Royal Institute of Technology**, 1960.

KISKU N.; JOSHI, H.; ANSARI, M. ; PANDA, S.K.; NAYAK S. E DUTTA, S. C.. **A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material**. Construction and Building Materials 131 (2017) 721–740.

KOU, S.C.; POON, C.S.; CHAN, D. Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete, **Journal of Materials in Civil Engineering** 19 (2008) 1191–1201. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:9\(70\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(70)).

KUERES, D.; HEGGER, J.; Two-parameter kinematic theory for punching shear in reinforced concrete slabs without shear reinforcement, **Eng Struct** 175, 201–216, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.023>.

KWAN, W.H.; RAMLI, M.; KAM, K.J.; SULIEMAN; M.Z. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties, **Constr Build Mater** 26, 565–573, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.059>.

LADNER, M. (1973). **Einflub der MaBstabgroBe bei Durchstanzversuche – Ableitung Eines Begrundeten Ubertragungsgesetzes**. Material und Technik.

LEELATANON, S.; IMJAI, T.; SETKIT, M.; GARCIA, R.; KIM, B. Punching Shear Capacity of Recycled Aggregate Concrete Slabs, **Buildings** 12, 2022. <https://doi.org/10.3390/buildings12101584>.

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., RUIZ, M. F. e MUTTONI, A. (2012). **Experimental Investigation on the Punching Strength and the Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs**. ACI Structural Journal. Vol. 109. Nº 6. Pp. 889-899.

LÓPEZ RUIZ, L.A.; ROCA RAMÓN, X.; GASSÓ DOMINGO, S. The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach, **J Clean Prod** 248, 119-238, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119238>.

MAHMOUD Z.I., EL TONY. E TONY M., SAEED K.S., Punching shear behavior of recycled aggregate reinforced concrete slabs, **Alexandria Engineering Journal** 57, 841–849, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.12.004>.

MALEŠEV, M.; RADONJANIN, V.; MARINKOVIĆ, S. Recycled concrete as aggregate for structural concrete production, **Sustainability** 2, 1204–1225, 2010. <https://doi.org/10.3390/su2051204>.

MANTEROLA, M. (1966). **Poinçonnement de Dalles Sans Armature D’effort Tranchant**. Comité EuroPéEN du Béton: Dalles, Structures Planes, CEB-Bull d’Information Nº 58, Paris.

MANUEL GÓMEZ-SOBERÓN, J., Creep of concrete with substitution of normal aggregate by recycled concrete aggregate, (2002) 16. <https://www.researchgate.net/publication/33422691>.

MARINO, A.; PARISO, P. Comparing European countries' performances in the transition towards the Circular Economy, **Science of The Total Environment** 729, 138- 142, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.138142>.

MARTI, P., PRALONG, J., THURLIMANN, B. (1977). **Schubversuche an Stahlbeton-Platen**. IBKonstruktion Bericht Nr. 7305-2, ETH Zurich, Birkhauser, Basel.

MARZOUK, H. e HUSSEIN, A. (1991) **Experimental Investigation on the Behavior of High-Strength Concrete Slabs**. ACI Structural Journal.

MATIAS, D.; DE BRITO, J.; ROSA, A.; PEDRO, D. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates - Influence of the use of superplasticizers, **Constr Build Mater** 44, 101–109, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.011>.

MCHARG, P. J.; COOK, W. D.; MITCHELL, D. e YOON, Y. S. (2000). Benefits of concentrated slab reinforcement and steel *fib* res on performance of slab-column connections. **ACI Structural Journal**, V 97 No 2, Mar-Apr, pp 225-234.

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

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

MISTRI, A.; DHAMI, N.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V.; MUKHERJEE, A.; BISWAS, W. K. Environmental Implications of the Use of Bio-Cement Treated Recycled Aggregate in Concrete. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 167, abr. 2021.

MOE, J. (1961). **Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings under Concentrated Loads**. Bulletin N° D47, Portland Cement Association Research and Development Laboratories, Illinois.

MOKHTAR, A. S.; GHALI, A.; DILGER, W. Stud Shear Reinforcement for Flat Concrete Plates. **ACI Journal**, Set-Out. 676-683, 1985.

