



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFRAESTRUTURA E
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

SHARA KATHARINE MELO SILVA PORTILHO

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS NATURAIS POR RECICLADOS DE
CONCRETO NA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DE LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO COM
ARMADURA DE CISCALHAMENTO**

Tucuruí – PA

2023

SHARA KATHARINE MELO SILVA PORTILHO

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS NATURAIS POR
RECICLADOS DE CONCRETO NA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DE LAJES LISAS
DE CONCRETO ARMADO COM ARMADURA DE CISCALHAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Engenharia de Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto

Tucuruí – PA

2023

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

PORTILHO, SHARA KATHARINE MELO SILVA. INFLUÊNCIA DA
SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS
NATURAIS POR RECICLADOS DE CONCRETO NA
RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DE LAJES LISAS DE CONCRETO
ARMADO COM ARMADURA DE CISALHAMENTO /
SHARA KATHARINE MELO SILVAPORTILHO. — 2023.
122 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Campus Universitário de Tucuruí, Programa de Pós-
Graduação em Infraestrutura e Desenvolvimento
Energético, Tucuruí, 2023.

1. Lajes lisas. 2. Punção. 3. Armadura de
cisalhamento. 4. Agregado reciclado de concreto. I.
Título.

SHARA KATHARINE MELO SILVA PORTILHO

**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 apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Engenharia de Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto.

Aprovada em 25 de janeiro de 2024.

BANCA EXAMINADORA:



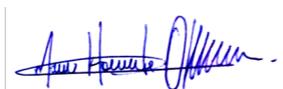
Doutor Aarão Ferreira Lima Neto / UFPA / Orientador



Doutor Manoel José Mangabeira Pereira Filho / UFPA / Avaliador Interno



Doutor Maurício de Pina Ferreira / UFPA / Avaliador Interno



Doutor Marcos Honorato de Oliveira / UnB/ Avaliador Externo

Ao meu criador.

AGRADECIMENTOS

A Deus, Uno e Trino, por me sustentar, capacitar e conduzir em mais essa jornada. Ao meu amado esposo, filha, pais e irmão, por serem meus maiores incentivadores em tudo o que faço. Vocês são o meu combustível, obrigada.

Ao meu orientador, professor Aarão Ferreira Lima Neto e aos professores Maurício de Pina Ferreira e Marcos Honorato de Oliveira por tornarem a realização desta pesquisa possível. Tão essenciais quanto, sou grata à professora Iana Ingrid Rocha Damasceno por todos os conhecimentos compartilhados e por trabalhar arduamente e incansavelmente ao meu lado, durante a execução desta pesquisa. Sou grata também ao amigo arquiteto Jayron Alves Ribeiro Júnior por toda dedicação e auxílio.

Não menos importante, agradeço imensamente ao professor Manoel José Mangabeira Pereira Filho por dedicar muitas e muitas horas em compartilhar seu conhecimento comigo, tirando muitas dúvidas, disponibilizando materiais e ainda por suas ideias e contribuições que enriqueceram este trabalho. Agradeço também ao querido Jedson Abrantes que não mediu esforços em auxiliar-me doando seu tempo, trabalho e conhecimento em quase todas as etapas desta pesquisa.

Deixo ainda meus agradecimentos a todos os amigos e colegas que, de alguma forma, se dispuseram em ajudar, em cada etapa desta pesquisa, que citarei, correndo o risco de esquecer alguém, pois foram muitas mãos auxiliaadoras. Muito obrigada Rodolfo, Vinicius, Thayse Mayara, Paulo, Fellype, Mateus, Kaliel, Iara, Alex, Túlio, Hilberth, Maria Tereza, Taumaturgo Neto, Mônica e Ronaldo. Agradeço também às professoras Fernanda Gouveia e Grazielle Tigre e à técnica de laboratório Francirene Bonfim pelo auxílio prestado no Laboratório de Engenharia Civil.

Finalmente, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Universidade Federal do Pará (UFPA) Campus Tucuruí e Belém, ao Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE), e ao Núcleo de Modelagem Estrutural Aplicada (NUMEA), por disponibilizarem equipamentos, recursos humanos e também financeiros para que esta pesquisa se concretizasse.

RESUMO

Esta pesquisa analisou experimentalmente o comportamento mecânico de quatro lajes lisas de concreto armado com armadura de cisalhamento quando submetidas a esforços de punção, sendo duas dessas lajes confeccionadas com traço contendo substituição total de agregados graúdos naturais (AGN) por agregados graúdos reciclados de concreto (ARCO) e duas de referência (sem substituição). As armaduras de cisalhamento utilizadas foram de dois tipos: *double headed studs* e estribos individuais. Os espécimes foram confeccionados em formato octogonal, com distância entre faces opostas de 2.500 mm, espessura de 210 mm e estão apoiadas em pilares centrais quadrados de 300 mm de lado. A estimativa da resistência média à compressão foi de 25 MPa e as taxas de armadura de flexão e de punção foram respectivamente 1,4% e 0,34%. Após os ensaios em laboratório, realizou-se um comparativo entre o comportamento experimental e as previsões teóricas dos modelos das normas ABNT NBR 6118 (2023), *Eurocode 2* (2014) e ACI 318 (2019), bem como do *fib Model Code 2010* (2013). Os resultados mostraram que as maiores capacidades resistentes à punção, quanto ao uso de armadura de cisalhamento, foram das lajes lisas com *double headed studs* em relação às fabricadas com estribos individuais. Observou-se ainda que as lajes com substituição total de agregados graúdos naturais por agregados reciclados de concreto apresentaram capacidades resistentes à punção inferiores às das lajes com agregado natural. Acerca da comparação entre a estimativa da capacidade resistente à punção das lajes lisas com armadura de cisalhamento com ARCO graúdo prescritos pelas normas analisadas e os resultados obtidos experimentalmente, observou-se que as quase todas as previsões normativas apresentaram valores bem próximos aos experimentais, exceto pela norma brasileira, que indicou que as lajes apresentaram resultados contra a segurança.

Palavras-chave: Lajes lisas; Punção; Armadura de cisalhamento; Agregado reciclado de concreto.

ABSTRACT

This research experimentally analyzed the mechanical behavior of four reinforced concrete flat slabs with shear reinforcement, when subjected to punching shear forces. Two of these slabs were made using a concrete mixture with a total replacement of natural coarse aggregates (NGA) by recycled concrete coarse aggregates (RCCA), and two slabs served as reference (without replacement). Shear reinforcement had two types: double headed studs and individual stirrups. The specimens were octagonal in shape, with 2,500 mm between opposite faces, thickness of 210 mm, and were supported on square central columns measuring 300 mm on each side. The estimated average concrete strength was 25 MPa, and the flexural and punching shear were 1.4% and 0.34%, respectively. After the laboratory tests, a comparison was made between the experimental behavior and the theoretical predictions from ABNT NBR 6118 (2023), Eurocode 2 (2014), ACI 318 (2019), and the *fib* Model Code 2010 (2013) models. Regarding the use of shear reinforcement, the results showed that the slabs with double headed studs presented higher punching shear strength when compared to those with individual stirrups. It was also observed that slabs with a total replacement of natural coarse aggregates by recycled concrete aggregates presented lower punching shear strength than slabs with natural aggregates. Regarding the comparison between the estimated punching shear strength of the flat slabs with shear reinforcement using RCCA prescribed by the analyzed codes and the experimental results, it was found that almost all code predictions were very close to the experimental values, except for the Brazilian code, which indicated results against safety.

Keywords: Flat slabs; Punching shear; Shear reinforcement; Recycled concrete aggregate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Sistemas estruturais de lajes (MORAES NETO, 2013).....	9
Figura 2.1 – Seção de uma matriz de concreto com ARCO (PAMPLONA, 2018).....	21
Figura 2.2 – Colapso do último pavimento do <i>Pipers Row Car Park</i> (RHODES, 2022).	26
Figura 2.3 – Padrão de fissuração (MUELLER <i>et al.</i> , 1984).	28
Figura 2.4 – Relação entre capacidade resistente à punção e a resistência à compressão do concreto (FERREIRA, 2010).....	29
Figura 2.5 – Armaduras com ancoragem por dobras (PEREIRA FILHO, 2016).....	32
Figura 2.6 – Armaduras com ancoragem mecânica (FREITAS, 2018).	32
Figura 2.7 – Arranjos das armaduras de cisalhamento (PEREIRA FILHO, 2016).....	33
Figura 2.8 – Esquema de rotação da laje (<i>FIB MODEL CODE</i> 2010, 2013).....	34
Figura 2.9 – Armaduras de cisalhamento em cruz (<i>FIB MODEL CODE</i> 2010, 2013).	36
Figura 2.10 – Perímetro de controle (ABNT NBR 6118, 2023).....	41
Figura 2.11 – Perímetro de controle <i>Eurocode 2</i> (EUROCODE 2, 2014 adaptado por PEREIRA FILHO, 2016).....	43
Figura 2.12 – Perímetro de controle ACI 318 (ACI 318, 2019).....	44
Figura 2.13 – Linhas de ruptura para esta dissertação.	45
Figura 2.14 – Laje de Reis <i>et al.</i> (REIS <i>et al.</i> , 2015).	49
Figura 2.15 – Laje e sistema de ensaio de Francesconi, Pani e Stochino (FRANCESCONI, PANI E STOCHINO, 2016).	51
Figura 2.16 - Laje de Mahmoud <i>et al.</i> (MAHMOUD <i>et al.</i> , 2018).....	54
Figura 2.17 – Sistema de ensaio de Mahmoud <i>et al.</i> (MAHMOUD <i>et al.</i> , 2018).	54
Figura 2.18 – Laje de Xiao <i>et al.</i> (Xiao <i>et al.</i> , 2019).	56
Figura 2.19 – Laje de Sahoo e Singh (SAHOO e SINGH, 2020).....	58
Figura 2.20 – Sistema de ensaio de Sahoo e Singh (SAHOO e SINGH, 2020).....	58
Figura 2.21 – Geometria das lajes de Ribeiro Júnior (RIBEIRO JÚNIOR, 2022).	60
Figura 3.1 – Modelo geral das lajes utilizadas nesta pesquisa (Autora, 2023).....	63
Figura 3.2 – Arranjo geral das armaduras nas lajes (Autora, 2023).	66
Figura 3.3 – Disposição geral dos estribos em um quadrante (Autora, 2023).....	67
Figura 3.4 – Detalhe dos estribos (Autora, 2023).....	67

Figura 3.5 – Laje com estribos (Autora, 2023).	68
Figura 3.6 – Disposição dos studs nas lajes (Autora, 2023).	68
Figura 3.7 – Detalhe dos <i>Double Headed Studs</i> (Autora, 2023).	68
Figura 3.8 – Laje com <i>Double Headed Studs</i> (Autora, 2023).	69
Figura 3.9 – Armadura dos pilares (Autora, 2023).	69
Figura 3.10 – Sistema de ensaio (Autora, 2023).	70
Figura 3.11 – Posicionamento dos LVDT's (Autora, 2023).	71
Figura 3.12 – Posicionamento dos extensômetros nas barras de flexão (Autora, 2023).	73
Figura 3.13 – Extensômetros de cisalhamento das Laje ST0 e ST100 (Autora, 2023).	74
Figura 3.14 – Extensômetros de cisalhamento das Lajes SS0 e SS100 (Autora, 2023).	74
Figura 3.17 – Posicionamento dos extensômetros no concreto (Autora, 2023).	75
Figura 3.18 – Produção do ARCO graúdo (Autora, 2023).	77
Figura 3.19 – Aspecto visual do ARCO (Autora, 2023).	77
Figura 3.20 – Ensaio do concreto no estado fresco (Autora, 2023).	79
Figura 4.1 – Resistência à compressão axial dos concretos de cada laje (Autora, 2023).	83
Figura 4.2 – Resistência à tração dos concretos de cada laje (Autora, 2023).	84
Figura 4.3 – Módulo de elasticidade dos concretos de cada laje (Autora, 2023).	84
Figura 4.4 – Perfil carga-deslocamento das lajes testadas (Autora, 2023).	86
Figura 4.5 – Comportamento carga-deslocamento das lajes testadas (Autora, 2023).	87
Figura 4.6 – Perfis de deformação circunferencial nas barras de flexão (Autora, 2023).	89
Figura 4.9 – Perfis de deformação na superfície do concreto (Autora, 2023).	89
Figura 4.8 – Deformações na armadura tracionada e superfície de concreto da laje ST0 (Autora, 2023).	90
Figura 4.9 – Deformações na armadura tracionada e superfície de concreto da laje ST100 (Autora, 2023).	90
Figura 4.10 – Deformações na armadura tracionada e superfície de concreto da laje SS0 (Autora, 2023).	91

Figura 4.11 – Deformações na armadura tracionada e superfície de concreto da laje SS100 (Autora, 2023).....	91
Figura 4.12 – Comportamento carga-deformação das lajes testadas (Autora, 2023).	92
Figura 4.13 – Perfil de deformações de cisalhamento das lajes testadas (Autora, 2023).	93
Figura 4.14 – Ruptura por arrancamento do cone de concreto, SS0 (Autora, 2023).94	
Figura 4.15 – Possível desdobramento da armadura (Autora, 2023).....	94
Figura 4.16 – Carga versus abertura de fissura (Autora, 2023).	95
Figura 4.17 – Mapa de fissuração das lajes (Autora, 2023).....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação simplificada dos RCD's.....	18
Tabela 2.2 – Diretrizes internacionais para agregados graúdos reciclados de concreto.	19
Tabela 2.3 – Resumo dos resultados experimentais de Rao, Reddy e Ghorpade (2012).....	47
Tabela 2.4 – Resumo dos resultados experimentais de Reis <i>et al.</i> (2015)	49
Tabela 2.5 – Resultados experimentais e teóricos Francesconi, Pani e Stochino (2016).....	52
Tabela 2.6 – Resultados experimentais de Mahmoud <i>et al.</i> (2018).	55
Tabela 2.7 – Resultados experimentais de Xial <i>et al.</i> (2019).	57
Tabela 2.8 – Resultados experimentais de Sahoo e Singh (2020).....	59
Tabela 2.9 – Resultados experimentais das lajes de Ribeiro Júnior (2022).....	61
Tabela 3.1 – Resumo das características das lajes.	64
Tabela 3.2 – Dosagem do concreto.	78
Tabela 4.1 – Resumo dos ensaios de caracterização dos agregados.	80
Tabela 4.2 – Resumo das propriedades mecânicas do aço.....	81
Tabela 4.3 – Resumo das propriedades do concreto no estado fresco.	82
Tabela 4.4 – Resistência à compressão axial dos concretos.	82
Tabela 4.5 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos.	83
Tabela 4.6 – Módulo de elasticidade dos concretos.....	84
Tabela 4.7 – Cargas experimentais e teóricas e modos de ruptura das lajes ensaiadas.	98
Tabela 4.8 – Escala de penalidade de Collins (2001).	99
Tabela 4.9 – Classificação das lajes ensaiadas segundo o critério de Collins (2001).	100

LISTA DE SIGLAS

ABAQUS	Software de Elementos Finitos Não Lineares
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ADS LINKSYS	Módulo de Sistema de Aquisição de Dados
ARCO	Agregado Reciclado de Concreto
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
EC2	Código Normativo Europeu
EER	Extensômetros Elétricos de Resistência
LACEM	Laboratório de Análise de Estruturas e Materiais
LBF0	Laje de referência sem armadura de cisalhamento e sem agregado reciclado de concreto
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MC10	<i>Fib model code</i>
MF	Módulo de Finura
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NDAE	Núcleo de Desenvolvimento Amazônico Engenharia
NUMEA	Núcleo de Modelagem Estrutural Aplicada
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
SS0	Laje com <i>double headed stud</i> sem agregado reciclado de concreto
SS100	Laje com <i>double headed stud</i> com agregado reciclado de concreto
ST0	Laje com estribos individuais sem agregado reciclado de concreto

ST100

Laje com estribos individuais com agregado reciclado de concreto

UFPA

Universidade Federal do Pará

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 Justificativa	12
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo geral.....	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 Estrutura da dissertação	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Agregados Reciclados de Concreto	17
2.1.1 Propriedades do ARCO	20
2.1.2 Propriedades dos concretos com ARCO.....	23
2.2 Punção em lajes lisas de concreto armado	25
2.2.1 Propriedades que exercem influência sobre a resistência à punção	28
2.2.2 Prescrições normativas para dimensionamento à punção de lajes lisas de concreto armado com armadura de cisalhamento.....	34
2.2.3 Determinação da resistência à flexão das lajes	45
2.3 Pesquisas sobre lajes lisas com ARCO	46
2.3.1 RAO, REDDY E GHORPADE (2012).....	46
2.3.2 LUO, ZONG e DU (2014)	48
2.3.3 REIS <i>et al.</i> (2015).....	48
2.3.4 FRANCESCONI, PANI E STOCHINO (2016)	51
2.3.5 MAHMOUD <i>et al.</i> (2018)	53
2.3.6 XIAO <i>et al.</i> (2019)	56
2.3.7 SAHOO e SINGH (2020).....	57
2.3.8 RIBEIRO JÚNIOR (2022).....	60
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	62
3.1 Características dos modelos ensaiados	62
3.2 Detalhamento das armaduras	65
3.2.1 Armaduras de combate à flexão.....	65
3.2.2 Armaduras de combate ao cisalhamento	67

3.2.3	Armaduras dos pilares	69
3.3	Sistema de ensaio	69
3.4	Instrumentação.....	71
3.4.1	Deslocamentos verticais.....	71
3.4.2	Deformações no aço e no concreto	72
3.5	Materiais utilizados para a confecção das lajes.....	75
3.5.1	Agregado miúdo e cimento Portland	75
3.5.2	Agregado graúdo natural	76
3.5.3	Agregado graúdo reciclado de concreto	76
3.6	Dosagem do concreto.....	78
3.7	Ensaio das barras de aço	78
3.8	Concretagem e ensaios do concreto no estado fresco e endurecido.....	78
4.	RESULTADOS E ANÁLISES.....	79
4.1	Materiais.....	79
4.2	Ensaio das barras de aço	81
4.3	Ensaio do concreto no estado fresco.....	81
4.4	Ensaio do concreto no estado endurecido.....	82
4.5	Deslocamentos verticais nas lajes.....	85
4.6	Deformações no aço e no concreto	88
4.6.1	Deformações na armadura de flexão e na superfície do concreto.....	88
4.6.2	Deformações na armadura de cisalhamento.....	91
4.7	Fissuração das lajes	94
4.8	Comparações entre os resultados experimentais e as prescrições normativas	97
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	
	101	
5.1	Comportamento geral das lajes à punção.....	101
5.1.1	Comportamento carga-deslocamento das lajes testadas.....	101
5.1.2	Deformações no concreto e nas armaduras	102

5.1.3 Fissuração.....	102
5.2 Comparações entre as previsões normativas e os resultados experimentais	103
5.3 Sugestões para trabalhos futuros.....	105
6. REFERÊNCIAS.....	106

1. INTRODUÇÃO

A construção civil, cada vez mais, tem se mostrado um setor de grande competitividade e que exige a busca por alternativas que se configurem como um diferencial, seja no âmbito econômico, na agilidade da entrega, ou ainda na flexibilidade da funcionalidade da edificação ou no zelo por construir de maneira mais sustentável, visto que a geração em larga escala de resíduos da construção civil e a consequente insuficiência de soluções eficazes para o seu descarte adequado, são temas evidenciados nas discussões sobre impactos ambientais.

Por esses, e por outros, inúmeros fatores é que os profissionais devem se atualizar constantemente a fim de ter ferramentas e conhecer técnicas para a melhor tomada de decisão, tanto na confecção dos projetos quanto na execução da obra. O sistema estrutural de lajes lisas (Figura 1.1a) é um exemplo de técnica que vem sendo amplamente utilizada ao redor do mundo, nele as lajes apoiam-se diretamente sobre os pilares, tornando-se desnecessário o uso de vigas e capitéis.

O sistema de lajes lisas pode apresentar uma série de vantagens construtivas, quando comparado ao tradicional (Figura 1.1b), entre as quais destacam-se: a simplificação na execução das fôrmas, possibilitando a redução de desperdícios; a facilidade no detalhamento das armaduras; facilidade no lançamento, adensamento e desforma do concreto; a possível redução na altura total da edificação, que culmina em economia no consumo de materiais e na redução da área de exposição ao vento, reduzindo esforços laterais; e a adaptação da obra a diferentes finalidades (OLIVEIRA, GOMES e MELO, 2014).

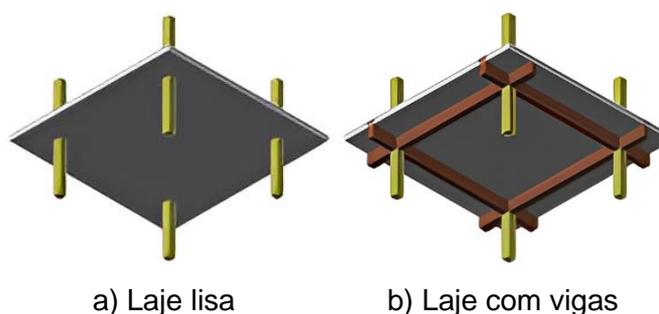


Figura 1.1 – Sistemas estruturais de lajes (MORAES NETO, 2013).

Por outro lado, quando se opta por esse método construtivo, o projeto estrutural deve ser feito de forma cuidadosa e detalhada, uma vez que esse sistema apresenta como desvantagens a possibilidade do surgimento de flechas inaceitáveis

em condições de serviço, momentos elevados nas regiões de ligação da laje ao pilar, grandes deslocamentos transversais da laje, e o aumento expressivo da espessura das lajes (PARK e GAMBLE, 2000). No entanto a principal desvantagem, quando se trata das lajes lisas é a possibilidade de uma ruptura por puncionamento, para uma carga menor do que seria a carga de ruptura por flexão (OLIVEIRA, GOMES e MELO, 2014).

A ruptura por punção ocorre quando há a potencialização do efeito dos esforços cortantes na ligação laje-pilar, de forma que a laje seja perfurada pelo apoio com o pilar. Essa ruptura é frágil e pode levar a consequências desastrosas, podendo resultar até mesmo em colapsos progressivos de estruturas. Por esse motivo é interessante, como diretriz de projeto, assegurar que, caso aconteça a ruína, ela não ocorra por punção, e sim por flexão (RABELLO, 2010).

Durante a fase de projeto, é possível determinar diretrizes para evitar a ruptura por punção, algumas das medidas que podem ser adotadas são: o emprego de capitéis, o aumento da seção transversal do pilar, da espessura da laje, da taxa de armadura de flexão, ou ainda da resistência do concreto, bem como a incorporação de armaduras de cisalhamento.

A utilização de capitéis e o aumento da seção do pilar são soluções consideradas inapropriadas, visto que acarretarão em incompatibilidades arquitetônicas. Aumentar a espessura da laje, por sua vez, pode acabar aumentando o peso próprio da estrutura, elevando as cargas nas fundações. Já o aumento da resistência do concreto e da taxa de armadura de flexão podem ser alternativas pouco práticas e eficientes.

Dessa forma, um caminho para elevar a resistência ao puncionamento, conferindo mais ductilidade à estrutura, é o emprego de uma armadura de cisalhamento (PEREIRA FILHO, 2021). A quantidade e o arranjo das armaduras influenciam na resistência à punção de lajes lisas, bem como em seu dimensionamento (FERREIRA *et al.*, 2016). Freitas (2018) ressalta que muitos tipos de armadura de cisalhamento vêm sendo estudados, e que elas podem possuir vários formatos e classificações.

Ao longo do tempo, abordagens sobre mecanismos de resistência da ligação laje-pilar foram desenvolvidas, dando origem a modelos de previsão da carga de ruptura. Alguns modelos notórios são os de Kinnunen e Nylander (1960), e os de

Muttoni (2008) e Ruiz e Muttoni (2009). Quanto às prescrições normativas mais relevantes tratando sobre os modelos de cálculo relativos à resistência à punção, destacam-se: *fib Model Code 2010* (2013) a NBR 6118 (2023), o *Eurocode 2* (2014) e o ACI 318 (2019).

As normas atuais e modelos de cálculo citados, apesar de abordarem a punção de maneira aprofundada, não apresentam especificações acerca de como o tipo de agregado utilizado na confecção dessas estruturas poderia interferir em suas propriedades mecânicas. Para fornecer previsões normativas seguras, é preciso conhecer, com a máxima exatidão possível, a tendência de variação da resistência à punção quando há alteração dos parâmetros que podem ter influência sobre ela.

A exemplo da importância dos trabalhos experimentais no contexto normativo, está o fato de que as normas e códigos nacionais e internacionais calculam a resistência à tensão cisalhante de uma seção em torno do pilar denominada seção crítica, e ajustam esse valor com coeficientes embasados em trabalhos experimentais. Ressalta-se, dentro desse contexto, a importância de se levar em consideração a análise referente ao engrenamento dos agregados para a resistência à punção, e que o tamanho do agregado também pode vir a influenciar nesse contexto, como sugerem recomendações como o *fib Model Code*. Nesse sentido, espera-se que a inserção do agregado reciclado possa influenciar de alguma forma os resultados desta pesquisa.

Nesse cenário, corroborando com a demanda atual por processos construtivos mais sustentáveis, está o uso de resíduos de construção e demolição (RCD) como matéria prima na construção civil, que pode ser viável e possibilita reduzir a quantidade de recursos naturais retirados do meio ambiente, bem como a de resíduos descartados de modo impróprio. Os resíduos de construção e demolição apresentam composição variada, no entanto, de acordo com Sá (2016), a parcela dos RCD que possui maior potencial de utilização é o concreto, que, por esse motivo, esse material foi escolhido para ser usado na presente pesquisa.

Pesquisadores como Malesev, Radonjanin e Marinkovic (2010), Yuan e Shen (2011), Behera *et al.* (2014) e muitos outros, vêm estudando as propriedades dos agregados reciclados de concreto (ARCO), bem como seu potencial uso em estruturas de concreto armado e destacam que o uso de ARCO em concretos estrutural é um procedimento complexo, visto que as propriedades do agregado reciclado são distintas das dos agregados naturais.

Pamplona (2018) ressalta que a principal característica que difere o ARCO dos agregados naturais é a argamassa aderida a esse primeiro, que interfere diretamente em propriedades como a absorção de água do agregado e conseqüentemente nas propriedades do concreto produzido com ele. Assim, um dos desafios das pesquisas envolvendo este tema é descobrir como aplicar de maneira mais eficaz o ARCO, de forma a aproveitá-lo ao máximo, sem comprometer a segurança das estruturas.

Todavia, em seus estudos, pesquisadores como Luo, Zong e Du (2014), Rao, Reddy e Ghorpade, Reis *et al.* (2015), Francesconi, Pani e Stochino (2016), Mahmoud *et al.* (2018), Xiao *et al.* (2019), e Sahoo e Singh (2020) investigaram acerca da incorporação de ARCO na produção de lajes lisas de concreto armado e todos observaram uma ligeira diminuição da resistência à compressão do concreto produzido com ARCO. Porém, tais autores também notaram uma resistência à punção semelhante em concretos convencionais e concretos com incorporação de ARCO, chegando à conclusão de que sua utilização é viável.

No entanto, deve-se considerar o fato de que tais autores utilizaram lajes com dimensões aquém do preconizado normativamente, ou seja, demonstram ser trabalhos exploratórios e não conclusivos, o que pode ter influenciado nos resultados obtidos pelos autores e corrobora com a ideia da necessidade de ensaiar modelos maiores.

1.1 Justificativa

Do ponto de vista ambiental, a utilização de resíduos de concreto, como agregados reciclados, nas estruturas de concreto armado, pode ser importante na preservação do meio ambiente, já que, além de reduzir a extração de recursos naturais, pode também minimizar os problemas gerados pelo acúmulo desses resíduos nas áreas urbanas. De acordo com dados fornecidos pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), em 2021, a produção brasileira de RCD foi estimada em mais de 48 milhões de toneladas ao ano, com um crescimento de 2,9% em relação ao ano anterior, sendo que grande parte desses resíduos são restos de concreto.

Em paralelo a esse cenário, embora o sistema estrutural de lajes lisas seja consolidado, o estudo da punção ainda não é um assunto perfeitamente definido

teoricamente. As normativas internacionais e nacional adotam critérios de dimensionamento e especificações de cálculo diferentes, e são baseadas em trabalhos empíricos, fato que torna as pesquisas experimentais fundamentais no entendimento dos diversos problemas que envolvem o uso deste tipo de sistema.

Nesse contexto, após uma busca direcionada sobre pesquisas relacionadas à punção em lajes lisas confeccionadas com agregado reciclado, verificou-se que, apesar dos trabalhos existentes acerca do tema, ainda é necessário realizar estudos para conhecer de modo mais profundo as particularidades acerca do comportamento dessas estruturas.

Durante a pesquisa notou-se também que os trabalhos existentes acerca do tema vêm ensaiando lajes com dimensões pequenas (entre 1.100 e 1.600 mm de distância entre as faces, e espessura entre 50 e 150 mm), que não condizem com a escala real e nem com as espessuras mínimas para lajes lisas preconizadas normativamente (A NBR 6118:2023, por exemplo, estabelece que a menor espessura para lajes lisas deve ser de 160 mm). Dessa forma, faz-se importante ensaiar espécimes maiores para estudá-los de forma mais sistemática, como o presente trabalho se propôs a fazer.

Além disso, constatou-se ainda que mesmo as normas disponíveis mais relevantes, tanto nacionais quanto internacionais, sobre projetos de estruturas de concreto armado, não levam em consideração o tipo de agregado na estimativa de resistência à punção de lajes lisas, e entender como as estruturas de concreto armado irão se comportar em relação ao emprego de agregados reciclados em sua confecção, pode ser importante, na busca por desvendar algumas incógnitas acerca das variáveis que podem interferir nas propriedades das estruturas produzidas com esse tipo de concreto.

Ademais, sabendo-se que o melhor caminho para evitar a ruptura por punção em lajes lisas de concreto armado é a inserção de armaduras de cisalhamento e que a quantidade e o arranjo das armaduras também influenciam na resistência à punção dos espécimes, e ainda, levando em consideração que as normativas que tratam da determinação da capacidade resistente de lajes lisas são restritas a determinados tipos de armaduras de cisalhamento, como conectores e estribos, e que não fazem considerações em relação a possíveis variações nos tipos de armaduras de cisalhamento e formas de ancoragem, utilizou-se nesta pesquisa dois tipos de

armadura de cisalhamento, a fim de comparar a influência de ambas na resistência à punção: os estribos isolados compostos por barras verticais com ganchos nas extremidades (armadura de ancoragem por dobras) e os *double headed studs* (armadura de cisalhamento com ancoragem mecânica).

Diante disso, o presente trabalho apoia-se em tais situações como justificativas para analisar experimentalmente o comportamento de lajes lisas, no que diz respeito à punção, quando da substituição total de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto e com inserção de armadura de cisalhamento nessas estruturas. Os modelos experimentais apresentados nesta dissertação também são parte integrante da segunda série de ensaios da tese de doutorado, em fase de elaboração, de Lana Damasceno, Universidade de Brasília, e são ainda uma sequência dos estudos feitos por Ribeiro Júnior (2022).

A primeira série de ensaios de Damasceno e de Ribeiro Júnior (2022) teve como objetivo investigar a resistência máxima à punção de modelos de ligações laje-pilar sem armadura de cisalhamento, com diferentes teores de substituição de agregado natural por ARCO. Esta segunda série, por sua vez, pretende avaliar a resistência máxima à punção, porém com inserção de armadura de cisalhamento dos tipos conector e estribo individual, com arranjo em cruz, e com total substituição de agregado natural por ARCO.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo principal a análise experimental do efeito da substituição de agregados naturais por agregados graúdos reciclados de concreto no comportamento da resistência à punção de lajes lisas de concreto armado com armadura de cisalhamento.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar o comportamento à punção das lajes lisas com armadura de cisalhamento com substituição total de agregados graúdos naturais por agregados reciclados de concreto;

- Analisar a influência de dois tipos de armadura de cisalhamento, estribos e *double headed studs*, ambos com distribuição em cruz, na resistência à punção em lajes lisas de concreto armado contendo ARCO graúdo;
- Realizar comparações acerca dos critérios de dimensionamento à punção e da estimativa da capacidade resistente à punção das lajes lisas com armadura de cisalhamento com ARCO graúdo prescritos pelas normas *fib Model Code 2010* (2013), ABNT NBR 6118 (2023), *Eurocode 2* (2014) e ACI 318 (2019) e os resultados obtidos pelo programa experimental;
- Comparar os resultados destes experimentos com a pesquisa realizada por Ribeiro Júnior (2022).

1.3 Estrutura da dissertação

Além deste capítulo introdutório, que trata, principalmente, da exposição breve do tema, da justificativa e objetivos da pesquisa, esta dissertação apresenta mais 4 capítulos. No segundo capítulo está apresentada a revisão bibliográfica. Dentre outras coisas, são discutidos: a extração de recursos naturais e a geração de resíduos por parte da indústria da construção civil, bem como a definição, composição e classificações desses resíduos, as propriedades e influência dos agregados reciclados de concreto na produção de concretos e as principais aplicações do ARCO.

O capítulo 2 também descreve, os aspectos gerais acerca da resistência à punção em lajes lisas de concreto armado, bem como mostra as principais recomendações normativas para cargas de ruptura de lajes lisas de concreto armado com armadura de cisalhamento, além de apresentar algumas pesquisas relacionadas ao tema.

No terceiro capítulo foi abordado o programa experimental, o qual detalha as características das lajes, os materiais empregados em sua confecção e o sistema de ensaio. O capítulo busca explicar de forma clara e objetiva como ocorreu a produção do ARCO, as informações mais relevantes sobre as características físicas dos materiais utilizados, o traço utilizado para a concretagem, a instrumentação das lajes e demais aspectos pertinentes. Ressalta-se que os modelos experimentais apresentados nesta dissertação também são parte integrante da tese, em fase de elaboração, da doutoranda da Universidade de Brasília, Iana Damasceno.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, que são as respostas para os objetivos propostos. São apresentados, de forma geral, os resultados e análises das resistências máximas, obtidos experimentalmente e comparados com os valores calculados de acordo com as prescrições normativas. Os resultados apresentados nesta dissertação também são parte integrante da tese de Damasceno, que está em fase de elaboração. O capítulo 5, finalmente, apresenta as conclusões aferidas ao longo deste estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agregados Reciclados de Concreto

O impacto ambiental ocasionado pela geração de Resíduos de Construção e Demolição é uma problemática comum a diversos países, que cresce à medida que aumenta o desenvolvimento da construção civil. Segundo informações fornecidas pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), em 2021 foram coletados pelos municípios mais de 48 milhões de toneladas de RCD, o que representa um crescimento de 2,9% em relação ao período anterior.

Embora tenha sido sancionada desde 2010 a Lei 12.305/2010, conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), no Brasil, o descarte final de parte desses resíduos ainda é feito de forma inadequada, causando danos ao meio ambiente, bem como questões socioeconômicas. Nesse contexto, o ano de 2022 foi representativo para a gestão de resíduos sólidos no Brasil, com a edição do Decreto nº 10.936/2022, que apresenta nova regulamentação para a PNRS, e do Decreto nº 11.043/2022, que instituiu o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, que estipula as diretrizes e metas para o setor, para um cenário de 20 anos (ABRELPE, 2022).

Ainda de acordo com a Associação, a composição do RCD é, geralmente, muito variável, devido as particularidades de cada obra. Porém é possível afirmar que, embora não se tenha um número exato, boa parte desses resíduos costumam ser restos de concreto. A composição do RCD, no Brasil, é majoritariamente composta por: brita, areia, concreto, argamassa, cerâmicas, madeira, papelão, metais e plástico, ou seja, materiais não poluentes e quimicamente inertes. Os RCD's, são classificados com base nas diretrizes das Resoluções CONAMA nº 307 (2002), 348 (2004), 431 (2011) e 448 (2012). A normativa indica que os resíduos da construção devem ser classificados como mostra a Tabela 2.1, de forma simplificada.

Tabela 2.1 – Classificação simplificada dos RCD's.

Classes	Integrantes predominantes considerados na composição gravimétrica
A	Resíduos recicláveis como: agregados, tijolos, blocos, telhas, argamassa, concreto, areia e pedra
B	Resíduos recicláveis para outras finalidades, como: papel, plásticos, restos de madeira, metais, vidros e gesso
C	Resíduos para os quais não há tecnologias ou aproveitamentos economicamente viáveis que possibilitem sua reciclagem ou recuperação
D	Resíduos perigosos provenientes do processo de construção, como tintas, solventes e óleos; ou ainda resíduos contaminados, como amianto

Fonte: Autora (2023).

Diante disso, a reciclagem parece uma alternativa viável para atenuar o problema da destinação inapropriada dos resíduos de construção e demolição, uma vez que culmina na diminuição na extração de recursos naturais limitados, e ainda na consequente redução da poluição ambiental oriunda da destinação inadequada dos RCD's. No entanto, apesar dos benefícios apresentados, a utilização de resíduos como agregado implica na realização de estudos prévios a fim de compreender como ele pode interferir nas propriedades das argamassas e dos concretos (LINTZ, 2012).

Dentre os vários tipos de resíduos da indústria da construção civil, os resíduos de concreto apresentam um dos maiores potenciais de reutilização, pois é mais provável que se conheça suas características (resistência característica, idade, composição) e devido também ao seu menor grau de contaminação quando comparado a outros resíduos. Assim, nesta dissertação, decidiu-se por usar apenas o resíduo classe A, em particular, o agregado reciclado constituído por resíduos de concreto (ARCO). Destaca-se que a substituição foi apenas da parcela grádua dos agregados, uma vez que pesquisadores como Santos *et al.* (2002), Pedrozo (2008), Rodrigues (2014), entre outros, constataram que o uso de agregados miúdos reciclados de concreto não se mostra tão satisfatório para a produção de novos concretos estruturais quanto a parte grádua.

Destaca-se ainda que o uso de ARCO já é uma realidade no mundo, contudo, conforme o levantamento de Tam, Soomro e Evangelista (2018), há divergências quanto ao uso do ARCO numa escala internacional. Na Austrália, por exemplo, o ARCO é o resíduo de construção e demolição mais comum na produção de concreto. Os padrões japoneses, por sua vez, restringem o uso de agregado reciclado em concretos com resistência de projeto superior a 18 MPa e não impõem requisitos sobre

a fonte do agregado, nem delimita proporções específicas. Já no padrão Dinamarquês o ARCO pode ser usado para concreto armado e não armado com resistência à compressão de até 40 MPa em condições ambientais moderadas e passivas.

Países como Hong Kong, Bélgica, Alemanha e Espanha também possuem suas particularidades no uso do ARCO, segundo Tam, Soomro e Evangelista (2018). No Brasil, a ABNT NBR 15116 (2021), que apresenta os requisitos e métodos de ensaios para os agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland, normatiza que o ARCO é a única classe de agregado reciclado que pode ser usada na produção de compósitos ou produtos com função estrutural, o que pode ser considerado um grande avanço, visto que até 2021 os agregados reciclados só podiam ser utilizados em concretos não estruturais e pavimentos. A Tabela 2.2, resume as considerações de cada país acerca do uso dos agregados graúdos reciclados de concreto.

Tabela 2.2 – Diretrizes internacionais para agregados graúdos reciclados de concreto.

País	Normativa	Teor máximo de ARCO (%)	Resistência máxima à compressão permitida para aplicação de ARCO em concretos (MPa)	Tipo de Aplicação
Alemanha	DIN 4226-100 (2002)	35	25	Concreto estrutural
	DIN EM 12620 (2017)	25	35	
	DAfStb (2010)	100	25	
Austrália	AS 1141.6.2-1996 (R2016)	30	40	
Brasil	NBR 15116 (2021)	20	20	Concreto estrutural e não estrutural
Bélgica	PTV 406 9.0 (2020)	Não referenciado	30	Concreto estrutural
	BS EN 12620 (2013)			
Espanha	EHE (2008)	20	40	
Hong Kong	CS-3 (2013)	20	30	Concreto não estrutural
	HKBD (2004)	100	20	
Japão	BSCJ (1977)	Não referenciado	30	Concreto estrutural
	JIS A 5021 (2018)			
	JIS A 5022 (2018)			
	JIS A 5023 (2018)			

Fonte: Autora (2023).

De acordo com a normativa brasileira, o teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado deve ser de 20% da massa de agregados totais, no máximo, e podem ser utilizados somente em concretos pertencentes às classes de

agressividade I e II da norma de estruturas de concreto armado, ABNT NBR 6118 (2023). Ainda segundo a norma brasileira, o ARCO também pode ser empregado para confeccionar concretos de cimento Portland não estruturais, artefatos pré-fabricados não estruturais e argamassa de assentamento, revestimento e contrapiso, em teores de substituição de até 100% da massa de agregados naturais, desde que atenda a todos as premissas determinadas pelas normas específicas, independentemente dos teores de substituição.

Ressalta-se também, que no Brasil, alguns pesquisadores têm se dedicado ao estudo da viabilidade do emprego de agregados reciclados de concreto em elementos estruturais a exemplo de Butler (2007), que estudou o uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural e Cordeiro (2013) que analisou os parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto.

Mais especificamente e trazendo para o contexto local, algumas dissertações têm sido desenvolvidas na Universidade Federal do Pará sobre este tema, como a de Santos (2018) que analisou a resistência ao arrancamento de pinos de aço embutidos em elementos estruturais com agregado reciclado de concreto, a de Pamplona (2018) que avaliou a resistência ao fendilhamento de elementos estruturais de concreto simples e armado com agregado reciclado de concreto e a de Ribeiro Júnior (2022) que trata da análise experimental da resistência à punção em lajes lisas com substituição de agregados graúdos naturais por reciclados de concreto, sem armadura de cisalhamento.

Ainda nesse contexto, porém com o enfoque em lajes lisas, alguns pesquisadores, como Luo, Zong e Du (2014), Rao, Reddy e Ghorpade (2012), Reis *et al.* (2015), Francesconi, Pani e Stochino (2016), Mahmoud *et al.* (2018), Xiao *et al.* (2019), e Sahoo e Singh (2020) têm alcançado resultados satisfatórios comparando o comportamento à punção entre lajes lisas com agregados naturais e lajes com ARCO graúdo, o que destaca a importância dos estudos relacionados a este tipo de material.

2.1.1 Propriedades do ARCO

Antes de adentrar nas propriedades do ARCO em si, faz-se necessário mencionar que um material pode ser analisado a nível macroscópico, ou a um nível mais aprofundado, que é o microscópico, e que o estudo da macroestrutura

certamente desencadeia questões que somente são solucionadas quando é realizada análise das propriedades da microestrutura do material. No entanto, esta dissertação leva em conta mais precisamente o estudo das propriedades do ARCO e do concreto a nível macroscópico.

Segundo Huang *et al.* (2009), o agregado graúdo exerce bastante influência na densidade, no módulo de elasticidade e na estabilidade dimensional do concreto, visto que essas propriedades são influenciadas pelas características físicas do agregado, como: volume, tamanho, forma, granulometria e distribuição de poros. Mehta e Monteiro (2008), por sua vez, ressaltam que a resistência do agregado não influencia diretamente a resistência do concreto, salvo se o agregado for muito quebradiço. A dimensão e forma do agregado também não exercem influência direta. No entanto, indiretamente, o agregado maior produz mais água de exsudação interna acumulada, promovendo o enfraquecimento da zona de transição na interface pasta-agregado o que tende a gerar uma ruptura por cisalhamento na superfície do agregado, dessa forma, o concreto rompe na pasta e não no agregado graúdo.

Behera *et al.* (2014) apontam que agregados reciclados de concreto são oriundos do processamento de concreto original (por meio de trituração, peneiramento e remoção de impurezas) e Pamplona alega que o ARCO apresenta algumas diferenças entre suas propriedades e a dos agregados naturais, que estão relacionadas, sobretudo, à quantidade de argamassa do concreto original aderida à superfície dos mesmos, favorecendo a microfissuração na zona de transição (Figura 2.1).

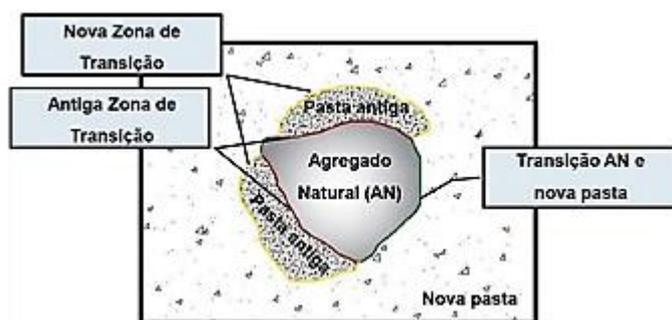


Figura 2.1 – Seção de uma matriz de concreto com ARCO (PAMPLONA, 2018).

A camada de argamassa aderida influencia as propriedades do agregado e as do concreto produzido com ele, no estado fresco e endurecido. Como exemplo, a seguir, são apresentadas algumas propriedades dos agregados reciclados de

concreto e ainda a diferença das propriedades dos concretos produzidos com ARCO quando comparadas as dos concretos com agregados naturais de características similares.

2.1.1.1 Granulometria

De acordo com Malta (2012), o ARCO, geralmente, possui composição granulométrica contínua e com grande quantidade de finos, de forma que são graduados de maneira bem distribuída, permitindo a interação física entre as partículas. Oliveira (2012) destaca que, ao analisar a granulometria do agregado graúdo reciclado em comparação ao natural, geralmente, o primeiro possui a dimensão máxima característica menor que o segundo, porém, cabe ressaltar que existe uma grande influência do processo de britagem nesse resultado. A abertura da mandíbula do britador é que vai condicionar o tamanho das partículas.

2.1.1.2 Massa específica e massa unitária

Cordeiro *et al.* (2017) apontam que o ARCO, geralmente, possui massas específica e unitária menores que as dos agregados naturais. No que se refere à redução massa unitária, fatores como a densidade do material, a porosidade elevada e a forma mais irregular dos agregados (que aumenta os vazios entre grãos) influenciam nessa diminuição. Já a redução da massa específica está associada principalmente ao fato de que o ARCO é menos denso que os agregados naturais.

A densidade do ARCO é menor que a dos agregados naturais, devido ao fato de que os agregados reciclados de concreto são compostos por dois materiais distintos: agregado natural e argamassa aderida. Assim, a literatura técnica mostra que quanto maior for a quantidade de argamassa aderida, menor será a massa específica do agregado reciclado de concreto (CAVALHEIRO, 2011; SHI *et al.*, 2016).

De acordo com Silva, Brito e Dhir (2014), a argamassa aderida possui alta porosidade, que está intrinsecamente relacionada à relação água/aglomerante e à densidade do concreto de origem. Por esse motivo, a qualidade da argamassa aderida ao ARCO também influencia em sua densidade. Logo, constata-se que agregados reciclados mais densos são provenientes de concretos mais resistentes, uma vez que estes são, normalmente, produzidos com relações água/aglomerante menores e possuem maior compacidade.

2.1.1.3 Absorção de água

A absorção de água tende a ser mais elevada nos agregados reciclados de concreto quando comparados aos agregados naturais, o que pode ser explicado devido à sua maior porosidade. Dessa forma, quando se deseja alcançar trabalhabilidade semelhante, os concretos com ARCO precisam de uma relação água/aglomerante tanto maior quanto maior for a porcentagem de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto. Entretanto, é necessário cautela, pois a compensação total da água na produção dos concretos com ARCO poderá reduzir a resistência mecânica do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014; OLIVEIRA, 2012; MISTRÌ *et al.*, 2021).

2.1.2 Propriedades dos concretos com ARCO

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), o concreto é um material trifásico, composto pelas fases: agregado graúdo, argamassa endurecida e zona de transição. Assim, o concreto possui uma estrutura bastante complexa e heterogênea e suas fases interagem entre si e as propriedades de cada uma influencia as outras. Portanto, quando se deseja ter um controle ou conhecimento de suas propriedades, faz-se necessário conhecer seus principais constituintes, suas características e a relação entre eles.

2.1.2.1 Trabalhabilidade

De acordo com Butler, Wes e Tighe (2011), a absorção de água em um agregado exerce bastante influência na trabalhabilidade do concreto em seu estado fresco. Devido a maior absorção do ARCO, quando comparado com o agregado natural, quando se utiliza uma mesma quantidade de água em duas dosagens, que somente se diferenciam pelo tipo de agregado, aquela que teve a incorporação de material reciclado será mais seca.

2.1.2.2 Resistência à compressão

A literatura técnica mostra que a resistência à compressão dos concretos produzidos com agregados reciclados de concreto é, geralmente, menor quando comparada a concretos feitos com agregados naturais com mesmo traço, o que pode

ter relação com a porosidade e absorção de água maiores, menor resistência do ARCO, tamanho, tipo, qualidade e quantidade dos agregados reciclados, maior relação água cimento de concretos com agregado reciclado.

De acordo com Olorunsogo e Padayachee (2002), numa abordagem mais microscópica, a baixa disponibilidade de água entre a argamassa e agregados antigos, que faz com que a zona de transição se torne mais fraca, tornando-se um fator de controle para falha do concreto.

Pamplona (2018), destaca que nos agregados reciclados de concreto, há uma antiga zona de transição interfacial, por conta da argamassa aderida a eles. A zona de transição possui natureza fraca e funciona como ponte de transferência de tensão entre a matriz da argamassa e as partículas de agregado graúdo. Em razão da zona de transição, o concreto pode romper a um nível de tensão mais baixo do que a resistência dos elementos que constituem as outras fases, agregado e argamassa.

A literatura técnica mostra essa redução da resistência, embora haja uma variabilidade entre os resultados de diferentes pesquisadores. Rao, Reddy e Ghorpade (2012), que analisaram lajes lisas de concreto com resistência mínima de 30 MPa, aos 28 dias, por meio de pesquisas experimentais, concluíram que o aumento da quantidade de ARCO no concreto promove redução da resistência à compressão dos modelos ensaiados, mas essa redução é considerada admissível para um limite de até 40% de substituição de agregados graúdos naturais por reciclados de concreto. Os autores testaram 5 teores de substituição: 20, 40, 60, 80 e 100%.

Mahmoud *et al.* (2018) também ensaiaram lajes com resistência mínima de 30 MPa, substituindo o agregado natural pelo reciclado nos teores 30, 60 e 100% e semelhantemente constataram redução no comportamento mecânico das lajes com concreto com ARCO. A resistência à compressão do concreto apresentou redução média de 13%. A redução nas propriedades mecânicas dos concretos também foi notada nas pesquisas de Reis *et al.* (2015) e de Xiao *et al.* (2019) que testaram diferentes teores de substituição.

Autores como Sahoo e Singh (2020), por sua vez, afirmam que não foram observados efeitos significativos para a resistência à compressão das lajes produzidas por eles. Os percentuais de substituição de agregados naturais por ARCO utilizado pelos autores foram 50% e 100%, para um concreto com resistência em torno de 30 MPa. Diante do exposto, de forma geral, a literatura mostra que variabilidade dos

resultados pode estar relacionada à heterogeneidade dos agregados reciclados, no entanto a maioria dos pesquisadores conclui que a resistência à compressão reduz a medida em que o teor de incorporação dos reciclados é aumentado.

2.1.2.3 Resistência à tração e módulo de elasticidade

Na resistência à tração dos concretos com ARCO, muitos autores também constataram redução conforme o ARCO é incorporado à massa. A exemplo disso, Rao, Jha e Misra (2007) encontraram que para 100% de substituição, a resistência à tração do concreto foi reduzida de 15 a 20%. Para o módulo de elasticidade, também há decréscimo quanto maior o teor de substituição.