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

MUTTONI A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement, **ACI Struct J** 4,440–450, 2008. <https://doi.org/https://doi.org/10.14359/19858>.

MUTTONI, A. e SCHWARTZ, J. (1991). **Behavior of Beams and Punching in Slabs**

OAD, M.; BULLER, A.H.; MEMON, B.A.; MEMON, N.A. Flexural Stress-Strain Behavior of RC Beams Made with Partial Replacement of Coarse Aggregates with Coarse Aggregates from Old Concrete, **Technology & Applied Science Research** 8, 3048–3053, 2018. www.etasr.com.

OGUNMAKINDE, O.E.; EGBELAKIN, T.; SHER, W. Contributions of the circular economy to the UN sustainable development goals through sustainable construction, **Resour Conserv Recycl** 178, 106023,2022. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.106023>.

OLIVEIRA, V. H. D. de; LIMA, H. J. N. de; MELO, G. S. Punching Shear Resistance of Flat Slabs with different types of Stirrup Anchorages such as Shear Reinforcement. **Engineering Structures**. v. 253, 2022.

OLIVEIRA, D. R. C.; MELO, G. S.; REGAN, P. E. Punching Strengths of Flat Slabs with Vertical or Inclined Stirrups. **ACI Structural Journal**, Vol.97, N°.52, Pp.485-491. 2000.

OLONGO, F.T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate Concrete monitored by durability indexes. **Cem Concr Res**, 32:179-85, 2002.

OMARY, S.; GHORBEL, E. , WARDEH, G. **Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties**. Construction and Building Materials 108, pg 163-174, 2016.

OZBOLT, J.; VOCKE, H. e ELIGEHAUSEN, R. (2001). **Punching failure-influence of material properties and size effect**. Fracture Mechanics of Concrete Structures, de Borst *et al* (eds)© 2001 Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 2651 8250.

PACHECO, J.; BRITO, J.; CHASTRE, C.; EVANGELISTA, L. Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates, **Constr Build Mater** 201, 110–120, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.200>.

PACHECO, J.; DE BRITO, J.; CHASTRE, C.; EVANGELISTA, L. Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates **Constr. Build. Mater.**, 201 (2019), pp. 110-120, **10.1016/j.conbuildmat.2018.12.200**Estruturas

PACHECO, J.; DE BRITO, J.; FERREIRA, J.; SOARES, D. Flexural load tests of full-scale recycled aggregates concrete structures. **Construct. Build. Mater.**, 101 pp. 65-71, 2015. [10.1016/j.conbuildmat.2015.10.023](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.023)

PALHARES, R. A. **Análise Experimental da Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Variação da Ancoragem da Armadura de Cisalhamento**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2018

PAMPLONA, M. K. Y. **Resistência ao Fendilhamento de Elementos Estruturais de Concreto Simples e Armado com Agregado Reciclado de Concreto**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, 2018.

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

PEDRO, D.; BRITO J. e EVANGELISTA L.(2014). **Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete**. Constr Build Mater; 71:141–51.

PEREIRA FILHO, M. J. M. **Avaliação dos métodos normativos para previsão da resistência à punção de lajes sem armadura de cisalhamento e com conectores de Aço**. 2016. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

PEREIRA FILHO, M. J. M. **Resistência à Punção de Lajes Lisas Armadas ao Cisalhamento com Estribos Treliçados Pré-Fabricados**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2021.

POON, C.S.; SHUI, Z.H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, *Constr Build Mater* 18, 461–468, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005>.

PORTILHO, S. K. M. S. Influência da substituição de agregados naturais por reciclados de concreto na resistência à punção de lajes lisas de concreto armado com armadura de cisalhamento. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2023.

PRADHAN, S.; KUMAR, S.; BARAI, S. V. Shear performance of recycled aggregate concrete beams: An insight for design aspects, *Constr Build Mater* 178, 593–611, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.022>.

PRALONG, J. BRANDLI, W., THURLIMANN, B. (1979). **Durchstanzversuche an Stahlbeton- und Spannbetonplatten**. IBK-Bericht Nr. 7305-3, ETH Zurich, Birkhauser, Basel.