De acordo com Corinaldesi (2010), concretos com 30% de ARCO apresentam módulo de elasticidade 15% menor em comparação a 0% de ARCO. Ignjatovic *et al.* (2017) observaram que concretos com 50% e 100% de AGRC apresentaram até 13% de diminuição do módulo de elasticidade. Rao, Jha e Misra (2007) encontraram 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 AGRC também apresentam menores módulos de elasticidade.

2.2 Punção em lajes lisas de concreto armado

O sistema estrutural de lajes lisas é bastante difundido e utilizado em vários países, no mundo todo. Nesse sistema não há vigas ou capitéis entre a laje e o pilar, ou seja, as lajes apoiam-se diretamente sobre os pilares. Dentre as principais vantagens de se utilizar o sistema de lajes lisas estão a possibilidade de maior agilidade ao processo construtivo devido à simplificação das formas e armaduras do pavimento, menor pé direito requerido do pavimento, maior flexibilidade ao *layout* dos pavimentos, entre outros (SANTOS, 2018).

Como desvantagem, na região da ligação laje-pilar ou na região de cargas concentradas aplicadas diretamente sobre a laje há grande probabilidade de ruptura por punção. Em alguns casos, podendo levar até a um colapso progressivo da estrutura, onde há a propagação de uma ruptura ocorrida originalmente em pequena parte da estrutura, na qual o dano resultante é desproporcionalmente maior que o original (OLIVEIRA, GOMES e MELO, 2014).

Pode-se encontrar na literatura muitos exemplos de acidentes estruturais com ruptura por punção em edifícios, o que destaca a importância do estudo do tema. Alguns dos acidentes encontrados na literatura são: o colapso do edifício *Prest-o-Lite* nos Estados Unidos, o colapso parcial do último pavimento do edifício *Pipers Row Car Park* no Reino Unido (Figura 2.2), o acidente no shopping Rio Poty no Piauí, o caso do edifício *Sampoong Department Store* na Coreia do Sul, entre tantos outros (WOOD, 2003; SESSA, 2017).



Figura 2.2 – Colapso do último pavimento do *Pipers Row Car Park* (RHODES, 2022).

De acordo com Paiva *et al.* (2015), a punção pode ser descrita do seguinte modo: inicialmente as tensões principais acima da linha neutra fissuram a laje formando uma parte de um cone, em seguida, com o aumento da carga, a força de compressão radial inclinada esmaga a parte abaixo da linha neutra completando o cone de ruptura a punção.

Em outras palavras, a ruptura por punção acontece por corte localizado, de forma brusca, há uma desconexão entre a laje e o pilar. Diante disso, entende-se que a resistência ao cisalhamento é um fator determinante no dimensionamento de lajes lisas, que certamente influenciará na determinação da espessura da laje, geometria dos pilares, resistência à compressão do concreto, e uso de armadura de cisalhamento.

Autores como Ferreira (2010), Moraes Neto (2013) e Pereira Filho (2021), destacam que existem muitos parâmetros que podem exercer influência na resistência à punção, alguns deles são: resistência à compressão do concreto, taxa de armadura

de flexão tracionada, dimensões e geometria do pilar, coeficiente de escala e a presença de armadura de cisalhamento. Assim, na fase de projeto, é possível adotar diretrizes para impedir a ruptura por punção, como: o uso de capitéis, o aumento da seção transversal do pilar, da espessura da laje, da taxa de armadura de flexão, ou da resistência do concreto, além da incorporação de armaduras de cisalhamento.

O uso de capitéis e o aumento da seção do pilar nesses casos, normalmente, culminam em incompatibilidades arquitetônicas. O aumento da espessura da laje, por outro lado, pode acarretar em aumento do peso próprio da estrutura, elevando as cargas nas fundações. O aumento da resistência do concreto e da taxa de armadura de flexão, por sua vez, podem ser opções pouco práticas e ineficientes. Assim, uma alternativa para elevar a resistência ao puncionamento seria o emprego de uma armadura de cisalhamento (PEREIRA FILHO, 2021).

Autores como Beutel e Hegger (2002), Muttoni e Ruiz (2010) e Ferreira (2010) corroboram com a inserção de armadura de cisalhamento, os mesmos concluíram em suas pesquisas que o uso de armaduras de cisalhamento é a solução técnica mais eficiente, capaz de melhorar na resistência à punção, tornando a ruptura menos frágil.

Diferentes autores, ao longo dos anos, desenvolveram métodos teóricos para calcular, de forma estimada, a resistência à punção. Dentre os quais, destaca-se Muttoni (2008), que desenvolveu a teoria da fissura crítica para o cálculo da resistência à punção em lajes sem armaduras de cisalhamento. De acordo com o autor, a resistência à punção diminui com o acréscimo da rotação da laje (ψ), a qual é função da carga aplicada e de sua resistência a flexão, podendo ser explicada pelo surgimento de uma fissura crítica de cisalhamento cortando a biela. Muttoni, fundamentou sua teoria nos trabalhos Kinnunen e Nylander (1960). Em 2009, Ruiz e complementaram o método acrescentando diretrizes para estimativa de lajes com armadura de cisalhamento.

Ruiz e Muttoni (2009), afirmam que uma laje plana de concreto armado com armadura de cisalhamento, pode culminar em três formas de ruptura por punção: o esmagamento do concreto próximo à face do pilar ($V_{R,máx}$), a presença de fissuras cortando a região das armaduras de cisalhamento ($V_{R,cs}$), e as fissuras fora da zona reforçada ($V_{R,out}$). Destaca-se ainda, que lajes lisas com armadura de cisalhamento,

cujas armaduras de flexão não possuem ancoragem, podem romper também por fissuras horizontais entre a armadura de flexão e a de cisalhamento.

No que diz respeito ao padrão de fissuração de lajes lisas, Pereira Filho (2016) afirma que fatores que influenciam bastante nesse parâmetro são sua geometria o tamanho de seu apoio e se as mesmas são unidirecionais ou bidirecionais. Mueller *et al.* (1984) *apud* Ribeiro Júnior (2022) apontam que a primeira fissura a surgir é ocasionada pelo momento radial, trata-se de uma fissura tangencial que contorna o pilar, em seguida aparecem as fissuras radiais, decorrentes do momento circunferencial. Finalmente, outras fissuras tangenciais aparecem, em diferentes níveis de carregamento próximos ao colapso. A (Figura 2.3), mostra o comportamento carga-deslocamento e o padrão de fissuração da laje P22 de Mueller para diferentes estágios de carregamento.

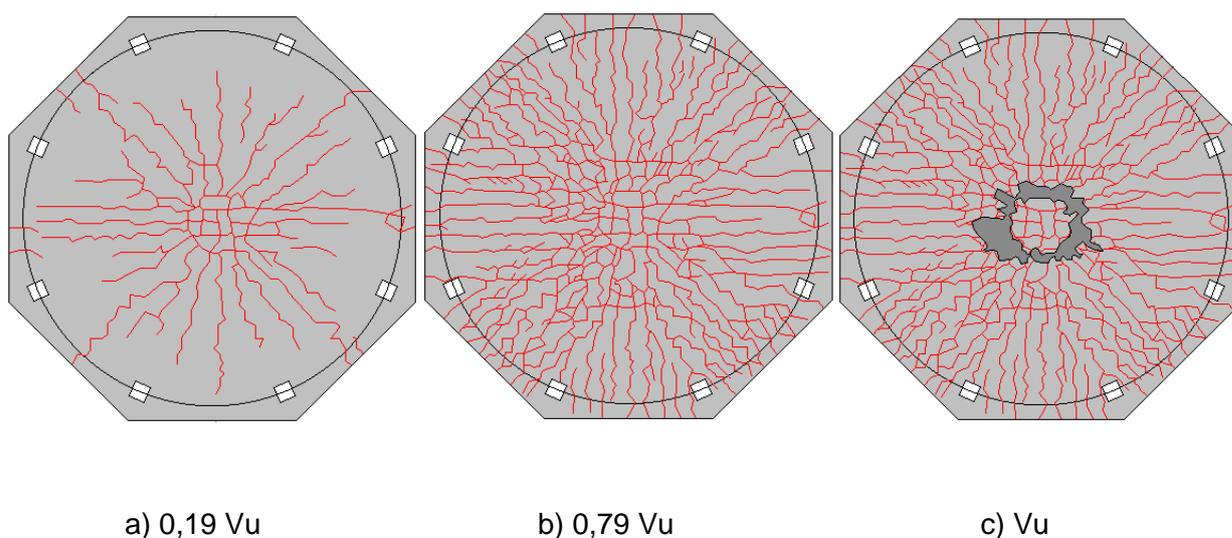


Figura 2.3 – Padrão de fissuração (MUELLER *et al.*, 1984).

2.2.1 Propriedades que exercem influência sobre a resistência à punção

2.2.1.1 Resistência à compressão do concreto

No passado, havia o entendimento de que em uma laje onde não há armadura de cisalhamento é a resistência à tração do concreto quem combate os esforços de cisalhamento. Um dos pioneiros na análise da influência do concreto na resistência à punção foi Graf (1993) *apud* Ferreira (2010), que constatou a existência de uma relação não linear entre o aumento da capacidade da ligação laje-pilar e o aumento

da resistência do concreto. Moe (1961) *apud* Ferreira (2010) concluiu que essa relação poderia ser expressa como uma função proporcional à raiz quadrada da resistência à compressão do concreto. Todavia, Marzouk e Hussein (1991) *apud* Ferreira (2010) concluíram que a raiz cúbica da resistência à compressão do concreto descreve melhor a influência à resistência à punção, quando analisaram lajes com concreto de alta resistência conforme ilustra a Figura 2.4.

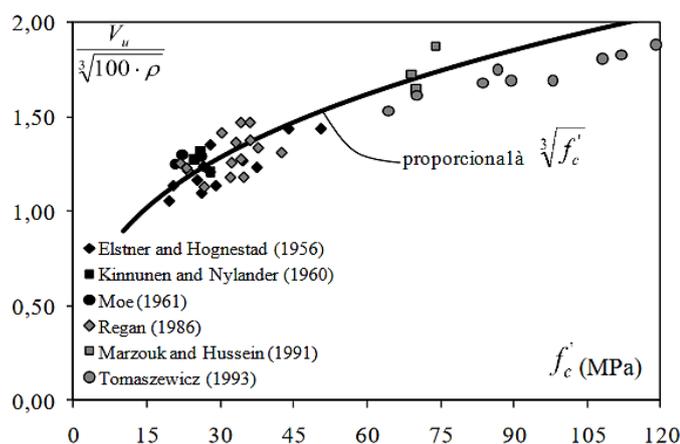


Figura 2.4 – Relação entre capacidade resistente à punção e a resistência à compressão do concreto (FERREIRA, 2010).

Kueres e Hegger (2018) e Kueres, Schmidt e Hegger (2019) afirmam que a parcela resistente do concreto íntegro está atrelada a vários mecanismos de cisalhamento atuantes no concreto, como: efeito de pino das armaduras na composição final da resistência à força cortante, engrenamento dos agregados, resistência ao cisalhamento do bloco de compressão contornando o pilar. Portanto, infere-se que a parcela de resistência do concreto é influenciada também pelo comportamento à flexão da laje.

2.2.1.2 Taxa de armadura de flexão tracionada

Como visto, a taxa de armadura de flexão tracionada exerce influência na resistência à punção, sobretudo nos casos de lajes sem armadura de cisalhamento. Pode-se definir a taxa de armadura de flexão tracionada (ρ) como sendo a razão entre a área de armadura de flexão tracionada (A_s) e a área de concreto, que é expressa pelo produto da altura útil da laje (d) por uma faixa a ser considerada.

Regan (1986) *apud* Ferreira (2010) entende que a faixa de laje a ser considerada deve ser correspondente à largura do pilar acrescida de $3d$ para cada um dos lados, visto que essa é a região em que a armadura de flexão contribui para a resistência à punção. Esse conceito fundamenta formulações normativas como a ABNT NBR 6118 (2023) e o *Eurocode 2* (2014).

Ainda de acordo com Regan, o aumento na taxa de armadura de flexão tem como consequência o aumento da zona comprimida, que reduz a fissuração na ligação laje-pilar. Dessa forma, aumentando-se a taxa de armadura de flexão é possível controlar melhor a abertura de fissuras, facilitando a transferência de esforços por meio do engrenamento dos agregados, além da possibilidade de aumentar a resistência à punção devido à contribuição do efeito pino.

2.5.1.3 Dimensões e geometria do pilar

As dimensões e a geometria do pilar são decisivas no modo em que as tensões se distribuem na ligação laje-pilar e, portanto, influenciam na resistência de uma laje. Em pilares alongados, onde a relação entre o maior lado e o menor lado é maior que 2, a ruína tende a ocorrer de forma mais abrupta, e o tamanho do cone de punção e a resistência da ligação são menores, quando comparados com pilares de seções quadradas, o que se deve às concentrações de tensões nos cantos. Já nos pilares circulares a resistência tende a ser em torno de 15% maior, comparada com pilares quadrados com área equivalente (MELGES, 2001).

2.5.1.4 Coeficiente de escala

A literatura técnica aponta que quando se aumenta a espessura da laje há uma tendência de se elevar a resistência da laje à punção, uma vez que a parcela de concreto para resistir aos esforços cortantes é aumentada. Todavia, o aumento na resistência não ocorre linearmente, devendo-se levar em consideração o coeficiente de escala.

A ABNT NBR 6118 (2023) e o *Eurocode 2* (2014) recomendam que o coeficiente de escala seja estimado por $1 + (\sqrt{200 / d})$. Ambas limitam a consideração do coeficiente de escala em valores não superiores a 2,0, reduzindo o incremento da estimativa da resistência à punção de lajes lisas com espessuras inferiores a 200 mm.

2.5.1.5 Armadura de cisalhamento

A melhor solução quando se deseja aumentar a resistência à punção de lajes lisas, normalmente, é por meio do uso de armaduras de cisalhamento, mas, para que a armadura de cisalhamento trabalhe bem, é fundamental garantir aderência entre o aço e o concreto, e assegurar também que os mecanismos de ancoragem dessas armaduras sejam eficazes. Ressalta-se ainda que a armadura de cisalhamento deve ser de fácil instalação, visto que na região da ligação laje-pilar é comum haver grande concentração de armadura de flexão.

A quantidade e o arranjo adotado para a distribuição das armaduras também influenciam na resistência à punção de lajes lisas, bem como em seus critérios de cálculo (FERREIRA *et al.*, 2016). Segundo Freitas (2018), atualmente, muitos tipos de armadura vêm sendo estudados a fim de encontrar soluções mais eficientes no combate à punção. Nesse contexto, as armaduras de cisalhamento podem possuir diversos formatos, desde as mais simples, até as mais inovadoras e diversos são os critérios para classificá-las.

Dentre as armaduras com ancoragem por dobras, destacam-se os estribos verticais, que podem ser fechados, abertos, em pente ou contínua, entre outros formatos, conforme estudado por Eom *et al.* (2018). Já as armaduras com ancoragem mecânica mais utilizadas são os *double headed studs* e os *stud rails* (ANDRA e MATTHAEI, 2000; REGAN e SAMADIAN, 2001). Pereira Filho (2016) faz um compilado de armaduras de punção, como mostram a Figura 2.5 e a Figura 2.6.

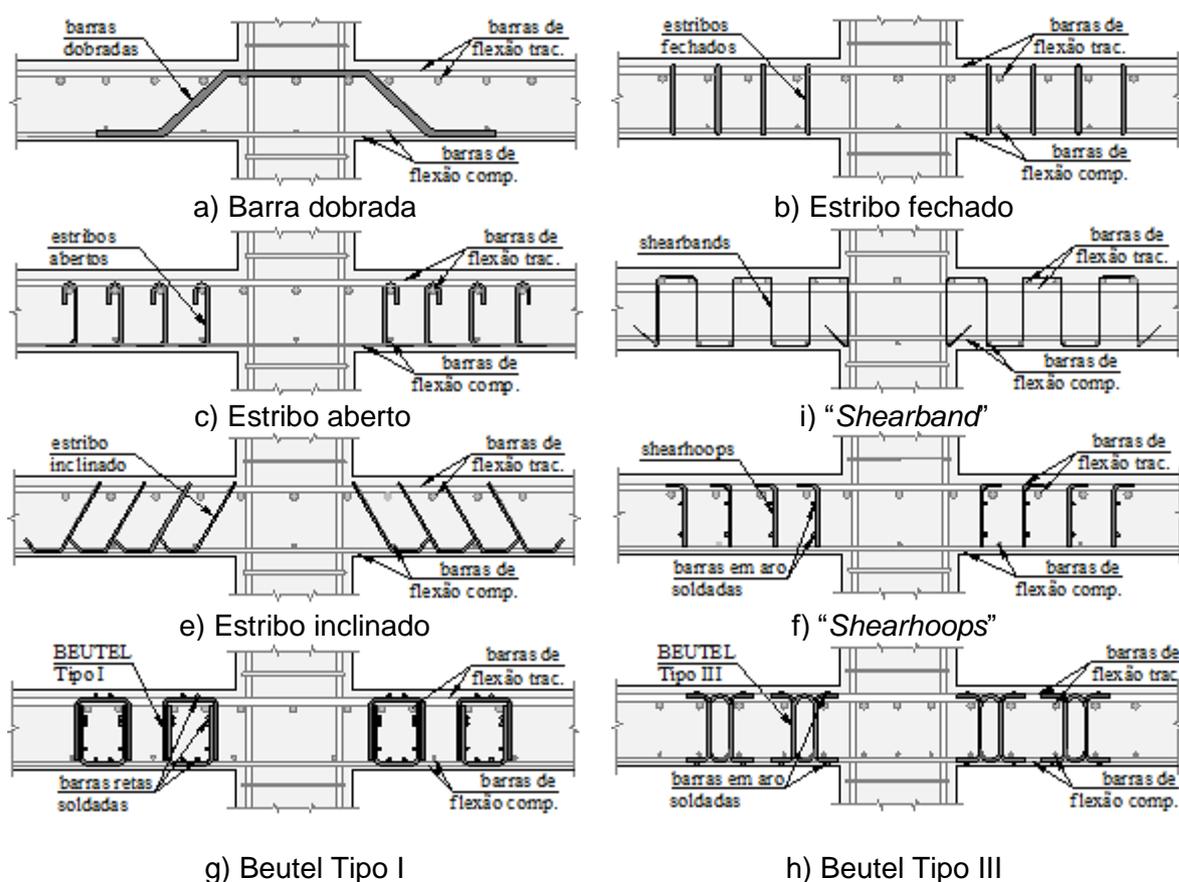


Figura 2.5 – Armaduras com ancoragem por dobras (PEREIRA FILHO, 2016).

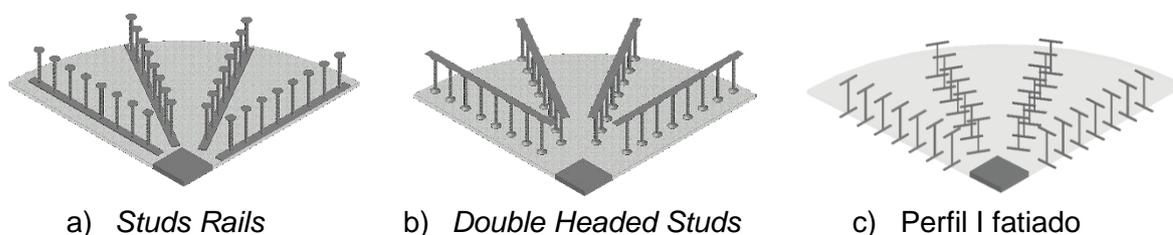


Figura 2.6 – Armaduras com ancoragem mecânica (FREITAS, 2018).

Dentre os formatos de armadura de cisalhamento existentes, optou-se por utilizar nesta pesquisa dois tipos de armadura, uma delas sendo armadura de ancoragem por dobras e a outra armadura de cisalhamento com ancoragem mecânica. Como representante do primeiro tipo, optou-se por estribos isolados compostos por barras verticais com ganchos nas extremidades, por ser um dos formatos que pouco interfere nas demais armaduras e facilitam muito a colocação.

Já no caso da armadura com ancoragem mecânica optou-se pelos *double headed studs* que, são os mais usuais, como observado por Andra e Matthaei (2000), e Regan e Samadian (2001), por conta de sua montagem mais simples, visto que

podem ser posicionados após a montagem das armaduras de flexão. De acordo com Carvalho (2008), as normas acerca da determinação da capacidade resistente de lajes lisas restringem-se a estribos e conectores, e não consideram possíveis variações nos tipos de armaduras de cisalhamento nem nas formas de ancoragem.

As prescrições normativas propõem predeterminações para área de aço mínima da armadura de cisalhamento agindo conjuntamente com o concreto, para garantir a ductilidade da ligação. O *fib Model Code 2010* (2013) e a ABNT NBR 6118 (2023) sugerem que numa ligação laje-pilar a área de aço de cisalhamento deve ser assegurada em, no mínimo, 3 camadas de armadura, e uma força igual ou maior que metade da força solicitante deve ser resistida apenas pela armadura de cisalhamento. Já o ACI 318 (2019) diz que a área de aço de armadura de cisalhamento mínima em uma região da face do pilar até uma distância de d da face do pilar deve equilibrar uma força maior ou igual à 50% da força resistida pelo concreto sem armadura de punção, quando utilizados *double headed studs* ou *stud rails* (PEREIRA FILHO, 2021).

Em relação à disposição dessas armaduras, de acordo com a recomendação da *Eurocode 2* (2014), o arranjo mais adequado seria o radial, no qual as armaduras de cisalhamento são distribuídas igualmente em torno da superfície de ruptura. Porém, por conta de questões construtivas, muitas vezes, se torna menos complexo concentrar as armaduras de cisalhamento em faixas ortogonais, tanto que o ACI 318 (2019) recomenda a utilização do arranjo em cruz. A Figura 2.7 ilustra os tipos de arranjos das armaduras de cisalhamento.

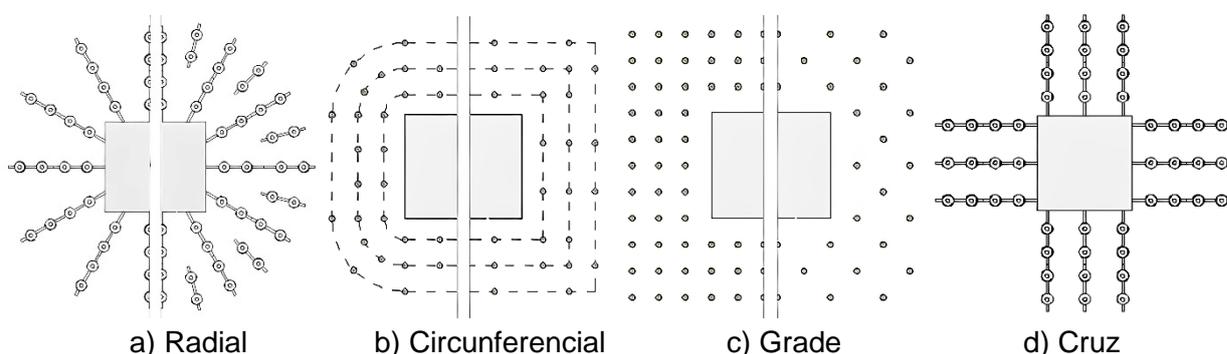


Figura 2.7 – Arranjos das armaduras de cisalhamento (PEREIRA FILHO, 2016).

2.2.2 Prescrições normativas para dimensionamento à punção de lajes lisas de concreto armado com armadura de cisalhamento

O *fib Model Code* 2010 (2013), bem como as normas ABNT NBR 6118 (2023), *Eurocode 2* (2014) e ACI 318 (2019) consideram que a resistência à punção de lajes lisas com armaduras de cisalhamento é estipulada pela soma da contribuição do aço e concreto. Estas normativas incentivam a checagem das possibilidades de ruptura dentro da região das armaduras de cisalhamento ($V_{R,cs}$), fora da região das armaduras de cisalhamento ($V_{R,out}$), e devido ao esmagamento da biela próxima ao pilar ($V_{R,máx}$).

As normativas adotam regras diferentes acerca do detalhamento, do espaçamento das armaduras e também dos arranjos da armadura de cisalhamento. Destaca-se que, apenas para fim de simplificar a compreensão das equações e ilustrações apresentadas nas normativas, neste trabalho realizou-se algumas padronizações de nomenclatura, para termos que representam grandezas semelhantes.

2.5.2.1 *fib Model Code* 2010 (2013)

O *fib Model Code* 2010 (2013) considera que a resistência à punção decresce conforme houver acréscimo da rotação da laje (ψ), que, por sua vez, é medida em função da carga aplicada e da resistência à flexão da laje. O código fundamenta sua recomendação acerca da resistência à punção na teoria da fissura crítica de cisalhamento de Muttoni e Schwartz (1991), Muttoni (2008) e Ruiz e Muttoni (2009). A Figura 2.8 ilustra o esquema de rotação da laje segundo *fib Model Code*.

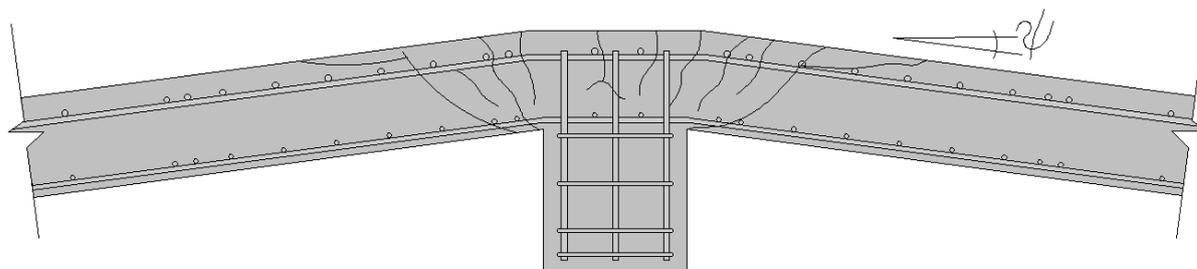


Figura 2.8 – Esquema de rotação da laje (*FIB MODEL CODE* 2010, 2013).