RAHAL, K. (2007), **Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate**. *Building and Environment* 42, 407–415. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132305003203>

RAHAL, K. N.; AL-KHALEEF, A.-L. Shear-Friction Behavior of Recycled and Natural Aggregate Concrete—An Experimental Investigation. *ACI Structural Journal*, v. 112, n. 6, p. 725–734, 2015.

RAHAL, K.N. e ALREFAEI Y.T. (2017). **Shear strength of longitudinally reinforced recycled aggregate concrete beams**. *Engineering Structures* 145

RAMDANE, K. (1993). **Punching Shear of High Performance Concrete Slabs**. Proceedings of the 4th international symposium on utilization of high strength high performance concrete. Paris; 1996. p. 1015–26.

RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. (2007). **Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete**. Resources, Conservation and Recycling 50, 71–81.

RAO, H.S.; REDDY, V.S.K.; VAISHALI,G.; GHORPADE, Influence of Recycled Coarse Aggregate on Punching Behaviour of Recycled Coarse Aggregate Concrete Slabs, International Journal of Modern Engineering Research (IJMER) 2, 2815–2820, 2012.

RAVINDRAJAH, R. S.; LOO, Y.H. e TAM,C.T. **Strength evaluation of recycled-aggregate concrete by in-situ tests**. Mater. Struct. 21 (4) 289–295, 1988.

REGAN, P. E. (1981). **Behavior of Reinforced Concrete Flat Slabs**. Report 89. CIRIA. Outubro

REGAN, P. E. (1986). **Symmetric Punching of Reinforced Concrete Slabs**. Magazine of Concrete Research.

REGAN, P. E. (2001). **Shear Reinforcement Against Punching in Flat Slabs Development of Design Recommendations**. Correspondência com o autor.

REGAN, P. E. Report on Test of Reinforced Concrete Flat Slabs With Double Headed Studs. Correspondência com o autor. 2009.

REGAN, P. E. **Double-Headed Studs as Shear Reinforcement – Tests of Slabs and Anchorages for DEHA Ankersysteme GMBH**. School of Architecture and Engineering, University of Westminster, Aug, 1996.

REGAN, P. E. e BRAESTRUP, M. W. (1985). **Punching Shear in Reinforced Concrete**. Comité Euro-International du Béton. Bulletin d’Information, N° 168. Janeiro, pp. 232.

REGAN, P. E.; SAMADIAN, F. Shear Reinforcement against Punching in Reinforced Concrete Flat Slabs. **The Structural Engineer**, V. 79, No. 10, May 2001, pp. 24-31, 2001.

REIS, N.; DE BRITO, J.; CORREIA, J.R.; ARRUDA, M.R.T. Punching behaviour of concrete slabs incorporating coarse recycled concrete aggregates, **Eng Struct** 100, 238–248, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.06.011>.

RIBEIRO JUNIOR, J. A. Análise experimental da resistência à punção em lajes lisas com substituição de agregados graúdos naturais por reciclados de concreto. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2022.

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

RUIZ e MUTTONI, A. (2009). Applications of critical shear crack theory to punching of reinforced concrete slabs with transverse reinforcement. **ACI Structural Journal**, Vol. 106, Nº 4, pg. 485-494, July/August.

SAADOON A.M., MASHREI M.A., AL OUMARI K.A., Punching shear strength of recycled aggregate-steel *fib* rous concrete slabs with and without strengthening, **Advances in Structural Engineering** 25 (2022) 2175–2190. <https://doi.org/10.1177/13694332221090288>.

SAHOO, S.; SINGH, B. Recycled aggregate concrete slab punching shear capacity, *Structures* 24 426–443, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.11.010>.

SANTOS, I.L.; SALGADO NETO, F.S.; MARTINS, L.H.S.; CORDEIRO, L.N.P. **Dosagem de Concretos Produzidos com Agregado Graúdo Reciclado de Concreto**. In: 57CBC, 2015, Bonito. 57 Congresso Brasileiro de Concreto, 2015

SANTOS, K. D. **Resistência ao Arrancamento de Pinos de Aço Embutidos em Elementos Estruturais com Agregado Reciclado de Concreto**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, 2018.

SCHAEFERS, U. (1978). **Konstruktion, Bemessung und Sicherheit gegen Durchstanzen von Balkenlosen Stalbetondecken im Bereich der Innenstutzen**. DafStb Heft 357, Beuth-Verlag, Berlin.