Deve-se realizar tentativas repetidas, até que se alcance uma solução na qual a carga resistente seja igual a carga solicitante ($V_R = V$). A resistência à punção dentro da região das armaduras de cisalhamento é calculada pela Equação 2.1:

$$V_R = V_{R,c} + V_{R,s} \geq V \quad (2.1)$$

Em que V é a carga solicitante de projeto, $V_{R,c}$ é a resistência ao cisalhamento de projeto atribuída ao concreto, $V_{R,s}$ é a resistência ao cisalhamento de projeto fornecida pela armadura de cisalhamento, e V_R é a resistência ao cisalhamento de projeto. A verificação da punção sem armadura de cisalhamento pelo *fib Model Code 2010 (2013)* é feita por meio da Equação 2.2.

$$V_{Rc,MC10} = k_{\psi} \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot u_1 \cdot d \quad (2.2)$$

Onde:

k_{ψ} é um parâmetro sujeito à rotação da laje e pode ser calculado a partir da Equação 2.3.

f_{ck} é a resistência característica do concreto, em MPa;

γ_c é o coeficiente de minoração da resistência a compressão do concreto;

u_1 é o perímetro crítico de controle e pode ser obtido conforme a Figura 2.9;

d é a altura útil da laje, em milímetros.

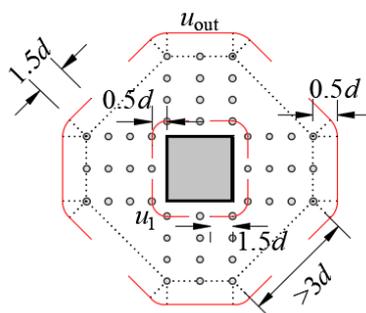


Figura 2.9 – Armaduras de cisalhamento em cruz (FIB MODEL CODE 2010, 2013).

$$k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 \cdot k_{dg} \cdot \psi \cdot d} \leq 0,6 \quad (2.3)$$

Onde:

k_{dg} fator que leva em consideração a rugosidade da superfície da fissura;

ψ rotação da laje.

Na teoria da fissura crítica o modo de ruptura ocorre em decorrência da abertura de uma fissura crítica que corta a biela transmitindo a força cortante para o pilar. A transmissão desses esforços cisalhantes está diretamente relacionada com a rugosidade da superfície da fissura e essa particularidade é levada em consideração no *fib Model Code* 2010 (2013) a partir do fator k_{dg} , apresentado na Equação 2.4. De acordo com Muttoni e Schwartz (1991) a espessura dessa fissura que se forma é proporcional ao produto $\psi \cdot d$.

O *fib Model Code* 2010 (2013) apresenta ainda quatro níveis de aproximação para estimar a rotação da laje. O nível I é recomendado para pré-dimensionamento, e pode ser calculado conforme a Equação 2.5. O nível II, por sua vez, é indicado para dimensionamento de novas estruturas, encontrado por meio da Equação 2.6. Já o nível III é preconizado para as verificações especiais em estruturas existentes, diminuindo a constante para prever a rotação com mais exatidão, Equação 2.7. O nível IV, é empregado somente em casos de verificações especiais em que se conhecem, com detalhes, as características dos materiais e detalhamento das armaduras, obtendo-se assim a rotação da laje a partir de modelos computacionais não lineares.

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75 \quad (2.4)$$

$$\psi_I = 1,5 \cdot \frac{r_q}{d} \cdot \frac{f_{yw}}{E_{sw}} \quad (2.5)$$

$$\psi_{II} = 1,5 \cdot \frac{r_q}{d} \cdot \frac{f_{yw}}{E_{sw}} \cdot \left(\frac{m_s}{m_R} \right)^{1,5} \quad (2.6)$$

$$\psi_{III} = 1,2 \cdot \frac{r_q}{d} \cdot \frac{f_{yw}}{E_{sw}} \cdot \left(\frac{m_s}{m_R} \right)^{1,5} \quad (2.7)$$

Onde:

d_g é o diâmetro máximo do agregado, em mm;

r_q é o raio de carregamento das lajes;

m_s é o momento solicitante da laje, sugerido pelo *fib Model Code 2010* como $m_s = \frac{V}{8}$

m_R é o momento resistente da laje, obtido através de

$$m_R = \rho \cdot f_{ys} \cdot d^2 \cdot (1 - 0,5 \cdot \rho \cdot f_{ys} / f_c)$$

No que diz respeito à verificação de lajes armadas à punção com a superfície de ruptura cruzando as armaduras de cisalhamento ($V_{R,cs}$) o *fib Model Code 2010* (2013) considera que a parcela resistente do concreto deve ser somada à força resistida pelas armaduras posicionadas em uma região afastadas entre $0,35 \cdot d$ e d da face do pilar, conforme mostra a Equação 2.8.

Quanto à determinação das tensões nas armaduras, utiliza-se um procedimento semelhante ao método simplificado de Ruiz e Muttoni (2009), Equação 2.9. Já para a verificação da ruptura na região externa às armaduras de cisalhamento ($V_{R,out}$) o *fib Model Code 2010* (2013) utiliza a Equação 2.10, essa resistência é considerada em um plano de corte definido a partir da distância entre o centroide da armadura de flexão e a base da armadura de cisalhamento (d_{out}) e o perímetro de

controle externo é definido a uma distância de $0,5 \cdot d$ com distância máxima circunferencial entre as armaduras de $3 \cdot d$, como mostra a Figura 2.9.

Finalmente, a resistência máxima à punção é limitada pelo esmagamento da biela comprimida ($V_{R,máx}$), estimada pelo *fib Model Code 2010* (2013) por meio da Equação 2.11. Seu critério de ruptura trata-se uma multiplicação do $V_{R,c}$ por um fator (k_{sys}) que considera o desempenho da armadura de cisalhamento utilizada, com valores de 2,8 para *studs*; 2,4 para estribos ancorados; e 2,0 para armaduras nas quais o rendimento é desconhecido ou lajes sem armadura de cisalhamento.

$$V_{R,cs,MC10} = k_{\psi} \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d + A_{sw} \cdot n_s \cdot \sigma_{sw} \cdot \text{sen} \alpha \quad (2.8)$$

$$\sigma_{sw} = \frac{E_{sw} \cdot \psi}{6} \cdot (\text{sen} \alpha + \cos \alpha) \cdot \left(\text{sen} \alpha + \frac{f_b}{f_{yw}} \cdot \frac{d}{\phi_w} \right) \leq f_{yw} \quad (2.9)$$

$$V_{R,out} = k_{\psi} \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{out} \cdot d_{out} \quad (2.10)$$

$$V_{R,máx,MC10} = k_{sys} \cdot k_{\psi} \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \leq \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \quad (2.11)$$

Onde:

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

n_s é o número de camadas de armadura de cisalhamento dentro da região colaborante pelo MC10;

α é o ângulo de inclinação entre o plano horizontal da laje e o plano da camada de armadura de cisalhamento;

β é o ângulo de inclinação das barras de cisalhamento em relação ao plano horizontal da laje ao longo da camada da armadura;

σ_{sw} é a tensão atuante na armadura de cisalhamento;

E_{sw} é o módulo de elasticidade do aço da armadura de cisalhamento;

f_b é a tensão de aderência na armadura de cisalhamento, obtido por

$$f_b = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{25}}$$

$$\text{Com } \eta_1 = \begin{cases} 1,75 \rightarrow \text{barras de alta aderência} \\ 1,40 \rightarrow \text{barras aderidas com resina epoxy} \\ 0,90 \rightarrow \text{barras lisas} \end{cases}$$

$$\text{e com } \eta_2 = \begin{cases} 1,20 \rightarrow f_{yw} = 400\text{MPa} \\ 1,00 \rightarrow f_{yw} = 500\text{MPa} \\ 0,85 \rightarrow f_{yw} = 600\text{MPa} \\ 0,75 \rightarrow f_{yw} = 700\text{MPa} \\ 0,68 \rightarrow f_{yw} = 800\text{MPa} \end{cases}$$

\varnothing_w é o diâmetro da armadura de cisalhamento;

d_{out} é a altura útil menos o cobrimento;

k_{sys} é um fator que leva em consideração o desempenho da armadura de

$$\text{cisalhamento, determinado por } k_{sys} = \begin{cases} 2,8 \rightarrow \text{conectores de aço} \\ 2,4 \rightarrow \text{estribos} \\ 2,0 \rightarrow \text{outros} \end{cases}$$

2.5.2.1 ABNT NBR 6118 (2023)

Para critérios de dimensionamento a norma brasileira propõe que para o cálculo da resistência à punção de lajes lisas com armadura de cisalhamento seja realizada a verificação dos mesmos três modos de ruptura. Para o cálculo do $V_{R,cs}$ utiliza-se a Equação 2.12, sendo o $f_{yw,ef}$ limitado em 345 MPa para conectores e 287,5 MPa para estribos, variando de acordo com a espessura da laje. O cálculo do $V_{R,out}$ é feito de acordo com a Equação 2.13, com o perímetro de controle afastado em $2d$ da região da armadura de cisalhamento, como ilustra a Figura 2.10. Na verificação do $V_{R,máx}$, o cálculo é feito por analogia ao esmagamento de bielas em vigas de acordo com a Equação 2.14. A ABNT NBR (2023) comenta que a estimativa de resistência da biela pode ser aumentada em 20% para lajes com carregamento concêntrico.

$$V_{R,cs,NBR} = 0,77 \cdot V_{Rc,NBR} + \left(1,5 \cdot \left(\frac{s_r}{d} \right) \right) \cdot A_{sw,tot} \cdot f_{yw,ef} \cdot \text{sen}\alpha \quad (2.12)$$

$$V_{R,out,NBR} = 0,182 \cdot k_e \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \cdot u_{out} \cdot d \sqrt{2} \quad (2.13)$$

$$V_{R,máx,NBR} = 0,54 \cdot f_c \cdot v \cdot u_0 \cdot d \quad (2.14)$$

Onde:

k_e é um parâmetro que considera o efeito de escala, obtido através de

$$k_e = 1 + \left(\frac{\sqrt{200}}{d} \right) \leq 2, \text{ com } d \text{ em mm;}$$

ρ é a média geométrica da taxa de armadura de flexão nas duas direções calculada por $\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \leq 0,02$ 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 $3d$ para cada lado;

f_c é a resistência à compressão do concreto;

α é o ângulo de inclinação entre o plano horizontal da laje e o plano da camada de armadura de cisalhamento;

β é o ângulo de inclinação das barras de cisalhamento em relação ao plano horizontal da laje ao longo da camada da armadura;

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

$f_{yw,ef}$ é a tensão de escoamento efetiva na armadura de cisalhamento, a qual é determinada pela interpolação linear. A interpolação linear pode ser calculada através das equações:

$$f_{yw,ef} = \left\{ \begin{array}{l} f_{yw} \leq 345 \text{ MPa} \rightarrow h \leq 150 \text{ mm} \\ f_{yw} \leq 228,75 + 0,775 \cdot h \leq 500 \text{ MPa} \rightarrow h \geq 150 \text{ mm} \end{array} \right\} \rightarrow \text{conec.aço}$$

$$f_{yw,ef} = \left\{ \begin{array}{l} f_{yw} \leq 287,5 \text{ MPa} \rightarrow h \leq 150 \text{ mm} \\ f_{yw} \leq 128,125 + 1,063 \cdot h \leq 500 \text{ MPa} \rightarrow h \geq 150 \text{ mm} \end{array} \right\} \rightarrow \text{estribos}$$

com $f_{yw,ef}$ em MPa e o valor de d em mm;

u_{out} é o perímetro de controle afastado a $2d$ da região da armadura de cisalhamento;

V é o fator de redução da eficiência da resistência à compressão do concreto da biela, devido a localização em zonas de tensões de tração diagonal. Dado por

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

s_r espaçamento radial entre linhas de armadura de punção, não maior que $0,75d$;

u_0 é o perímetro crítico do pilar, referente à primeira superfície crítica, o contorno C.

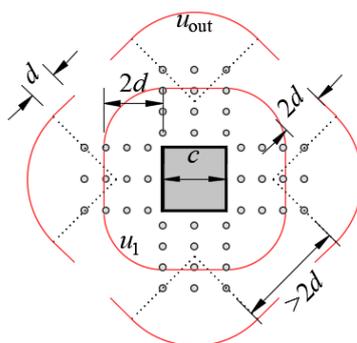


Figura 2.10 – Perímetro de controle (ABNT NBR 6118, 2023).

2.5.2.2 EUROCODE 2 (2014)

As normas *Eurocode 2* (2004) e ANBT NBR 6118 (2023) possuem modelos de cálculo muito parecidos, entretanto, alguns aspectos as tornam diferentes, a saber: o coeficiente de segurança γ_c adotado na norma brasileira é de 1,4 enquanto que para o EC2 o valor para esse parâmetro é 1,5.

As recomendações do *Eurocode 2*, acerca do dimensionamento de lajes lisas estão distribuídas em três documentos, a saber: CEN EN 1992-1-1 (2004), CEN EN 1992-1-1/AC (2010) e BSI BS EN 1992-1-1:2004/A1 (2014). Para lajes com armadura de cisalhamento o *Eurocode 2* aconselha a verificação de três possíveis modos de ruptura, sendo eles: $V_{R,cs}$ que considera 75% da resistência à punção em lajes sem armadura de cisalhamento somado à força resultante do aço dentro da área de influência do perímetro de controle, ver Figura 2.11 que contribuem na resistência à punção, calculado pela Equação 2.15; $V_{R,out}$, expresso pela Equação 2.16; e $V_{R,máx}$ calculado pela Equação 2.17.

$$V_{R,cs,EC2} = 0,75 \cdot V_{Rc,EC2} + 1,5 \cdot \left(\frac{s_r}{d} \right) \cdot A_{swtot} \cdot f_{yw,ef} \cdot \text{sen}\alpha \cdot \text{sen}\beta \leq 1,5 \cdot V_{Rc,EC2} \quad (2.15)$$

$$V_{R,out,EC2} = 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \cdot u_{out} \cdot d \quad (2.16)$$

$$V_{R,máx,EC2} = 0,4 \cdot f_c \cdot v \cdot u_0 \cdot d \quad (2.17)$$

Onde:

k é um parâmetro que considera o efeito de escala, obtido através de $k = 1 + \frac{\sqrt{200}}{d} \leq 2$

com d em mm;

ρ é a média geométrica da taxa de armadura de flexão nas duas direções calculada por $\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \leq 0,02$ 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;

α é o ângulo de inclinação entre o plano horizontal da laje e o plano da camada de armadura de cisalhamento;

β é o ângulo de inclinação das barras de cisalhamento em relação ao plano horizontal da laje ao longo da camada da armadura;

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

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

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

V é o fator de redução da eficiência da resistência à compressão do concreto da biela, devido a localização em zonas de tensões de tração diagonal. Dado por

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

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

u_0 é o perímetro do pilar.

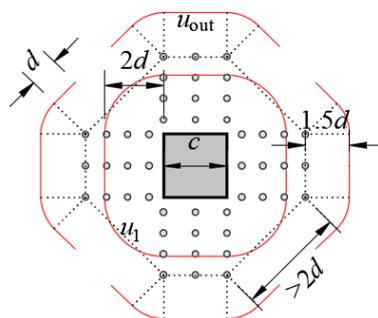


Figura 2.11 – Perímetro de controle Eurocode 2 (EUROCODE 2, 2014 adaptado por PEREIRA FILHO, 2016).

2.5.2.3 ACI 318 (2019)

As Equações (2.18), (2.19), (2.20) e (2.21) 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.

$$V_{R,cs,ACI} = \left(\frac{s_r}{d} \right) \cdot A_{swtot} \cdot f_{yw} \cdot \text{sen}\alpha \cdot \text{sen}\beta + \left\{ 0,17 \cdot k \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \right\} \rightarrow \text{estribos} \quad (2.18)$$

$$V_{R,cs,ACI} = \frac{s_r}{d} \cdot A_{swtot} \cdot f_{yw} \cdot \text{sen}\alpha \cdot \text{sen}\beta + \left\{ \begin{array}{l} 0,25 \cdot k \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \\ 0,17 \cdot k \cdot \left(1 + \frac{2}{\left(\frac{a}{b} \right)} \right) \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \\ 0,083 \cdot k \cdot \left(\frac{40 \cdot d}{u_1} + 2 \right) \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \end{array} \right\} \rightarrow \text{min.stud} \quad (2.19)$$

$$V_{R,out,ACI} = 0,17 \cdot k \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{out} \cdot d \quad (2.20)$$

$$V_{R,máx,ACI} = \begin{cases} 0,5 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \rightarrow \text{estribos} \\ 0,66 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \rightarrow \text{studs} \end{cases} \quad (2.21)$$

Onde:

$A_{s_{w_{tot}}}$ é a área de aço total da armadura de cisalhamento na seção transversal de um perímetro de armaduras;

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

u_{out} é o perímetro de controle afastado a $\frac{d}{2}$ da região da armadura de cisalhamento, como mostra a Figura 2.12 – Perímetro de controle ACI 318 (ACI 318, 2019).

u_1 é o perímetro de controle em mm, quando o pilar for circular deve ser usar um pilar quadrado de área equivalente;

α é o ângulo de inclinação entre o plano horizontal da laje e o plano da camada de armadura de cisalhamento;

β é o ângulo de inclinação das barras de cisalhamento em relação ao plano horizontal da laje ao longo da camada da armadura;

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

d é a altura útil da laje em mm;

a é a maior dimensão do pilar;

b é a menor dimensão do pilar;

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

k é um parâmetro que considera o efeito de escala, obtido através de

$$k = \sqrt{\frac{2}{1 + 0,004 \cdot d}} \leq 1, \text{ com } d \text{ em mm.}$$

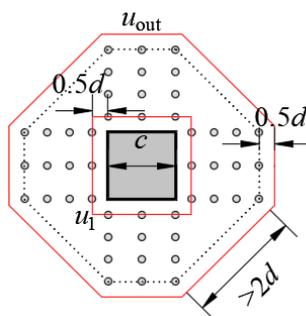


Figura 2.12 – Perímetro de controle ACI 318 (ACI 318, 2019).

2.2.3 Determinação da resistência à flexão das lajes

Para as lajes ensaiadas nesta pesquisa foi utilizada a Teoria de linhas de ruptura para determinar sua resistência à flexão. Essa metodologia já foi adotada por diversos pesquisadores como Regan (2000), Ferreira (2010), Lima Neto (2012), Pereira Filho (2016) e Freitas (2018), os quais obtiveram resultados satisfatórios. O momento fletor último, é dado pela Equação 2.22:

$$M_r = \rho \cdot f_y \cdot d^2 \cdot \left(1 - \frac{\rho \cdot f_y}{2 \cdot f_c}\right) \quad (2.22)$$

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.

O carregamento será aplicado de forma simétrica em todos os bordos das lajes, idealizando uma laje armada em duas direções. Os eixos de rotação nos pilares não formam um quadrado, isso se justifica pela aproximação equivalente do pilar a um octógono, uma vez que, a partir dele, se traça uma distribuição das possíveis linhas de ruptura desse elemento, pois o carregamento foi aplicado em 8 pontos espaçados igualmente (Figura 2.13).

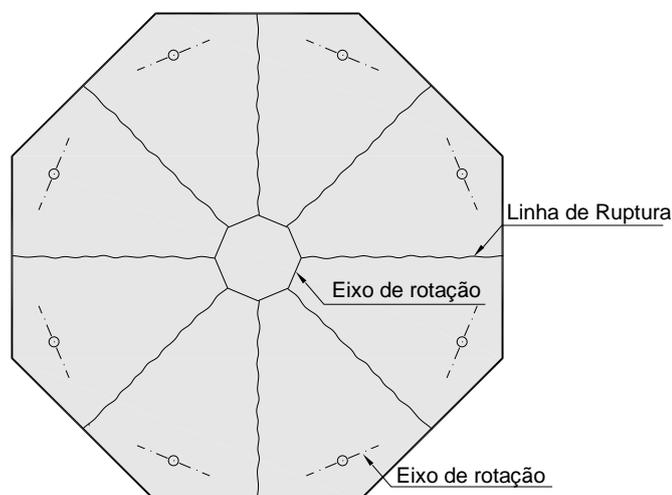


Figura 2.13 – Linhas de ruptura para esta dissertação.

Correlacionando a deflexão das lajes desta pesquisa com as linhas de ruptura adotadas, é possível chegar à Equação 2.23, por meio da qual é possível determinar a carga de ruptura das lajes V_{flex} .

$$V_{flex} = 9,76m_r \quad (2.23)$$

Onde:

m_r é o momento resistente da laje.

2.3 Pesquisas sobre lajes lisas com ARCO

Durante o levantamento de pesquisas relacionadas a esta verificou-se que todos os trabalhos encontrados na literatura sobre lajes lisas de concreto armado com inserção de agregado graúdo reciclado de concreto apresentam altura mínima inferior ao que preconizam as normas ABNT NBR 6118 (2023), *Eurocode 2* (2014) e ACI 318 (2019). Além disso, após uma ampla busca por trabalhos semelhantes, foi encontrada apenas uma pesquisa que trata de espécimes com as características anteriormente citadas e com armadura de cisalhamento, a saber: o trabalho de Luo, Zong e Du (2014). As demais pesquisas apresentadas não contêm armadura de cisalhamento.

2.3.1 RAO, REDDY E GHORPADE (2012)

Nessa pesquisa, Rao, Reddy e Ghorpade avaliaram o comportamento de lajes lisas de concreto armado, sem armadura de cisalhamento, simplesmente apoiadas, com substituição total e parcial de agregados naturais por reciclados de concreto. As lajes ensaiadas possuíam dimensões de 1.100 x 1.100 x 50 mm e diferentes taxas de ARCO, a saber: 0, 20, 40, 60, 80 e 100%. Os espécimes foram submetidos a um carregamento central aplicado em uma placa metálica de 100 x 100 x 20 mm com o objetivo de simular um pilar. Durante o programa experimental avaliou-se: modo de fissuração, cargas últimas, curvas de carga-deslocamento, rigidez e energia de absorção. A Tabela 2.3 mostra um resumo dos resultados obtidos pelos autores.

Tabela 2.3 – Resumo dos resultados experimentais de Rao, Reddy e Ghorpade (2012).

Laje	NCAC-S	RCAC-20-S	RCAC-40-S	RCAC-60-S	RCAC-80-S	RCAC-100-S
%RCA	0	20	40	60	80	100
f_c (MPa)	43.33	42.52	40.96	38.37	35.48	33.48
f_{ct} (MPa)	3.35	3.25	3.16	3.11	2.88	2.78
P_{cr} (kN)	14.6	14.2	14.2	13.4	12.8	12.2
δ_{cr} (mm)	1.51	1.46	1.42	1.28	1.14	1.06
δ_F (mm)	33.23	32.15	30.19	29.22	28.49	28.11
K_i (kN/mm)	12.20	12.20	12.20	12.20	12.00	12.00
K_u (kN/mm)	1.77	1.74	1.71	1.66	1.62	1.58
K_i / K_u	0.145	0.142	0.140	0.136	0.135	0.132

Fonte: Adaptado de Rao, Reddy e Ghorpade (2012).

Onde:

f_c é a resistência à compressão do concreto;

f_{ct} é a resistência à tração por compressão diametral;

P_{cr} é a carga da primeira fissura;

δ_{cr} é o deslocamento da primeira fissura;

δ_F é o deslocamento final;

K_i é a rigidez inicial;

K_u é a rigidez final;

K_i / K_u é a degradação da rigidez.

De acordo com os dados obtidos, os autores observaram que a inserção de ARCO proporcionou uma diminuição da degradação da rigidez (razão entre a rigidez final e a rigidez inicial) indicando que quanto maior a degradação da rigidez menor é a ductilidade da laje. Concluiu-se ainda que o aumento da quantidade de ARCO no concreto, em substituição ao agregado natural, promove a redução da resistência à compressão e tração do concreto, bem como sua carga última e carga de fissuração, de forma que a redução é considerada admissível para um limite de até 40% de substituição. Entretanto, no que se refere ao padrão de falha por punção, todas as

lajes se comportaram de maneira semelhante quaisquer fossem as porcentagens de substituição de ARCO.

2.3.2 LUO, ZONG e DU (2014)

Luo, Zong e Du (2014), realizaram um estudo detalhado sobre o modo e o mecanismo de ruptura de lajes bidirecionais de concreto reciclado com armadura de cisalhamento. Para realizar sua análise os autores utilizaram o software de elementos finitos não lineares ABAQUS. Para a simulação foram consideradas 7 lajes com dimensões de 1.600 x 1.600 x 150 mm, sendo uma dessas lajes a de referência (sem agregado reciclado e sem armadura de cisalhamento), uma com agregado reciclado sem armadura de cisalhamento, e as outras 5 lajes com agregado reciclado e armadura de cisalhamento.

Os autores constataram que a capacidade de resistência à punção de lajes com agregado de concreto reciclado é menor do que a de lajes com concreto convencional, e sua ruptura é mais frágil. A capacidade de carga de cisalhamento das lajes de concreto reciclado com conectores de aço contribuiu bastante para o aumento da ductilidade da estrutura. Constatou-se ainda que quanto mais próxima for a distância entre os conectores, maior será a resistência à punção da ligação laje pilar.

2.3.3 REIS *et al.* (2015)

O trabalho de Reis *et al.* (2015) buscou entender o efeito da inserção de agregado graúdo reciclado de concreto no comportamento à punção de 8 lajes de concreto armado, sem armadura de cisalhamento, por meio de investigações experimentais, numéricas e analíticas. O concreto utilizado para a produção das lajes foi especificado para apresentar uma resistência de compressão mínima de 30 MPa, aos 28 dias. As dimensões das lajes foram de 1.100 x 1.100 x 90 mm com uma placa de 150 x 150 x 30 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 padrão circular. A Figura 2.14 mostra o modelo de lajes de Reis *et al.*

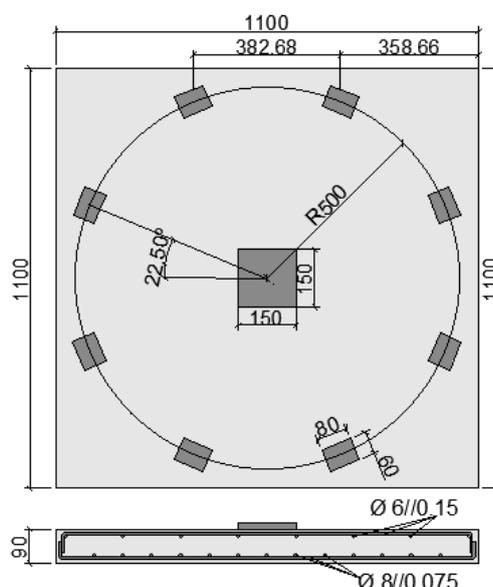


Figura 2.14 – Laje de Reis *et al.* (REIS *et al.*, 2015).

A principal variável desse estudo foi a taxa de substituição de agregado natural por reciclado de concreto, foram utilizadas 4 taxas diferentes, a saber: 0%, 20%, 50% e 100%, considerando duas lajes por taxa de substituição. Para avaliar as propriedades do concreto no estado fresco foram realizados ensaios para determinar o abatimento de tronco de cone e a densidade aparente. Já no estado endurecido analisou-se o concreto usado para moldar as lajes, aos 28 dias, por meio dos seguintes ensaios: resistência a compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, conforme mostra a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Resumo dos resultados experimentais de Reis *et al.* (2015)

Laje	Teor de substituição (%)	Resistência à compressão		Resistência à tração por compressão diametral		Módulo de elasticidade	
		f_c	Δ_{RC}	f_{ct}	Δ_{RC}	E	Δ_{RC}
		(MPa)	(%)	(MPa)	(%)	(GPa)	(%)
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	32,7 + 0,7	-3,1
C50-2	50	46,6 + 1,0	-0,5	2,94 + 0,21	-7	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

Fonte: Reis *et al.* (2015).

Onde:

f_c é a resistência à compressão do concreto;

f_{ct} é a resistência à tração por compressão diametral;

E é o módulo de elasticidade;

Δ_{RC} representa a redução das propriedades mecânicas do concreto reciclado quando comparadas ao concreto de referência.

De acordo com os autores, a densidade do concreto com ARCO sofreu redução se comparado ao concreto sem agregado reciclado, o que pode ser justificado pela menor densidade do ARCO em relação ao agregado natural. Observou-se ainda a redução das propriedades mecânicas do concreto reciclado em relação ao concreto de referência. Ao analisar as curvas de carga-deslocamento, medidas através de transdutores, constataram uma redução na rigidez geral das lajes, que foi mais significativa no estado não-fissurado.

Reis *et al.* (2015) perceberam ainda que a rigidez do estado não fissurado parece não ter sido afetada pela incorporação de ARCO, o que pode ter ocorrido em razão da presença das armaduras, uma vez que a contribuição para rigidez das lajes é mais importante nesse estado, reduzindo, dessa forma, a influência do concreto na rigidez total. A carga de fissuração, por sua vez, exibiu uma tendência decrescente para concretos com ARCO. As lajes C20 e C50 apresentaram redução em torno de 3% e as lajes C100 uma redução de 21% em relação à carga de fissuração.

Acerca da resistência à punção os autores obtiveram que a incorporação de ARCO não influenciou de forma significativa o comportamento das lajes, a variação máxima foi de 4,8% para a laje C20. Para justificar o fato de a laje C100 apresentar redução de somente 2%, os autores mencionam a incerteza experimental.

Ainda segundo Reis *et al.* (2015), há dois motivos prováveis, que poderiam explicar a ligeira influência de incorporação de ARCO na resistência à punção das lajes, são elas: a menor resistência mecânica do ARCO e a melhor ligação entre a pasta de cimento e o ARCO devido ao teor mais elevado de cimento, maior porosidade e rugosidade, quando comparado com o agregado natural. Assim, entende-se que a resistência à punção sofreu influência dessas propriedades dos agregados, ao longo do plano de cisalhamento das fissuras, e que os dois efeitos se compensaram, o que

possibilitou a ocorrência de um resultado semelhante no que diz respeito à resistência à punção.

Quanto ao estudo analítico realizado pelos autores, o mesmo objetivou analisar a precisão relativa das formulações presentes nas normativas internacionais *Eurocode 2* (2004), *ACI 318* (2011) e o *fib Model Code 2010* (2013), a fim de prever a carga de punção em lajes de concreto armado. Sendo que o o *fib Model Code 2010* (2013) foi quem apresentou as previsões mais precisas.

2.3.4 FRANCESCONI, PANI E STOCHINO (2016)

Nesse trabalho os autores realizaram uma avaliação experimental do comportamento à punção de lajes de concreto armado, sem armadura de cisalhamento, confeccionadas a partir de agregados miúdo e graúdo reciclados de concreto. O programa experimental contou com 15 lajes com dimensões de 1.100 x 1.100 x 50 mm e 5 taxas de substituição: 0, 30, 50, 80 e 100%. Cada laje teve como apoio vigas de aço nas quatro bordas. A carga foi aplicada no centro de cada modelo por meio de uma placa de aço de 200 x 200 x 5 mm, de forma a simular um pilar (Figura 2.15).

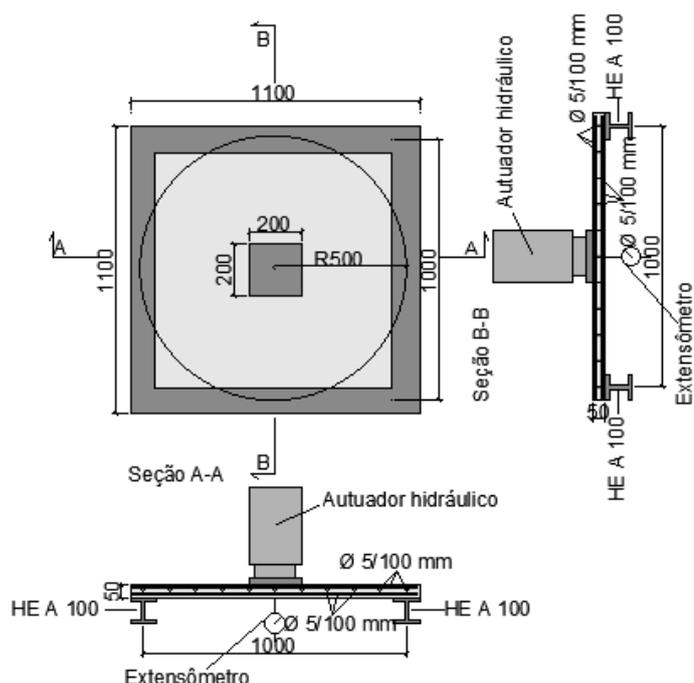


Figura 2.15 – Laje e sistema de ensaio de Francesconi, Pani e Stochino (FRANCESCONI, PANI E STOCHINO, 2016).

No trabalho, os autores tiveram como foco principal as análises das lajes submetidas à punção, a partir dos padrões de ruptura, cargas finais e curvas de carga deflexão. Além disso, realizaram comparações e análises das normas internacionais ACI 318 (2011), *Eurocode 2* (2004) e *fib Model Code 2010* (2013). Os resultados estão resumidos na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Resultados experimentais e teóricos Francesconi, Pani e Stochino (2016).

Laje	Teor ARCO (%)	V_u		V_{ACI}		V_{EC2}		V_{MC10}						
		Ensaio	Médio	$\lambda = 1$	$\lambda = 0,85$	$k = 3,39$	$k = 2$	Nível	I		II		III	
								k_{dg}	1,14	2	1,14	2	1,14	2
								dg	12	0	12	0	12	0
NC0-1	0	72,5	68,7	78,9	67,1	89,4	52,94	83	59,18	90,06	65,6	96,27	71,49	
NC0-2		68,7												
NC0-3		64,9												
RC1-1	30	64,9	69,97	74,6	63,4	86,47	51,01	78,5	56	85,18	62,05	90,41	66,99	
RC1-2		72,5												
RC1-3		72,5												
RC2-1	50	64,9	66,17	73,7	62,6	85,74	50,58	77,5	55,27	84,1	61,26	89,26	66,14	
RC2-2		68,7												
RC2-3		64,9												
RC3-1	80	68,7	68,7	70,2	59,7	83,02	48,98	73,85	52,67	80,14	51,38	85,06	63,04	
RC3-2		64,9												
RC3-3		72,5												
RC4-1	100	68,7	69,97	66,7	56,7	80,23	47,33	70,15	50,03	76,12	55,45	80,8	59,87	
RC4-2		68,7												
RC4-3		72,5												

Fonte: Adaptado de Francesconi, Pani e Stochino (2016).

Onde:

V_u é a carga de ruptura experimental da laje;

V_{ACI} é a carga de ruptura estimada pelo ACI;

V_{EC2} é a carga de ruptura estimada pelo *Eurocode 2*;

V_{MC10} é a carga de ruptura estimada pelo *fib Model Code*;

k é um parâmetro que considera o efeito de escala;

λ é um parâmetro que considera a densidade do agregado;

k_{dg} é um fator que leva em consideração a rugosidade da superfície da fissura;
 d_g é o diâmetro máximo do agregado, em mm.

De acordo com os resultados obtidos, Francesconi, Pani e Stochino constataram que, com a substituição do agregado natural pelo reciclado, houve uma redução nas resistências à compressão e à tração e no módulo de elasticidade do concreto. Em paralelo a essa descoberta, identificou-se que o comportamento das lajes à punção não foi impactado pela presença dos agregados reciclados, visto que a redução da resistência observada nos 29 corpos de prova do concreto não refletiu diretamente na redução das cargas últimas das lajes com ARCO. Quando comparados com os resultados experimentais, constatou-se que os modelos teóricos das normas internacionais avaliados pelos autores apresentaram bom desempenho na análise de lajes com ARCO.

2.3.5 MAHMOUD *et al.* (2018)

A pesquisa de Mahmoud *et al.* investigou o comportamento à punção de 8 lajes de concreto armado, sem armadura de cisalhamento, com quatro teores de substituição de agregados naturais por agregados reciclados, a saber: 0, 30, 60 e 100%. As lajes possuíam dimensões de 1.200 x 1.200 x 100 mm, armadas nas duas direções com barras de 10 mm de diâmetro e cobrimento de 20 mm (Figura 2.16). O sistema de ensaio (Figura 2.17) empregado foi realizado com carregamento centrado em placas nas quatro bordas. Os resultados obtidos pelos autores estão resumidos na Tabela 2.6.

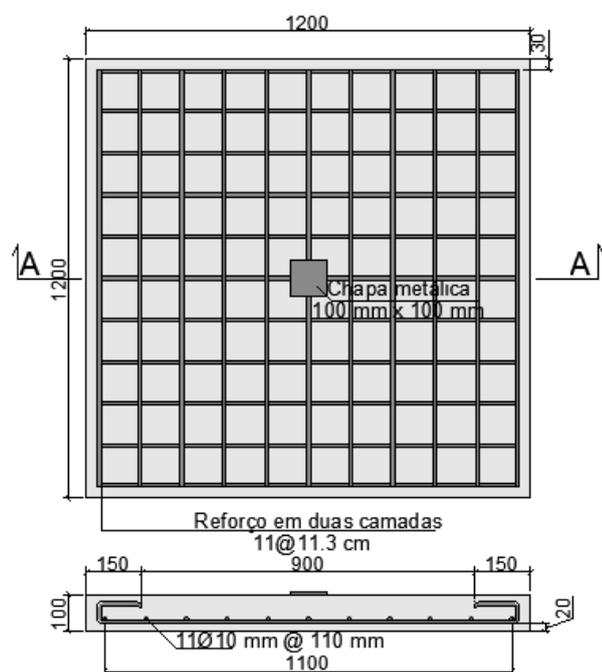


Figura 2.16 - Laje de Mahmoud *et al.* (MAHMOUD *et al.*, 2018).

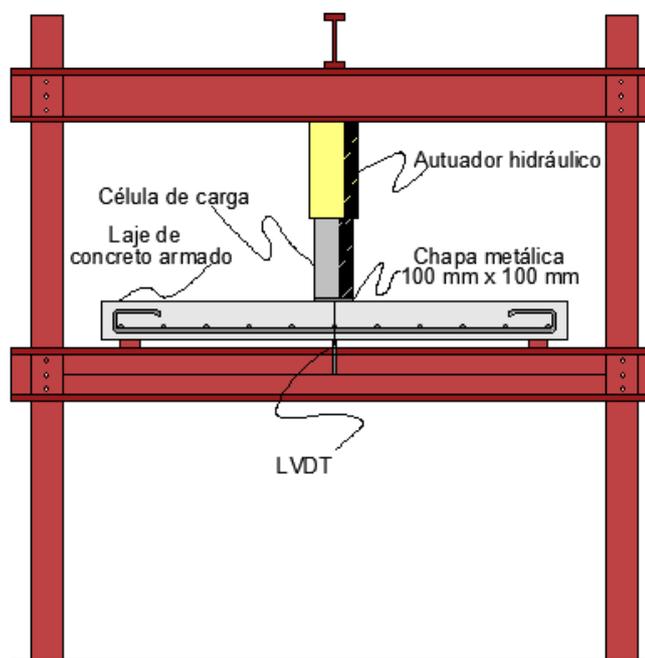


Figura 2.17 – Sistema de ensaio de Mahmoud *et al.* (MAHMOUD *et al.*, 2018).

Tabela 2.6 – Resultados experimentais de Mahmoud *et al.* (2018).

Laje	Teor ARCO (%)	Ø agregado (mm)	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	V_u (kN)	Energia absorção (kN m)	V_{ACI}	V_{EC2}
S1	0	12,5	36,90	3,80	157,5	0,652	95,40	128,7
S2	30		34,50	3,71	153	0,591	92,30	125,9
S3	60		32,50	3,58	137,5	0,471	89,60	123,4
S5	100		31,60	3,5	122	0,36	88,30	123,3
S2	0	25	39,70	3,91	172,5	0,773	98,90	131,9
S4	30		36,40	3,73	157	0,63	94,70	128,1
S6	60		34,10	3,67	140,5	0,476	91,70	125,3
S8	100		33,60	3,63	131	0,403	91,10	124,8

Fonte: Adaptado de Mahmoud *et al.* (2018).

Onde:

f_c é a resistência à compressão do concreto;

f_{ct} é a resistência à tração por compressão diametral;

V_u é a carga de ruptura experimental da laje;

V_{ACI} é a carga de ruptura estimada pelo ACI;

V_{EC2} é a carga de ruptura estimada pelo *Eurocode 2*.

De acordo com os resultados obtidos os autores constataram redução no comportamento mecânico das lajes com concreto com ARCO. A resistência à compressão do concreto e a resistência à tração apresentaram redução média de 13% para concretos confeccionados com agregados de granulometria 25 mm e 11% para os concretos com agregados de granulometria 12,5 mm. Constatou-se também que a carga da primeira fissura e a carga última fissura decrescem conforme se aumenta o teor de ARCO e também com a redução da granulometria do agregado.

Mahmoud *et al.* também observaram a redução na energia de absorção. Acerca das comparações analíticas por meio de normativas internacionais, verificou-se que todas mostraram resultados conservadores na estimativa da capacidade resistente à punção dos modelos ensaiados, sendo que o *Eurocode 2* (2004) foi a norma que mais se assemelhou aos resultados experimentais obtidos.

2.3.6 XIAO *et al.* (2019)

O trabalho de Xiao *et al.* (2019) avaliou experimentalmente a influência da incorporação de agregado graúdo reciclado de concreto no comportamento à punção de 8 lajes de concreto armado, sem armadura de cisalhamento. Do total de lajes, uma laje era de referência, sem fibra de aço e sem ARCO, 4 lajes foram confeccionadas com ARCO e reforçadas com fibras de aço e 3 lajes foram produzidas com ARCO e sem fibras.

O percentual de substituição de agregado natural por ARCO foram 0%, 30%, 50% e 100%. As lajes possuíam as seguintes dimensões: 1.500 x 1.500 x 120 mm. A Figura 2.18 mostra o modelo das lajes de Xiao *et al.* Os resultados experimentais foram comparados com as prescrições do *Eurocode 2* (2004).

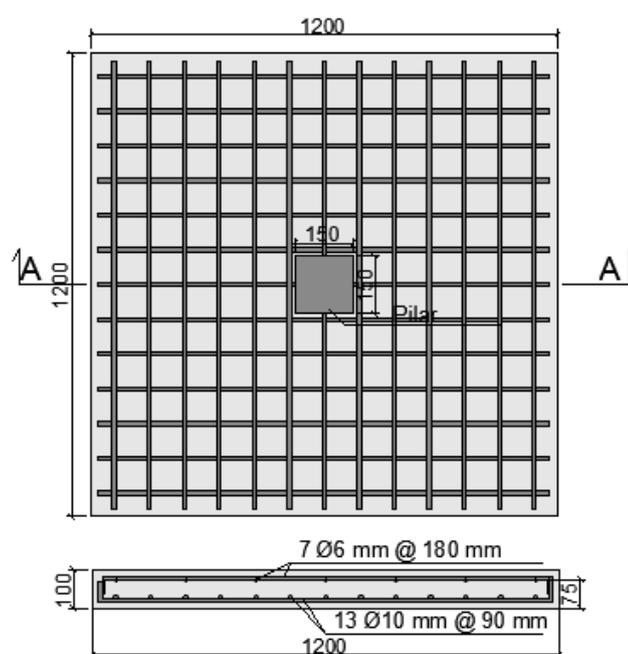


Figura 2.18 – Laje de Xiao *et al.* (Xiao *et al.*, 2019).

De acordo com os autores, os indicadores medidos incluíram principalmente a deformação da armadura longitudinal e do concreto, o deslocamento da laje no centro na direção vertical, e a observação da propagação de fissuras e do processo de ruptura durante o carregamento. Xiao *et al.*, constataram que as lajes com adição de fibras de aço obtiveram aumento de cerca de 7% a 15% na resistência à punção, bem como melhora na ductilidade, deformação e consumo de energia. Os autores notaram ainda as lajes com ARCO mostraram resistência à punção e ao cisalhamento

menor do que a laje de referência, essa redução foi proporcional ao aumento do teor de substituição do ARCO. Quanto às estimativas a partir do *Eurocode 2*, as mesmas se mostraram inseguras, como mostra a Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Resultados experimentais de Xial et al. (2019).

Laje	f_c (MPa)	V_{EC2} (kN)	V_u (kN)	V_u / V_{EC2}
RAC0	43,72	270,62	320	0,85
RAC30-0%	36,34	254,44	313,4	0,81
RAC50-0%	31,16	241,73	307,1	0,79
RAC100-0%	29,64	237,73	303,4	0,78
SFRAC50-0,5%	34,55	284,6	366,8	0,78
SFRAC50-1%	35,45	321,74	370,6	0,87
SFRAC100-0,5%	30,4	272,71	331,2	0,82
SFRAC100-1%	32,78	313,45	350,2	0,9

Fonte: Adaptado de Xial et al. (2019).

Onde:

f_c é a resistência à compressão do concreto;

V_u é a carga de ruptura experimental da laje;

V_{EC2} é a carga de ruptura estimada pelo *Eurocode 2*.

2.3.7 SAHOO e SINGH (2020)

Sahoo e Singh avaliaram o comportamento à punção de 12 painéis de laje plana quadradas de concreto armado, sem armadura de cisalhamento, com dimensões: 1.200 × 1.200 × 100 mm (Figura 2.19). Os percentuais de substituição de agregados naturais por ARCO foram 0%, 50% e 100%. As lajes foram ensaiadas em uma configuração de carregamento invertido (Figura 2.20). Os autores compararam os resultados experimentais com as estimativas normativas *Eurocode 2* (2014) e ACI 318 (2019).

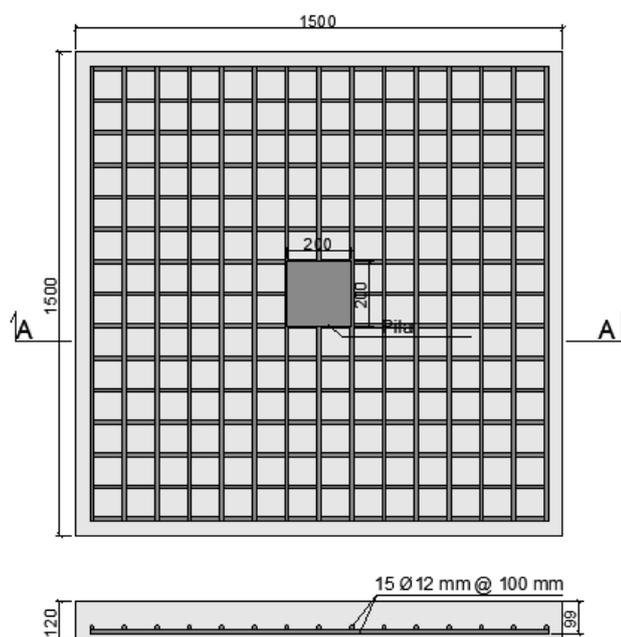


Figura 2.19 – Laje de Sahoo e Singh (SAHOO e SINGH, 2020).

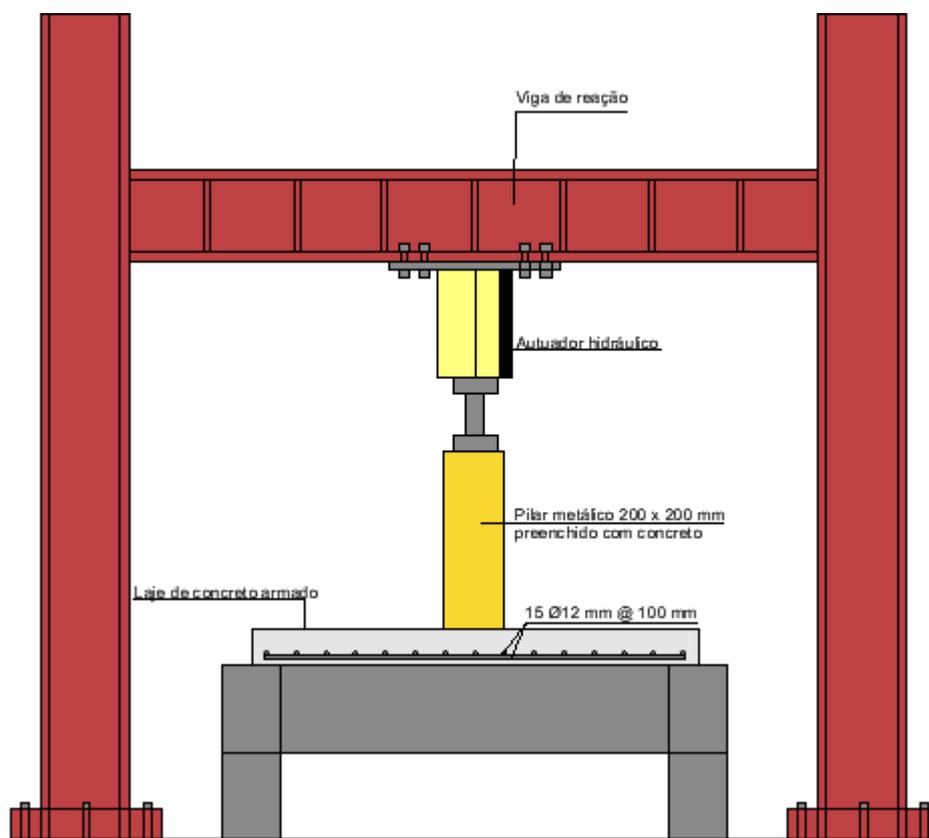


Figura 2.20 – Sistema de ensaio de Sahoo e Singh (SAHOO e SINGH, 2020).

De acordo com os autores, em todos os espécimes, os padrões de fissura foram indicativos de ruptura por punção e cisalhamento, independentemente do teor de substituição do agregado natural por ARCO. Nesse sentido, Sahoo e Singh destacam que não foram observados efeitos significativos para a resistência à compressão, nem para o comportamento à punção das lajes produzidas. Em relação às previsões normativas, ambas foram conservadoras, ACI 318 (2019) e *Eurocode* (2004).

Tabela 2.8 – Resultados experimentais de Sahoo e Singh (2020).

Laje	f_c (MPa)	Carga de punção experimental (kN)		V_{flex} (kN)	Previsões normativas			
					ACI 318		EC2	
		V_u	$V_{média}$		V_{ACI} (kN)	$V_{média} / V_{ACI}$	V_{EC2} (kN)	$V_{média} / V_{EC2}$
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	148,3	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						

Fonte: Adaptado de Sahoo e Singh (2020).

Onde:

f_c é a resistência à compressão do concreto;

f_{ct} é a resistência à tração por compressão diametral;

V_u é a carga de ruptura experimental da laje;

V_{ACI} é a carga de ruptura estimada pelo ACI;

V_{EC2} é a carga de ruptura estimada pelo *Eurocode* 2.

2.3.8 RIBEIRO JÚNIOR (2022)

Os ensaios de Ribeiro Júnior (2022) foram constituídos de 6 lajes lisas de concreto armado, sem armadura de cisalhamento. As lajes possuíam geometria octogonal com distância entre faces opostas de 2.500 mm e espessura de 210 mm. Os apoios foram distribuídos de modo circunferencial num raio de 1.125 mm. As lajes foram carregadas de modo centrado por meio de pilares quadrados de 300 mm x 300 mm. As principais variáveis da pesquisa foram: a taxa de substituição de agregados graúdos naturais por ARCO, a saber: 0%, 30% e 100% e a taxa de armadura de flexão (0,7% e 1,4%). A Figura 2.21 ilustra a geometria das lajes ensaiadas.