SEARA-PAZ, S.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; EIRAS-LÓPEZ, J., Flexural performance of reinforced concrete beams made with recycled concrete coarse aggregate, *Eng Struct* 156 (2018) 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.015>.

SHEHATA, I.A.E.M., Simplified model for estimating the punching resistance of reinforced concrete slabs, **Mater Struct** 23 (1990) 364–371. <https://doi.org/10.1007/BF02472716>.

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

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. (2015). **Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete**. *Construction and Building Materials* 83, 108–118.

SOARES, D.; DE BRITO, J.; FERREIRA, J.; PACHECO, J. Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance, **Constr Build Mater** 71, 263–272, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.034>.

SUDARSANA RAO H., SHOWJENDRA KUMAR REDDY V., VAISHALI G. (2012). **Influence of recycled coarse aggregate on punching behavior of recycled coarse aggregate concrete slabs**. *International Journal of Modern Engineering Research*.

SUN, C. *et al.* Study on aggregate interlock behavior of pre-cracked recycled aggregate concrete without stirrups. **Journal of Building Engineering**, v. 39, 1 jul.

TABSH, S. W.; ABDEL FATAH, A. S.. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Building Materials** 23, 1163–1167, 2009.

TAM, V. W. Y. e TAM, C. M. Evaluations of existing waste recycling methods: a Hong Kong study. **Build. Environ.** 41 1649–1660, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.06.017>.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO M.; EVANGELISTA, A. C. J.. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials** 172, 272–292, 2018.

THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J. A. **Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes**. *Construction and Building Materials* 114, 536–546, 2016.

TOLF, P., **Plattjocklekens Inverkan Pa Betongplattors Hallfasthet vid Genomstansning. Forsok med cikulara plattor**. TRISTA-BST Bull. 146, Institutionen for Byggnadsstatik. KTH, Stockholm, 64pp, 1988.

TOMASZEWICZ, A. (1993). **High-Strength Concrete. SP2 – Plates and Shells. Report 2.3 Punching Shear Capacity of Reinforced Concrete Slabs**. N° STF70 A93082, SINTEF Structures and Concrete, Trondheim.

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.

TRINDADE, J. C. **Comportamento à força cortante de vigas de concreto com agregados graúdos reciclados**. Tese de Doutorado – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2022.

TRINDADE, J.C.; GARCIA, S.L.G.; LACERDA, T.N.; RESENDE, T.L. Analysis of the shear behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams based on shear transfer mechanisms, **Eng Struct** 293, 2023. 116616. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.116616>.

VAN STIJN, A.; GRUIS, V. Towards a circular built environment: An integral design tool for circular building components, **Smart and Sustainable Built Environment** 9, 635–653, 2020. [HTTPS://DOI.ORG/10.1108/SASBE-05-2019-0063](https://doi.org/10.1108/SASBE-05-2019-0063).

VANDERBILT, M. D. (1972). **Shear Strength of Continous Plates**. Journal of the Structural Division, Proceeding of the American Society of Civil Engenieers.

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, Vol. 2, No 1 Pp 1-24, 2009.

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. Vol. 62, pp 3-16, 2010.

WASEEM, S. A.; SINGH, B. Shear transfer strength of normal and high-strength recycled aggregate concrete – An experimental investigation. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 29–40, 30 out, 2016.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading, **Cem Concr Res** 35, 1187–1194, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.020>.

XIAO, J.; WANG, W.; ZHOU, Z.; TAWANA, M.M. Punching shear behavior of recycled aggregate concrete slabs with and without steel *fib* res, **Frontiers of Structural and Civil Engineering** 13, 725–740, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11709-018-0510-6>.

XIAO, J.; XIE, H.; YANG, Z. Shear transfer across a crack in recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 5, p. 700–709, 2012.

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.

YAN, J.; LIU, K.; ZOU, C.; WANG, J. Eccentric compressive behavior of recycled aggregate concrete columns after freezing and thawing cycles, **Advances in Structural Engineering** 21, 2299–2310, 2018. <https://doi.org/10.1177/1369433218773132>.

YOSHIKANE, T. (1988). **Present status of recycling waste cement concrete in Japan**, Private Communication Research Laboratory, Taiyu Kensetsu Co Ltd, Japan.