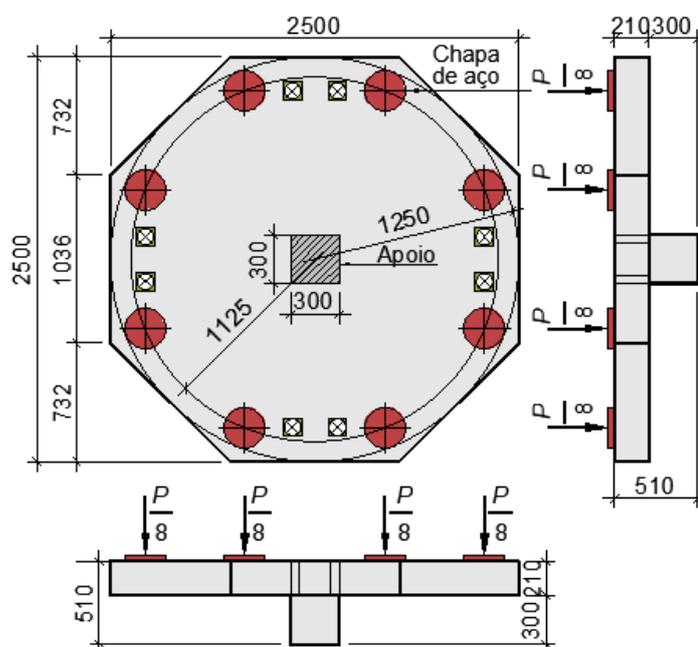


Figura 2.21 – Geometria das lajes de Ribeiro Júnior (RIBEIRO JÚNIOR, 2022).

Acerca dos resultados experimentais, o autor afirma que a resistência à tração demonstrou uma ligeira redução com a inserção do ARCO. De acordo com o autor, o módulo de elasticidade das lajes com ARCO também foi inferior aos das lajes com agregado convencional. Ainda segundo Ribeiro Júnior (2022), a incorporação de ARCO não interferiu de maneira significativa na rigidez na fase pré-fissuração, ou no padrão de fissuração para ambas as taxas de armadura de flexão ensaiadas.

No que diz respeito à capacidade resistente a punção, quando comparadas às lajes com agregados graúdos convencionais, as lajes com ARCO apresentaram redução máxima de 6%. A taxa de armadura foi capaz de aumentar a carga de

fissuração no estado limite de serviço (ELS). Acerca da comparação entre os resultados experimentais e os critérios normativos, o autor afirma que as normativas conseguiram prever com precisão a carga de ruptura de laje sem armadura de cisalhamento, uma vez que sua resistência se limita à resistência do concreto (V_c) e as relações entre carga de ruptura experimental e carga de ruptura calculada com os critérios normativos ($V_u / V_{teórico}$) ficaram próximas de 1.

Segundo Ribeiro Júnior (2022), a pequena redução na resistência à punção e a segurança das previsões normativas indicam que o uso de ARCO em lajes lisas de concreto armado é viável. A Tabela 2.9 resume os principais resultados acerca do experimento do autor.

Tabela 2.9 – Resultados experimentais das lajes de Ribeiro Júnior (2022).

Laje	Teor de ARCO (%)	d (mm)	ρ (%)	f_c (MPa)	d_g (mm)	f_{ys} (MPa)	E_s (GPa)	V_u (kN)	V_u / NBR	V_u / ACI	V_u / ACI
S-0,7-0	0	162,5	0,7	20,73	19	590,27	198,26	526,75	0,98	1,17	1,13
S-0,7-30	30	165		21,92				560,07	1,04	1,18	1,15
S-0,7-100	100	165		23,05				493,92	0,92	1,02	1
S-1,4-0	0	165	1,4	22,78		527,41	192,41	562,52	0,83	1,16	0,96
S-1,4-30	30	164,5		21,52				518,42	0,77	1,11	0,91
S-1,4-100	100	166,75		21,44				531,16	0,79	1,12	0,91

Fonte: Ribeiro Júnior (2022).

Onde:

d é a altura útil real das lajes;

f_c é a resistência à compressão do concreto;

ρ é a taxa de armadura de flexão;

d_g é o diâmetro dos agregados;

f_{ys} é a tensão de escoamento da armadura de flexão;

E_s é o módulo de elasticidade da armadura de flexão;

V_u carga de ruptura.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta pesquisa apresenta uma série de ensaios de quatro lajes lisas de concreto armado, das quais duas contêm agregado reciclado de concreto e duas foram confeccionadas sem ARCO, utilizou-se ainda dois tipos de armadura de cisalhamento, a saber: *double headed studs* e *estribos individuais*. Os ensaios foram realizados no laboratório de estruturas do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE) da Universidade Federal do Pará, no Campus Tucuruí, com início em setembro de 2021. Os ensaios apresentados neste capítulo fazem parte da segunda série de ensaios do trabalho de doutorado, em fase de elaboração, de Lana Damasceno, da Universidade de Brasília e também é uma continuação do trabalho de Ribeiro Júnior (2022).

A primeira série de ensaios de Damasceno e de Ribeiro Júnior (2022) teve como objetivo investigar a resistência máxima à punção de seis lajes sem armadura de cisalhamento, com diferentes teores de substituição de agregado natural por ARCO. Esta segunda série, por sua vez, pretende avaliar a resistência máxima à punção, porém com inserção de armadura de cisalhamento dos tipos conector e estribo individual, com arranjo em cruz, e com total substituição de agregado natural por ARCO.

A fim de alcançar as respostas para os objetivos propostos neste trabalho, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, ensaios das barras de aço e do concreto no estado fresco (*slump test*) e endurecido (testes de compressão, tração e módulo), bem como instrumentação das armaduras e da superfície do concreto, e ensaio destrutivo das lajes, que serão melhor explicados a seguir.

3.1 Características dos modelos ensaiados

Os espécimes estudados nesta dissertação foram lajes lisas de concreto armado com armadura de cisalhamento, sendo duas delas lajes de referência (sem substituição) e as outras duas com substituição total de agregados graúdos naturais por reciclados de concreto. As lajes foram submetidas a um carregamento simétrico e confeccionadas com armadura de flexão e armadura de cisalhamento. Objetivando, principalmente, avaliar a influência da taxa de substituição do agregado graúdo natural

por agregado graúdo reciclado de concreto na resistência à punção, quando da inserção de armadura de cisalhamento.

As lajes possuem geometria octogonal com distância entre as faces opostas de 2.500 mm, com espessura de 210 mm. Realizou-se a distribuição dos apoios de modo circunferencial, em pontos equidistantes, num raio de 1.125 mm. O carregamento foi realizado de modo centrado através de pilares quadrados de 300 mm de lado e 300 mm de altura. A taxa de armadura de flexão foi de 1,4% e a de armadura de cisalhamento 0,34%. O concreto foi dosado para ter resistência característica estimada em 25 MPa e o aço CA50. Para melhor compreensão das características das lajes ensaiadas, relacionadas com as características das armaduras, apresenta-se um resumo na Tabela 3.1. A Figura 3.1 ilustra a geometria dos modelos ensaiados.

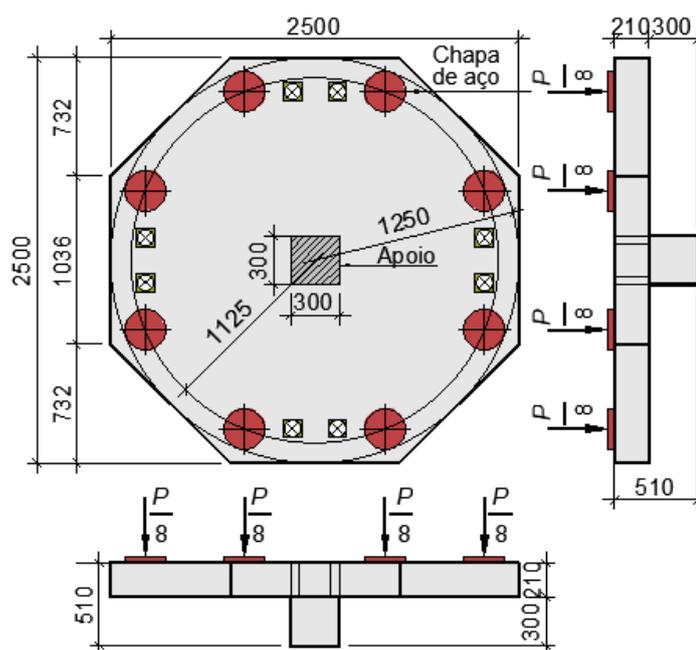


Figura 3.1 – Modelo geral das lajes utilizadas nesta pesquisa (Autora, 2023).

Tabela 3.1 – Resumo das características das lajes.

RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIADAS															
Laje	Teor de ARCO (%)	d (mm)	f_c (MPa)	ρ (%)	\varnothing_f (mm)	f_{ys} (MPa)	E_s (GPa)	ρ_w (%)	\varnothing_w (mm)	f_{yws} (MPa)	E_{sw} (GPa)	L	C	S_0 (mm)	S_r (mm)
ST0	0	159,7	20,1	1,4	16	570,13	198,21	0,34	10	565,9	510,5	3	8	80	100
ST100	100	162,0	17,6							678,9	186,9				
SS0	0	159,8	22,5												
SS100	100	160,0	23												
Obs.:	Propriedades das armaduras complementares: $f_{ys} = 453,3 \text{ MPa}$ $E_s = 197,4 \text{ GPa}$														
	ST = Estribo Individual														
	SS = Double Headed Studs														

Onde:

d é a altura útil real das lajes;

f_c é a resistência à compressão do concreto;

ρ é a taxa de armadura de flexão;

\varnothing_f é o diâmetro das barras de flexão;

f_{ys} é a tensão de escoamento da armadura de flexão;

E_s é o módulo de elasticidade da armadura de flexão;

ρ_w é a taxa de armadura de cisalhamento;

\varnothing_w é o diâmetro das barras de cisalhamento;

f_{yws} é a tensão de escoamento da armadura de cisalhamento;

E_{sw} é o módulo de elasticidade da armadura de cisalhamento;

L é o número de linhas das armaduras de cisalhamento;

C é o número de camadas das armaduras de cisalhamento;

S_0 é o espaçamento entre a face do pilar e a primeira camada de armadura de cisalhamento;

S_r é o espaçamento entre camadas das armaduras de cisalhamento.

3.2 Detalhamento das armaduras

3.2.1 Armaduras de combate à flexão

Todas as lajes desta pesquisa possuem armaduras de combate à flexão com $\rho_{flex} = 1,4\%$, e são compostas por barras de aço CA-50 de $\varnothing 16.0$ mm com espaçamento de 100 mm. Sua disposição foi realizada em direções ortogonais nas faces superior e inferior das lajes. O cobrimento possui 30mm. Realizou-se o alinhamento da malha inferior das lajes com as armaduras superiores, para que se reduzisse a possibilidade de ocorrer fissuração da laje durante sua mobilização e a degradação total dos modelos após a ruptura por punção.

Para que os tirantes de reação do sistema de ensaio pudessem passar, foram realizados orifícios nas lajes, medindo 100 x 100 mm. O posicionamento dos orifícios entrou em conflito com algumas armaduras de flexão, o que levou a fazer pequenos ajustes, reposicionando-as em alguns pontos, durante o processo construtivo. A taxa de armadura de flexão dos modelos ensaiados foi calculada a fim de que se assegurassem resistências apropriadas sem que ocorresse ruptura por flexão. A Figura 3.2 mostra o arranjo geral das lajes.

Foram utilizados ganchos em U, como armadura suplementar, a fim de promover a ancoragem da armadura de flexão superior e auxiliar na transmissão das forças a que as mesmas estavam submetidas. Para garantir o posicionamento das barras, utilizou-se arame recozido em cada encontro de armaduras.

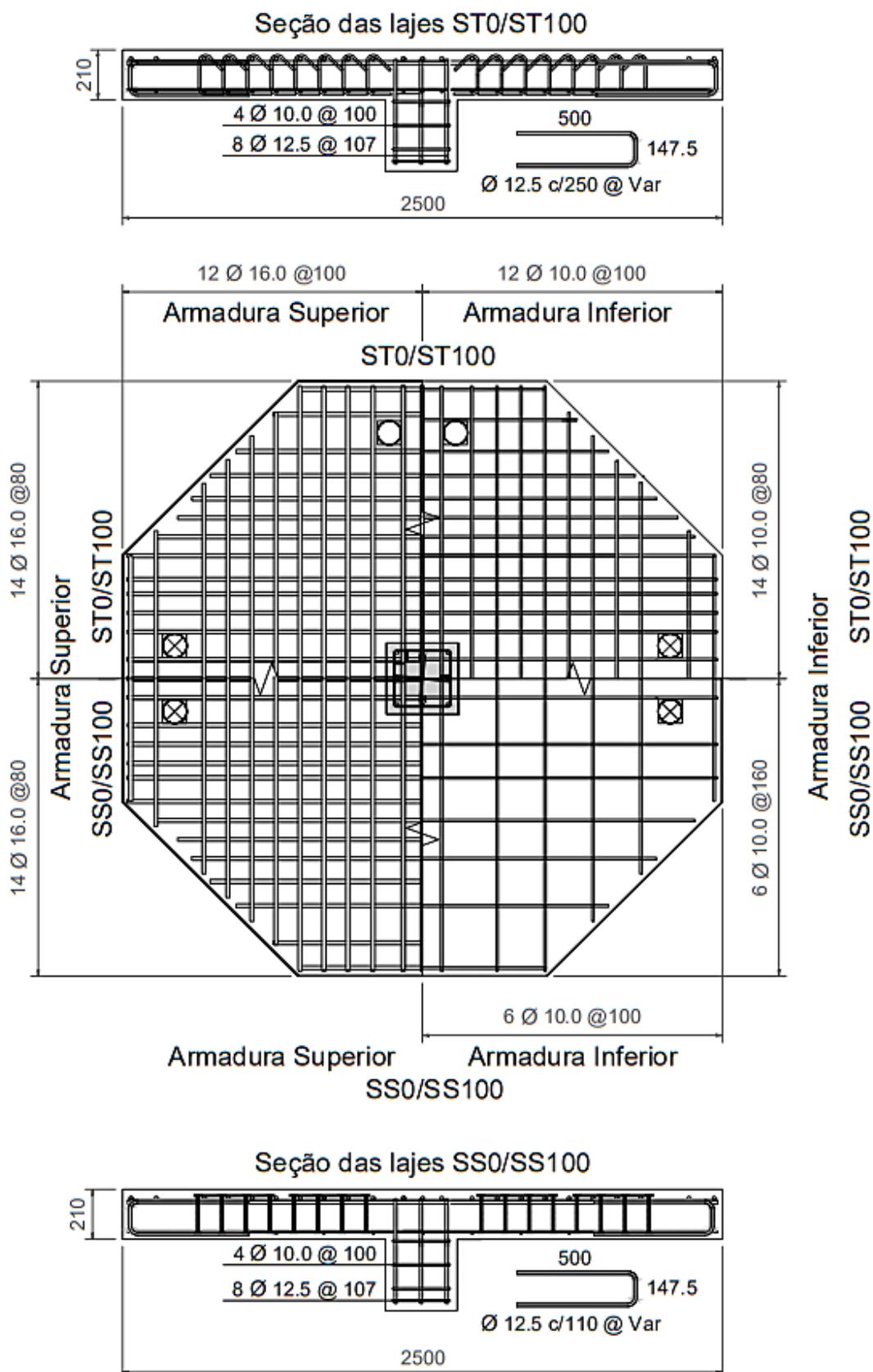


Figura 3.2 – Arranjo geral das armaduras nas lajes (Autora, 2023).

3.2.2 Armaduras de combate ao cisalhamento

A taxa de armadura de cisalhamento das lajes foi de 0,34% e, como o objetivo era que não houvesse ruptura fora da região da armadura de cisalhamento, as camadas se estenderam até próximo aos apoios. A armadura de punção de duas das lajes foi do tipo estribo individual e das outras duas do tipo *Double Headed Studs*, todas as lajes com distribuição em cruz, distribuídas simetricamente em torno do pilar. Os estribos individuais foram confeccionados manualmente e os *Double Headed Studs* produzidos industrialmente pela “TREJOR – Soluções metálicas”. As Figuras a seguir mostram a distribuição da armadura de cisalhamento nas lajes e seus detalhes (Figura 3.3, Figura 3.4, Figura 3.5, Figura 3.6, Figura 3.7 e Figura 3.8).

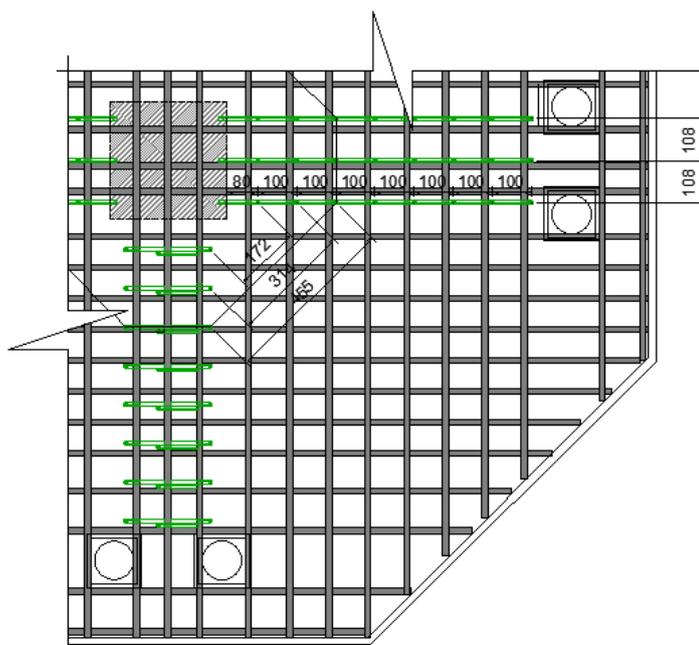


Figura 3.3 – Disposição geral dos estribos em um quadrante (Autora, 2023).

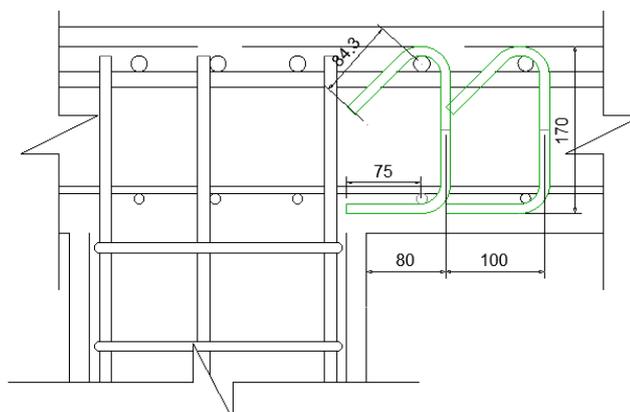


Figura 3.4 – Detalhe dos estribos (Autora, 2023).



Figura 3.5 – Laje com estribos (Autora, 2023).

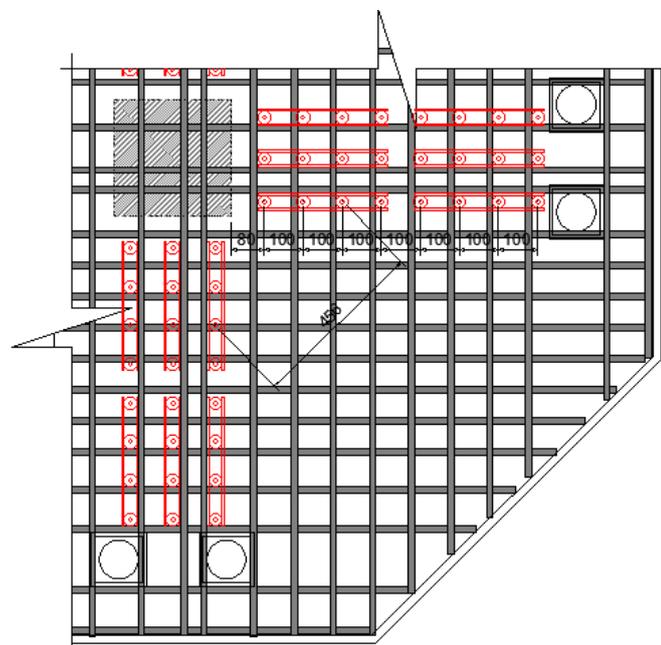


Figura 3.6 – Disposição dos studs nas lajes (Autora, 2023).

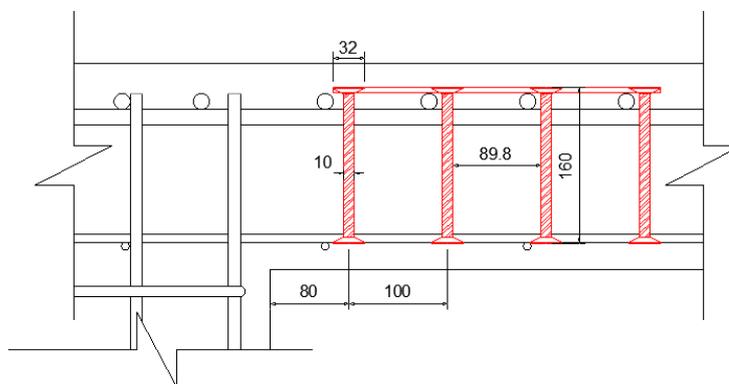


Figura 3.7 – Detalhe dos *Double Headed Studs* (Autora, 2023).



Figura 3.8 – Laje com *Double Headed Studs* (Autora, 2023).

3.2.3 Armaduras dos pilares

As armaduras dos pilares são compostas por 8 barras de 12.5 mm de diâmetro, aço CA-50, dispostas longitudinalmente e estribos de 10.0 mm de diâmetro, com espaçamento de 100 mm e 30 mm de cobrimento (Figura 3.9).

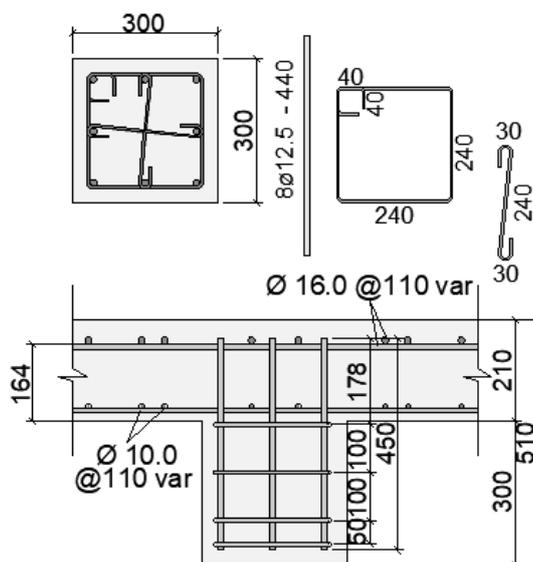


Figura 3.9 – Armadura dos pilares (Autora, 2023).

3.3 Sistema de ensaio

As lajes foram ensaiadas no Laboratório de Estruturas do NDAE, na UFPA, Campus Tucuruí, em um sistema de reação metálico autoportante capaz de suportar 3000 kN. Compuseram o sistema também quatro vigas metálicas rígidas para distribuir a reação, simetricamente posicionadas, niveladas e ligadas à mesa de

reação, por meio de oito tirantes e oito chapas de aço distribuídas de forma simétrica em relação ao centro da laje, usadas como ponto de reação, com raio de carregamento de 1.125 mm, um cilindro hidráulico com capacidade de 3.000 kN, uma célula de carga com capacidade para 3.000 kN e precisão de 1 kN, e uma bomba elétrica para acionar o sistema.

A montagem do ensaio ocorreu com a utilização de um caminhão Munck, por meio do qual as lajes eram posicionadas sobre os tubos metálicos dispostos junto à face da mesa de reação, de forma que o centro do pilar ficasse alinhado ao centro de aplicação da carga. O ensaio consistiu, basicamente, na aplicação de um carregamento simétrico nas lajes em pontos de aplicação concêntricos ao pilar.

O carregamento foi realizado no sentido de baixo para cima, empurrando todo o sistema de ensaio para cima até chegar no nível das porcas, usadas para transferir esforços para as vigas de reação. A captação dos dados de extensometria, bem como de LVDT's e potenciômetros foi realizada por meio de três módulos de sistema de aquisição de dados ADS LINKSYS. O sistema de ensaio está ilustrado na Figura 3.10.

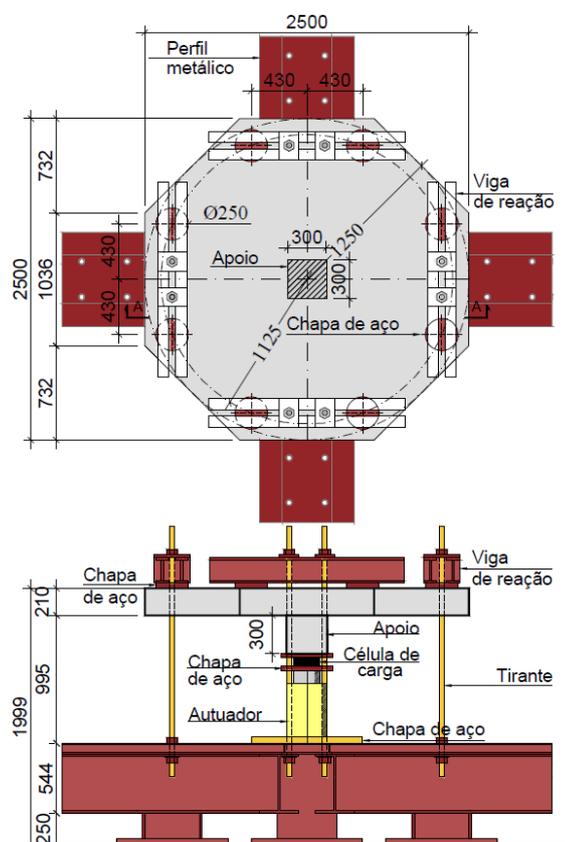


Figura 3.10 – Sistema de ensaio (Autora, 2023).

3.4 Instrumentação

Para aferir as deformações das lajes, foram instalados extensômetros elétricos de resistência (EER) e para aferir os deslocamentos utilizou-se deflectômetros do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). Monitorou-se os mesmos pontos para todas as lajes, para obter dados comparáveis.

3.4.1 Deslocamentos verticais

O monitoramento dos deslocamentos verticais nas lajes foi feito por meio de LVDT's e potenciômetros, das marcas KYOWA, LD Sensors e Gefran, em 11 pontos (Figura 3.11), os aparelhos foram fixados em perfis metálicos, posicionados sobre as vigas de reação do sistema de ensaio, para que deslocassem em conjunto, como um *yoke*. O deslocamento no centro do pilar foi monitorado pelo LVDT 6, pelo qual aferiu-se o deslocamento máximo nos ensaios, e os demais aparelhos foram distribuídos ao longo do raio de carregamento, para a construção de perfis de deslocamento.

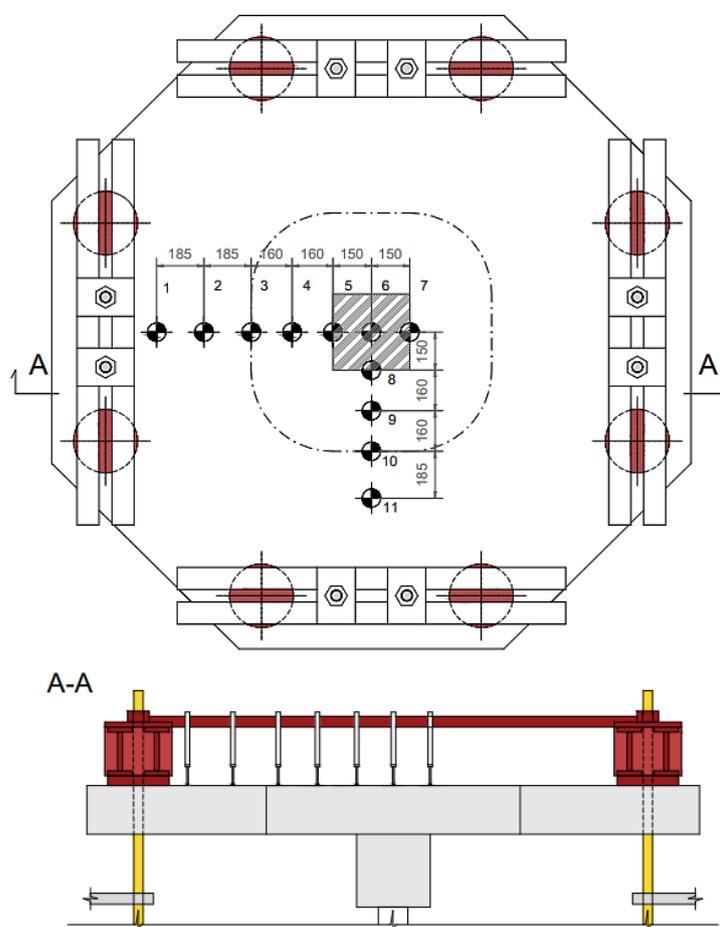


Figura 3.11 – Posicionamento dos LVDT's (Autora, 2023).

3.4.2 Deformações no aço e no concreto

Foram monitoradas as deformações nas armaduras de flexão, de cisalhamento e no concreto, com a finalidade de acompanhar de forma contínua as deformações durante todas as etapas do carregamento. As deformações foram aferidas por meio de extensômetros elétricos de resistência.

A fixação dos extensômetros seguiu um processo minucioso a fim de impedir que houvesse perdas de leituras. O passo a passo para fixar os extensômetros no aço iniciou com o ato de limar as barras que seriam ensaiadas e em seguida lixá-las com o objetivo de retirar as nervuras na região a ser instrumentada, porém esse procedimento foi feito com cautela para não retirar seção nominal da barra.

Posteriormente foi realizada a limpeza da superfície lixada, com álcool. Na sequência os extensômetros foram preparados e fixados nas barras com adesivo instantâneo à base de cianoacrilato (cola Super Bonder). Após isso, cada terminal foi soldado à ponta de um cabo paralelo flexível, fixado à barra por meio de braçadeiras plásticas. Para proteger a solda foi utilizada uma camada de Araldite.

O próximo passo foi envolver a área instrumentada com uma camada de silicone em gel a fim de assegurar a proteção contra choques mecânicos e, finalmente, envolver a área com uma camada de fita isolante de auto fusão. Todos os extensômetros utilizados na instrumentação foram previamente testados, com teste de resistência elétrica, para não haver perdas de leitura.

Para análise das deformações nas armaduras e no concreto neste trabalho utilizou-se dois extensômetros elétricos em cada ponto, de onde foram retiradas médias com intuito de acompanhar as deformações durante todas as etapas do carregamento. Destaca-se que, como as lajes são simétricas, realizou-se a extensometria em apenas um de seus quadrantes. Destaca-se que foi realizado monitoramento das deformações nos tirantes de apoio por meio de extensômetros elétricos para verificar a possibilidade de desbalanceamento de momentos, no entanto, essa análise descartou a possibilidade de desbalanceamento no carregamento em todos os ensaios.

Com a decisão sobre a posição dos extensômetros buscou-se avaliar a curvatura da peça e verificar o comportamento da distribuição das deformações próximo à área carregada. É importante enfatizar ainda que a justificativa para a

escolha dos pontos instrumentados baseou-se também na primeira série de lajes ensaiadas de Damasceno (2023) e Ribeiro Júnior (2022), tendo em vista que esta pesquisa se configura uma continuação da linha de pesquisa anteriormente citada e dessa forma tornou-se possível comparar alguns resultados.

3.4.2.1 Deformações nas armaduras de flexão

O posicionamento dos extensômetros das barras de flexão se deu de modo que fosse possível registrar as deformações ao longo do raio de carregamento. Os extensômetros fixados na armadura foram dispostos em pares, utilizando-se a média dos resultados. A Figura 3.12 mostra o posicionamento dos extensômetros na armadura de flexão.

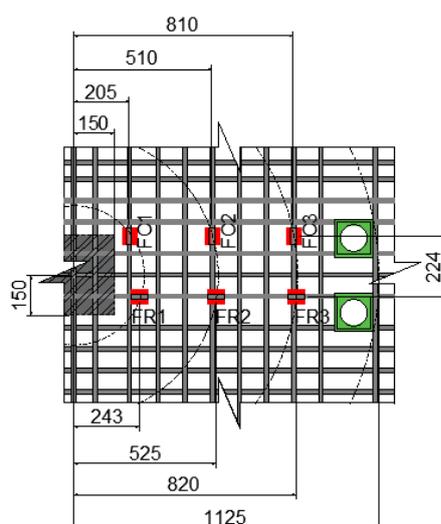


Figura 3.12 – Posicionamento dos extensômetros nas barras de flexão (Autora, 2023).

3.4.2.2 Deformações nas armaduras de cisalhamento

A armadura de cisalhamento das lajes também foi instrumentada com extensômetros elétricos, em duplas, posicionados diametralmente opostos. Posicionou-se os extensômetros ao longo das camadas até a primeira camada após uma distância de $2d$ da face do pilar.

A instrumentação buscou avaliar as deformações somente na região central das barras de cisalhamento alinhadas aos eixos x e y das lajes, pois, acredita-se que o tipo de agregado não exerce influência na aderência da armadura de cisalhamento

ao o concreto. As Figuras a seguir mostram o posicionamento dos extensômetros em cada laje (Figura 3.13 e Figura 3.14 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

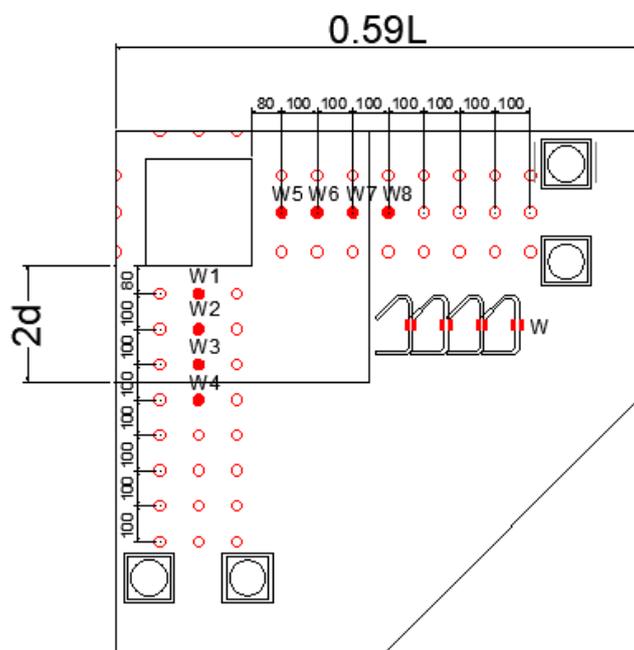


Figura 3.13 – Extensômetros de cisalhamento das Laje ST0 e ST100 (Autora, 2023).

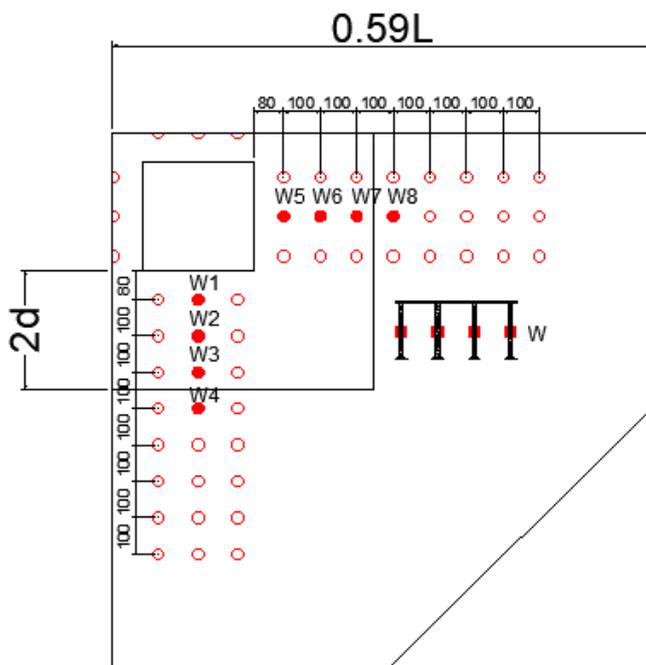


Figura 3.14 – Extensômetros de cisalhamento das Lajes SS0 e SS100 (Autora, 2023).

3.4.2.3 Deformações na superfície do concreto

Foi realizada análise das deformações na superfície do concreto para verificar o esmagamento do concreto. Com o intuito de definir a altura da linha neutra em todos os estágios de carregamento, fixou-se os extensômetros na face comprimida do concreto, posicionando-os na mesma seção das barras de flexão. O posicionamento dos extensômetros pode ser visto na Figura 3.15.

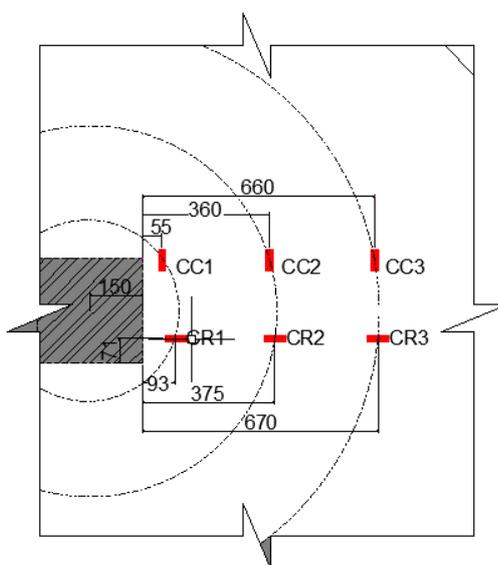


Figura 3.15 – Posicionamento dos extensômetros no concreto (Autora, 2023).

3.5 Materiais utilizados para a confecção das lajes

3.5.1 Agregado miúdo e cimento Portland

O agregado miúdo empregado na confecção das lajes tem origem quartzosa e foi fornecido pela própria UFPA. A caracterização deste material foi realizada seguindo as diretrizes da ABNT NBR NM 248 (2003) para a determinação da composição granulométrica, a ABNT NBR 16972 (2021) para determinação da massa unitária, e a ABNT NBR 16916 (2021) para determinação da massa específica. O cimento escolhido para a realização desta pesquisa foi o CP II F 32, com caracterização geral fornecida pelo fabricante.

3.5.2 Agregado graúdo natural

Para ser utilizado como agregado graúdo natural optou-se pela brita nº1 de origem basáltica, fornecida pela UFPA. Foram realizados os ensaios de massa unitária, massa específica, composição granulométrica da brita e determinação do teor de materiais pulverulentos conforme recomendações da ABNT NBR 16973 (2021). Além disso, foi verificado o teor de umidade total do agregado graúdo natural conforme ABNT NBR 9939 (2011).

3.5.3 Agregado graúdo reciclado de concreto

A análise de um material pode ser feita a nível macroscópico, ou a um nível mais aprofundado, o microscópico. A investigação da macroestrutura, normalmente, desencadeia questionamentos sobre o material que, muitas vezes, só são elucidados por meio do estudo das propriedades microscópicas do mesmo. Todavia, a impossibilidade de realizar um estudo que abranja todos os âmbitos de análise fez com que esta dissertação tivesse como foco principal apenas a análise das propriedades macroscópicas do ARCO e dos concretos produzidos.

O agregado graúdo reciclado de concreto utilizado nesta dissertação tem como origem corpos de prova provenientes do município de Belém, Pará, mais especificamente do descarte de empresas de controle tecnológico de concreto. Os corpos de prova tiveram os processos de coleta, britamento e peneiramento devidamente controlados, para que não houvesse impurezas e contaminantes que prejudicassem o concreto e a fim de que fossem gerados agregados de qualidade compatível aos agregados naturais.

Como critério de seleção, foram coletados apenas corpos de prova de concreto totalmente íntegros, com agregado graúdo de seixo, descartando-se os exemplares contendo britas ou outros tipos de adições, presença de matéria orgânica e umidade. Além disso, o concreto de origem possui resistência à compressão entre 25 e 35 MPa.

A trituração do agregado foi realizada por meio de um britador mandíbula regulado (Figura 3.16a). Posteriormente a britagem, o agregado foi separado e peneirado em agitador mecânico (Figura 3.16b), usando um conjunto de peneiras, com aberturas de malha de #19 mm e #4,8 mm. Dessa forma, a faixa granulométrica

do ARCO graúdo foi definida no intervalo entre passantes na peneira de #19 mm e retidos na de #4,8mm.



a) Britagem do ARCO

b) Agitador mecânico

Figura 3.16 – Produção do ARCO graúdo (Autora, 2023).

Para o cálculo de massa específica do ARCO graúdo foi utilizado o método de Leite (2001), visto que ele considera a utilização de vácuo para retirada do ar presente nas partículas de ARCO graúdo, o que se faz muito relevante uma vez que as partículas de ARCO graúdo, normalmente, possuem grandes quantidades de vazios em sua constituição, decorrente da argamassa de origem aderida aos agregados naturais. A Figura 3.19 mostra o aspecto visual do ARCO produzido.



Figura 3.17 – Aspecto visual do ARCO (Autora, 2023).

3.6 Dosagem do concreto

Foram executados dois traços diferentes, considerando os seguintes percentuais de substituição: o de referência (sem substituição, com 100% de agregado natural), e o com 100% de substituição de agregado natural por ARCO graúdo. Após os 28 dias de cura, esperava-se que o concreto alcançasse uma resistência à compressão de 25 MPa. O teor de argamassa (α_{arg}) dos traços é igual a 51%. A Tabela 3.2 mostra a dosagem idealizada para o concreto.

Tabela 3.2 – Dosagem do concreto.

Teor de ARCO (%)	a/c	Consumo de Cimento (kg/m ³)	Consumo de agregado miúdo natural (kg/m ³)	Consumo de agregado graúdo natural (kg/m ³)	Consumo de agregado graúdo reciclado (kg/m ³)
0	0,59	342,5	757,9	1057,2	0
100	0,65	338,3	731,4	0	1016,1

Onde:

a/c é a relação água cimento.

3.7 Ensaios das barras de aço

Foi realizada a caracterização das propriedades mecânicas do aço utilizado nas lajes, para tanto, foram retirados corpos de cada barra instrumentada, os quais foram submetidos a ensaios de tração axial, conforme balizado pela ABNT NBR 6892 (2013). A execução dos ensaios se deu no Laboratório de Análise de Estruturas e Materiais (LACEM), na UFPA, Tucuruí.

3.8 Concretagem e ensaios do concreto no estado fresco e endurecido

A concretagem ocorreu *in loco*, com o auxílio de uma betoneira de 400 litros, ao todo foram 9 betonadas por laje. Todo material da concretagem foi pesado em balança eletrônica e ensacado previamente para facilitar o processo e assegurar o controle do material. A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi a seguinte: 30% do ARCO ou Brita, 30% da água, 100% da areia, 70% da água, 100% do cimento, 70% do ARCO ou Brita.

Foi avaliada a trabalhabilidade de todos os traços, conforme preconiza a NBR 16889 (2020) (Figura 3.18 a). Para o correto adensamento do concreto utilizou-se um vibrador de imersão. A cura dos corpos de prova e das lajes foi realizada com sacos de cimento umedecidos. Realizou-se também ensaios para concreto em seu estado endurecido, a saber, ensaios para determinação da resistência à compressão e à tração e do concreto, bem como seu módulo de elasticidade, para tanto, moldou-se corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm (Figura 3.18 b).



a) Abatimento de tronco de cone

b) Moldagem de corpo de prova

Figura 3.18 – Ensaio do concreto no estado fresco (Autora, 2023).

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados dos ensaios apresentados neste Capítulo fazem parte do trabalho de doutorado de Damasceno (2023), em fase de elaboração. Dentre os resultados obtidos estão: caracterização dos materiais, abatimento do concreto no estado fresco, resistências à compressão, tração e módulo de elasticidade do concreto, propriedades mecânicas do aço, deslocamentos verticais das lajes, deformações devido à flexão com as deformações nas barras tracionadas na superfície do concreto, deformações nas armaduras de cisalhamento, padrão de fissuração, cargas últimas e estimativas normativas.

4.1 Materiais

A massa específica do agregado miúdo encontrada foi de 2,59 g/cm³, sua massa unitária foi de 1,54 kg/dm³, sua dimensão máxima característica de 2,4 mm e

seu módulo de finura de 2,41. Para o agregado graúdo natural foram encontrados os seguintes resultados durante a caracterização: 0,69% de material pulverulento, teor de umidade de 0,32%, massa específica de 2,66 g/cm³, a massa unitária foi de 1,34 kg/dm³, a dimensão máxima característica de 19mm e o módulo de finura de 7,79.

Para o agregado reciclado encontraram-se por meio dos ensaios os seguintes resultados: teor de material pulverulento de 3,9%, teor de umidade de 5,03%, massa específica de 2,18 g/cm³, a massa unitária foi de 1,14 kg/dm³, a dimensão máxima característica de 19 mm e o módulo de finura de 6,79. A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.

Tabela 4.1 – Resumo dos ensaios de caracterização dos agregados.

Material	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo Natural	Agregado Graúdo Reciclado de Concreto
Massa Específica (g/cm³)	2,59	2,66	2,18
Massa Unitária (kg/dm³)	1,54	1,34	1,14
Dimensão Máxima Característica (mm)	2,4	19	19
Módulo de Finura	2,41	7,79	6,79
Teor material pulverulento (%)	-	0,69	3,9
Teor umidade (%)	-	0,32	5,03

Analisando os dados de caracterização, observa-se que os agregados reciclados possuem a dimensão máxima característica igual à do agregado natural graúdo, porém, cabe ressaltar que existe uma grande influência do processo de britagem e do peneiramento nesse resultado. Uma vez que é a abertura da mandíbula do britador e o posterior peneiramento do ARCO nas peneiras escolhidas que vai condicionar o tamanho das partículas.

Como esperado, o ARCO apresenta uma absorção de água bem maior do que a dos agregados naturais. Na maioria das pesquisas consultadas, é citado o aumento do valor da absorção de água e do índice de vazios com o uso do material reciclado. Em relação ao teor de material pulverulento o agregado graúdo reciclado também apresentou percentual maior que os agregados naturais, o que pode ser explicado pela presença da argamassa aderida ao agregado natural, que no processo de britagem e até de manuseio do material vai se soltando.

Entretanto, apesar dessas características, optou-se por não fazer pré-molhagem do agregado reciclado antes da concretagem, visto que Ribeiro Júnior (2022) também utilizou o ARCO nessas condições e constatou que não houve diferença significativa na rigidez na fase pré-fissuração, nem no padrão de fissuração, bem como na resistência à compressão das lajes quando comparadas às lajes produzidas com concretos com agregado natural. Além disso, o autor afirma que as lajes com ARCO apresentaram redução máxima de 6% na resistência à punção quando comparadas às lajes com agregados graúdos naturais.

4.2 Ensaios das barras de 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 4.2.

Tabela 4.2 – Resumo das propriedades mecânicas do aço.

Propriedades mecânicas do aço						
Tipo de Barra	\varnothing (mm)	f_{yw} (MPa)		ε_{ys} (‰)	E_{sw} (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	0,90	565,91	62,62
Flexão	16	570,13	11,44	2,88	198,21	3,97

Onde:

f_{yw} é a tensão de escoamento da armadura;

ε_{ys} é a deformação da armadura;

E_{sw} é o módulo de elasticidade da armadura.

4.3 Ensaios do concreto no estado fresco

O abatimento do concreto foi controlado para que concreto apresentasse boa trabalhabilidade durante o lançamento, para tanto, quando necessário, durante a concretagem, ajustou-se a relação água/cimento dos concretos com ARCO. A Tabela

4.3 apresenta a relação água/cimento (a/c) média e o abatimento de tronco de cone médio (*slump test*) para cada laje.

Tabela 4.3 – Resumo das propriedades do concreto no estado fresco.

Laje	Média a/c	Média abatimento de tronco de cone (mm)
SS0	0,59	106,00
SS100	0,67	105,00
ST0	0,60	106,43
ST100	0,65	105,00

Como já era esperado, os concretos com ARCO apresentaram menor trabalhabilidade em relação ao concreto convencional. Essa influência dos agregados reciclados na consistência do concreto tem relação com sua maior absorção de água. A NBR 8953 (2015) baliza que concretos para fins estruturais com lançamento convencional (classe S100) devem apresentar abatimento de 100 a 160 mm, e, conforme os resultados obtidos, as quatro lajes estudadas atenderam aos requisitos normativos em todas as betonadas. Ressalta-se que apesar das substituições feitas, foi possível manter as características semelhantes para os concretos produzidos, com as adaptações realizadas.

4.4 Ensaios do concreto no estado endurecido

A análise estatística descritiva dos resultados obtidos acerca da resistência à compressão do concreto está descrita na Tabela 4.4 e resumida na Figura 4.1.

Tabela 4.4 – Resistência à compressão axial dos concretos.

f_c (MPa)	Laje	Média	Desvio-padrão	Shapiro-Wilk	
				W	p
	SS0	22,5	2,556	0,919	0,53
	SS100	23	0,911	0,93	0,58
	ST0	20,1	0,775	0,986	0,936
	ST100	17,6	1,774	0,811	0,099

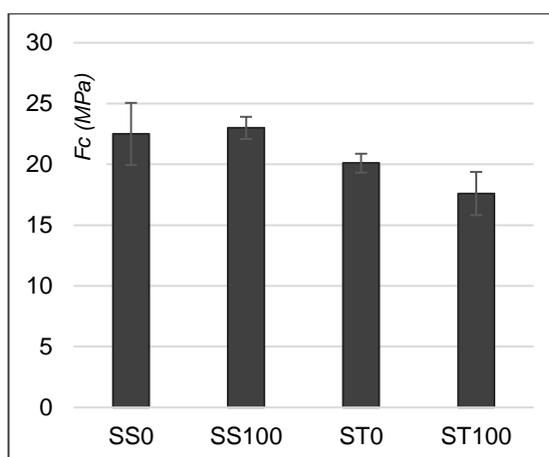


Figura 4.1 – Resistência à compressão axial dos concretos de cada laje (Autora, 2023).

Analisando os valores apresentados para a resistência à compressão dos concretos, nota-se que os mesmos apresentam variação máxima de 23,5% entre a maior e menor resistência, sendo que o concreto da laje SS100 foi o que apresentou maior resistência à compressão e o concreto da laje ST100 foi o que apresentou menor resistência à compressão, e ambas contêm ARCO. Esse resultado está de acordo com a literatura técnica, que aponta que o valor da resistência à compressão não é muito influenciado quando da utilização apenas da parte graúda do ARCO. A análise estatística descritiva dos resultados obtidos acerca da resistência à tração do concreto está descrita na Tabela 4.5 e resumida na Figura 4.2.

Tabela 4.5 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos.

f_{ct} (MPa)	Laje	Média	Desvio-padrão	Shapiro-Wilk	
				W	p
	SS0	3,73	0,490	0,929	0,587
	SS100	5,87	0,234	0,924	0,534
	ST0	4,61	0,899	0,799	0,100
	ST100	4,56	0,471	0,923	0,551

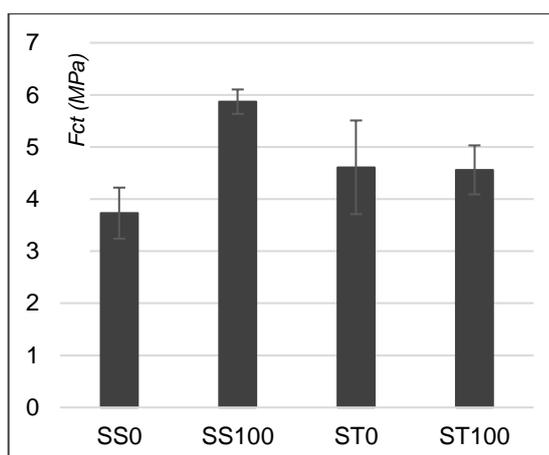


Figura 4.2 – Resistência à tração dos concretos de cada laje (Autora, 2023).

A resistência à tração sofreu uma ligeira redução com a incorporação do ARCO, seguindo um padrão semelhante aos resultados de compressão, exceto pela laje SS0 que apresentou a menor resistência à tração entre as lajes estudadas, mesmo sendo produzida apenas com agregado natural, o que pode ser explicado por incerteza experimental, visto que não foi um resultado tão dessemelhante dos demais. A análise estatística descritiva dos resultados obtidos acerca do módulo de elasticidade do concreto está descrita na Tabela 4.6 e resumida na Figura 4.3.

Tabela 4.6 – Módulo de elasticidade dos concretos.

E (GPa)	Laje	Média	Desvio-padrão	Shapiro-Wilk	
				W	p
	SS0	20,9	1,917	0,982	0,911
	SS100	21,3	1,149	0,984	0,759
	ST0	20,7	2,298	0,959	0,609
	ST100	19,1	0,466	0,995	0,870

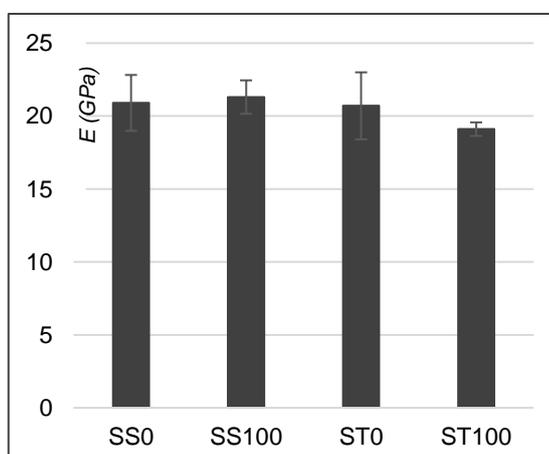
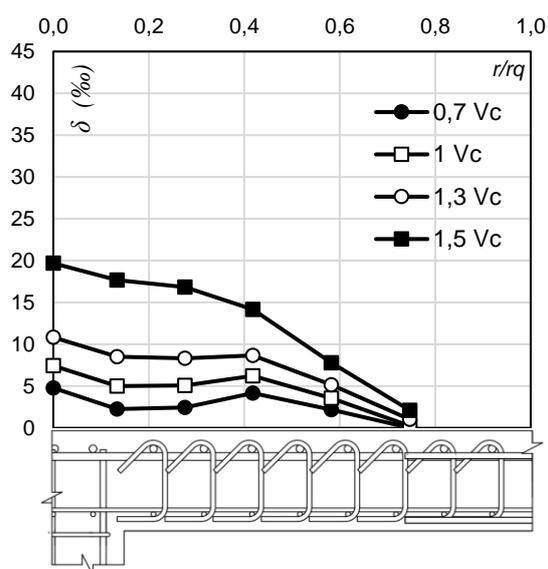


Figura 4.3 – Módulo de elasticidade dos concretos de cada laje (Autora, 2023).

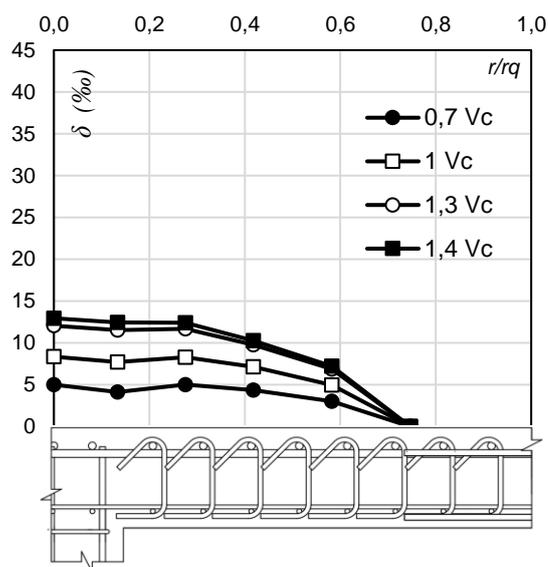
No que diz respeito ao módulo de elasticidade dos concretos produzidos, verificou-se que não houve discrepâncias consideráveis entre os resultados obtidos, visto que a diferença máxima entre o maior módulo (SS100) e o menor (ST100) foi de 10,3%, sendo que ambos os extremos foram notados em lajes com agregado reciclado de concreto. A literatura técnica, acerca desse parâmetro, diz que a inserção de agregado reciclado de concreto tende a reduzir o módulo de elasticidade dos concretos produzidos, indicando diminuição da rigidez das peças. No entanto, nesta pesquisa esse comportamento não ficou tão evidente, o que pode ser justificado pela variabilidade experimental. Ressalta-se que apesar das substituições feitas, foi possível manter as características semelhantes para os concretos produzidos, com as adaptações realizadas.

4.5 Deslocamentos verticais nas lajes

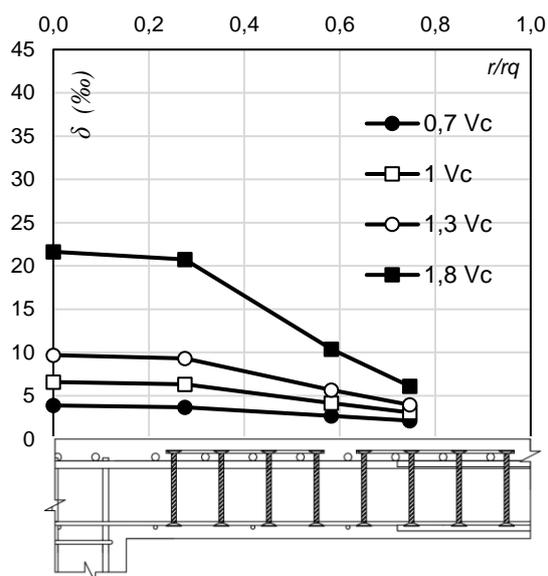
A Figura 4.4 mostra a média de perfil de deslocamentos dos dois sentidos das lajes ensaiadas em função da razão do raio da laje pelo raio de carregamento (r/r_q). A leitura dos dados se deu continuamente, em todo o ensaio, no entanto, na imagem a seguir os dados serão mostrados em formato de passos de cargas em função da carga de ruptura da laje de referência, a LBF0 de Ribeiro Júnior (2022), sem agregado reciclado e sem armadura de cisalhamento (V_c) até a carga de ruptura das lajes.



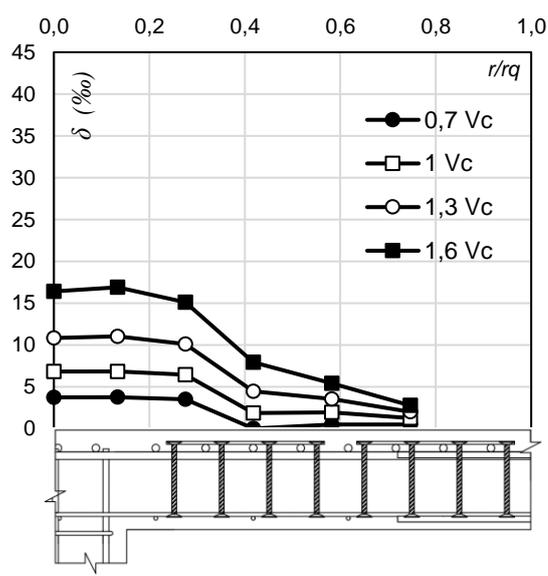
a) ST0



b) ST100



c) SS0



d) SS100

Figura 4.4 – Perfil carga-deslocamento das lajes testadas (Autora, 2023).

Observando a Figura 4.4, verifica-se que os LVDT's localizados na face do pilar não exibiram resultados semelhantes aos LVDT's do centro do pilar, o que pode ser justificado devido aos efeitos de deformações de cisalhamento adjacente a face do pilar, como ocorreu nos ensaios de Pereira Filho (2021) e conforme observado por Lips, Ruiz e Muttoni (2012). Destaca-se também que durante os ensaios da laje SS0 houve perda de algumas leituras, fazendo com que não fosse possível gerar um

gráfico com tanta precisão como as demais, no entanto, ainda assim, nota-se uma tendência de comportamento semelhante às demais.

A Figura 4.5 mostra o comportamento carga-deslocamento das lajes ensaiadas, a fim de avaliar o desempenho das armaduras de cisalhamento na rigidez das lajes e a influência do ARCO no comportamento delas. A carga última usada como referência foi a da laje LBF0, essa laje faz parte da série de ensaios de Ribeiro Júnior (2022) e possui taxa de armadura de flexão 1,4, sem ARCO e sem armadura de cisalhamento. O gráfico também apresenta a laje produzida por Ribeiro (2022) contendo ARCO, com a taxa de armadura de flexão de 1,4 e sem armadura de cisalhamento, para fins de comparação.

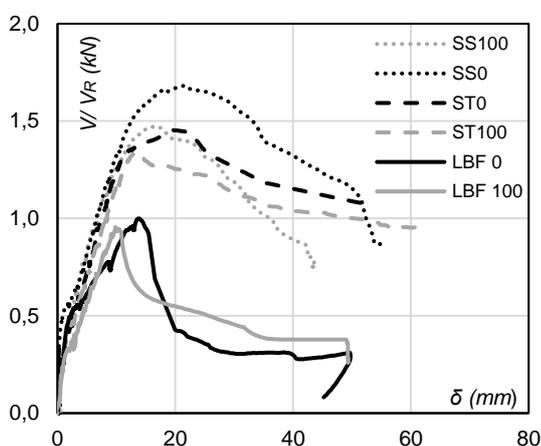


Figura 4.5 – Comportamento carga-deslocamento das lajes testadas (Autora, 2023).

A laje com agregado reciclado e sem armadura de cisalhamento (LBF100) foi a que rompeu de forma mais brusca, com a menor carga de ruptura e segunda menor ductilidade, quando comparada às demais. A laje de referência (LBF0), sem agregado reciclado e sem armadura de cisalhamento também teve ruptura frágil. O comportamento de ambas em relação às demais já era esperado, uma vez que a inserção da armadura de cisalhamento, de acordo com a literatura técnica, tende a conferir maior ductilidade ao modelo.

A laje SS0, armada com *double headed studs*, foi a que apresentou melhor desempenho, atingindo 1,68 vezes a resistência da laje de referência e sua capacidade de deformação antes da ruína foi 64% maior que a da LBF0. Por outro lado, dentre as lajes armadas ao cisalhamento a ST100, com estribos e ARCO, alcançou níveis de resistência mais baixos em comparação com as outras lajes, ainda

assim, o incremento de resistência atingido foi relevante, chegando a 1,33 vezes a capacidade resistente medida para a laje LBF0. Já a ruptura mais frágil foi a da laje SS100, com *double headed studs* e ARCO, sua capacidade de deformação antes da ruína foi menor que a das outras lajes com e sem armadura de cisalhamento, sendo 21% menor que a da laje LBF0.

Em resumo, as lajes com *double headed studs* apresentaram os maiores incrementos de carga. As lajes com estribos individuais (ST0 e ST100) apresentaram a maior ductilidade pós pico. Observou-se também que as lajes sem agregado reciclado apresentaram incremento superior às lajes sem 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: 1,68 para SS0, 1,47 para SS100, 1,45 para ST0 e 1,33 para ST100.

4.6 Deformações no aço e no concreto

4.6.1 Deformações na armadura de flexão e na superfície do concreto

O comportamento à flexão das lajes SS0, SS100, ST0 e ST100 é mostrado nas Figuras a seguir. A Figura 4.6 , mostra os perfis de deformações circunferenciais nas barras de flexão (ε) 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.

Pode-se notar que, de maneira geral, não houve muita solicitação das armaduras de flexão, mesmo na laje SS0, que apresentou maiores resistência e ductilidade, apresentando o maior raio de escoamento das barras, com escoamento de somente duas camadas de armadura de flexão, afastando, portanto, a possibilidade de ruína por flexão por esgotamento da capacidade resistente 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.

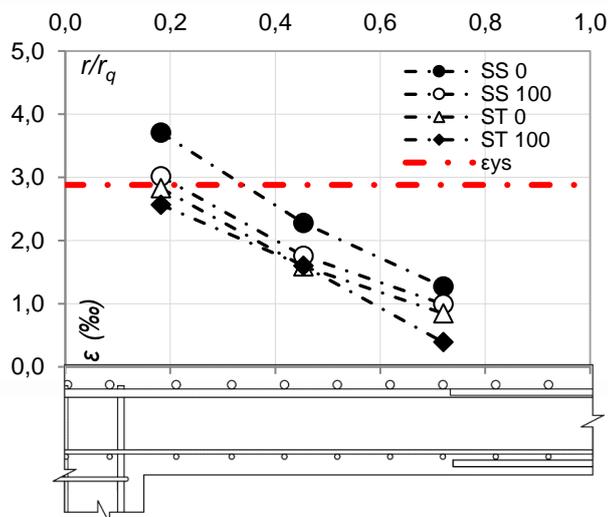


Figura 4.6 – Perfis de deformação circunferencial nas barras de flexão (Autora, 2023).

No que diz respeito às deformações na superfície concreto, os valores aferidos afastam a possibilidade de esmagamento do concreto em peças submetidas à flexão. Além disso, ressalta-se ainda que as maiores deformações foram registradas nas proximidades dos pilares. A Figura 4.7 mostra os perfis de deformações na superfície do concreto em função da razão do raio de medição pelo raio de carregamento, considerando a deformação no instante da carga de ruptura de cada laje. Os valores positivos obtidos podem ser explicados, de acordo com Muttoni (2008), devido ao surgimento de tensões de tração, pouco antes do puncionamento.

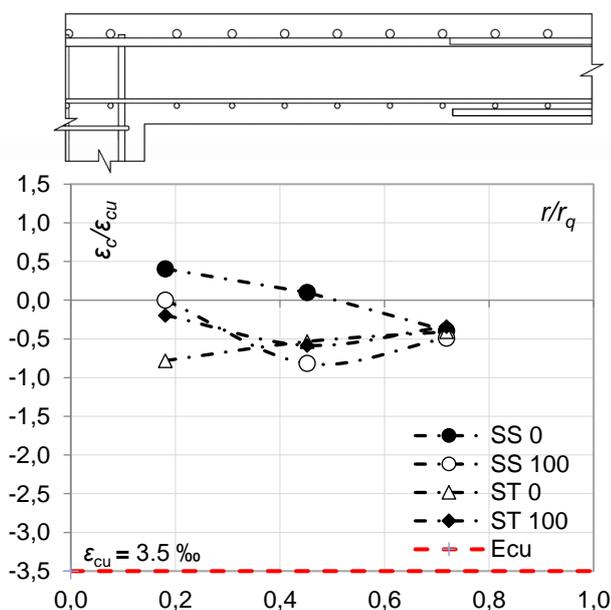


Figura 4.7 – Perfis de deformação na superfície do concreto (Autora, 2023).

A Figura 4.8, bem como a Figura 4.9, a Figura 4.10 e a Figura 4.11, mostram a relação carga-deformação das barras de flexão instrumentadas e ainda na superfície de concreto para cada laje, individualmente.

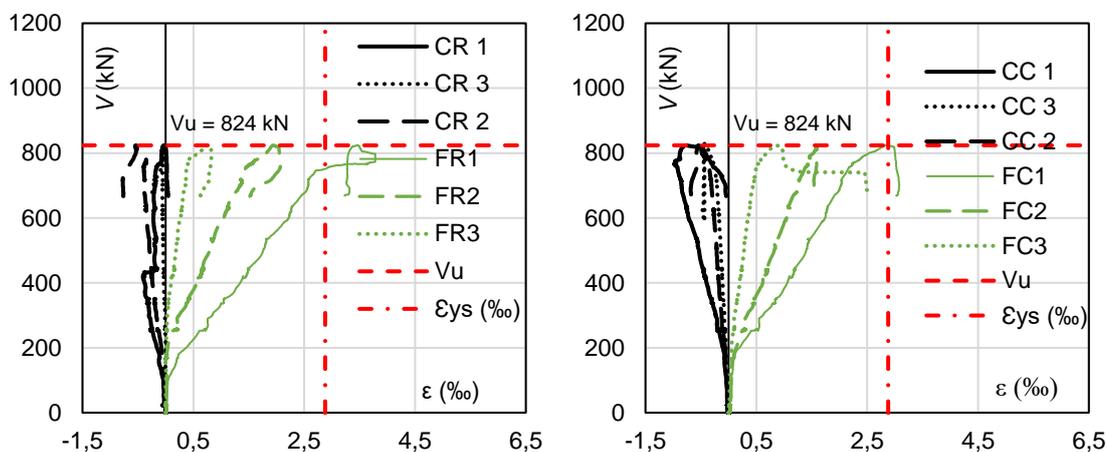


Figura 4.8 – Deformações na armadura tracionada e superfície de concreto da laje ST0 (Autora, 2023).

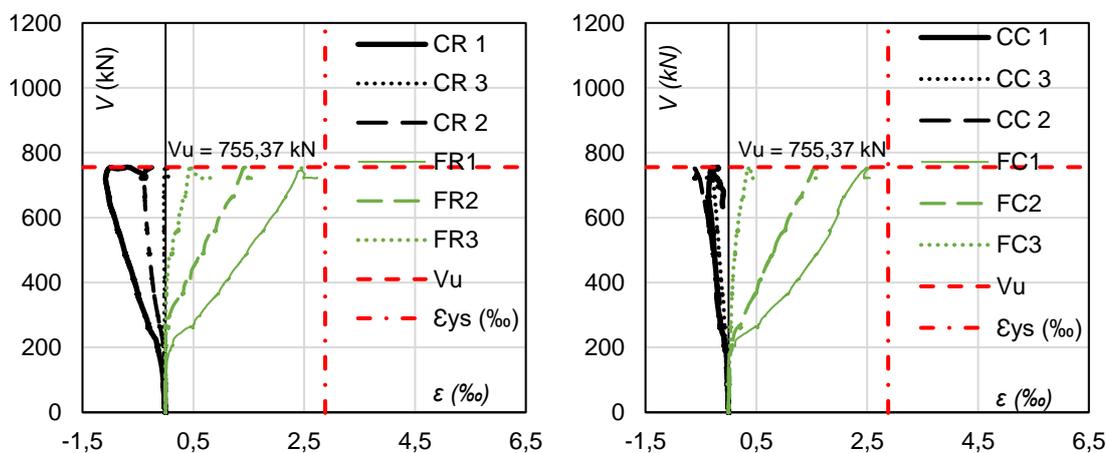


Figura 4.9 – Deformações na armadura tracionada e superfície de concreto da laje ST100 (Autora, 2023).

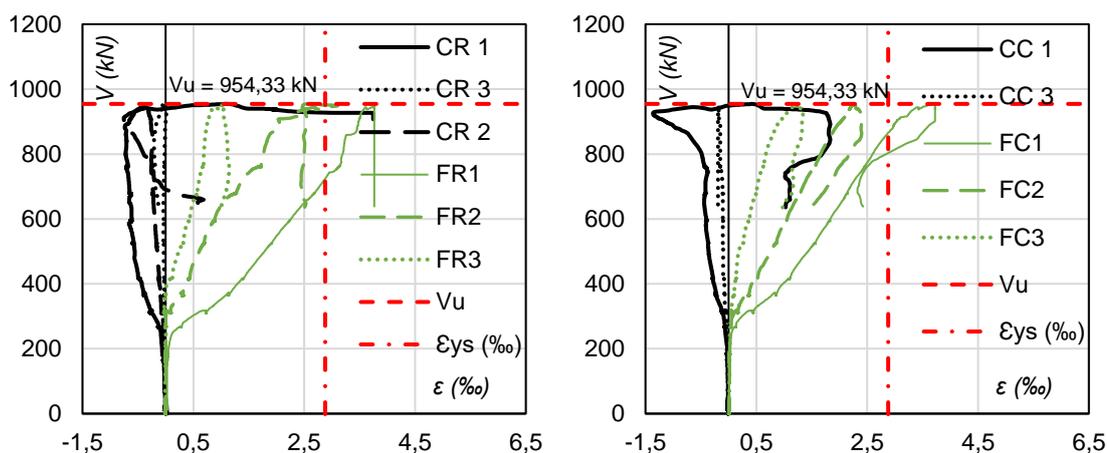


Figura 4.10 – Deformações na armadura tracionada e superfície de concreto da laje SS0 (Autora, 2023).

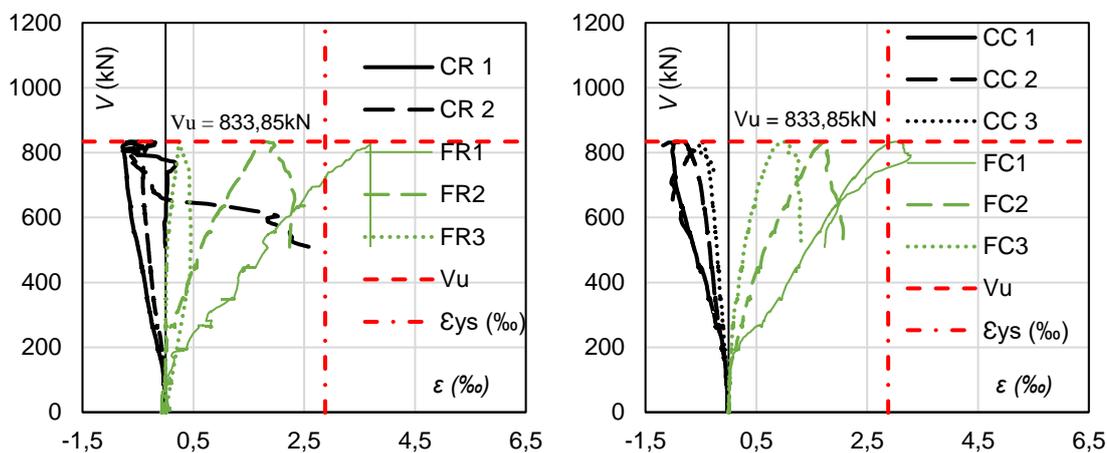


Figura 4.11 – Deformações na armadura tracionada e superfície de concreto da laje SS100 (Autora, 2023).

4.6.2 Deformações na armadura de cisalhamento

A Figura 4.12 mostra as deformações médias por camada de armadura de cisalhamento das lajes e a Figura 4.13 mostra os perfis de deformações ao longo da laje em função da distância entre as camadas de armadura (s) de cisalhamento pela altura útil de cada laje (d).

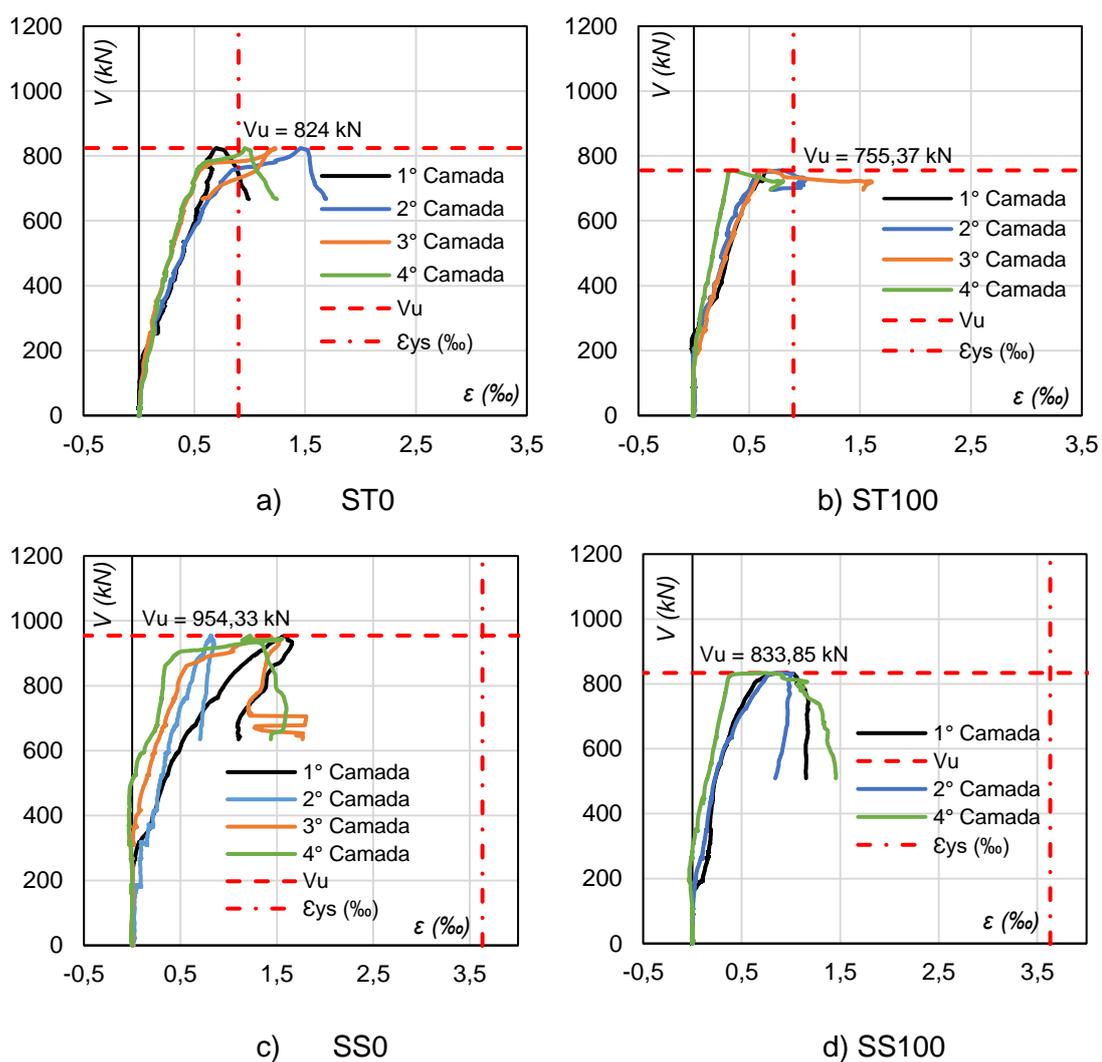


Figura 4.12 – Comportamento carga-deformação das lajes testadas (Autora, 2023).

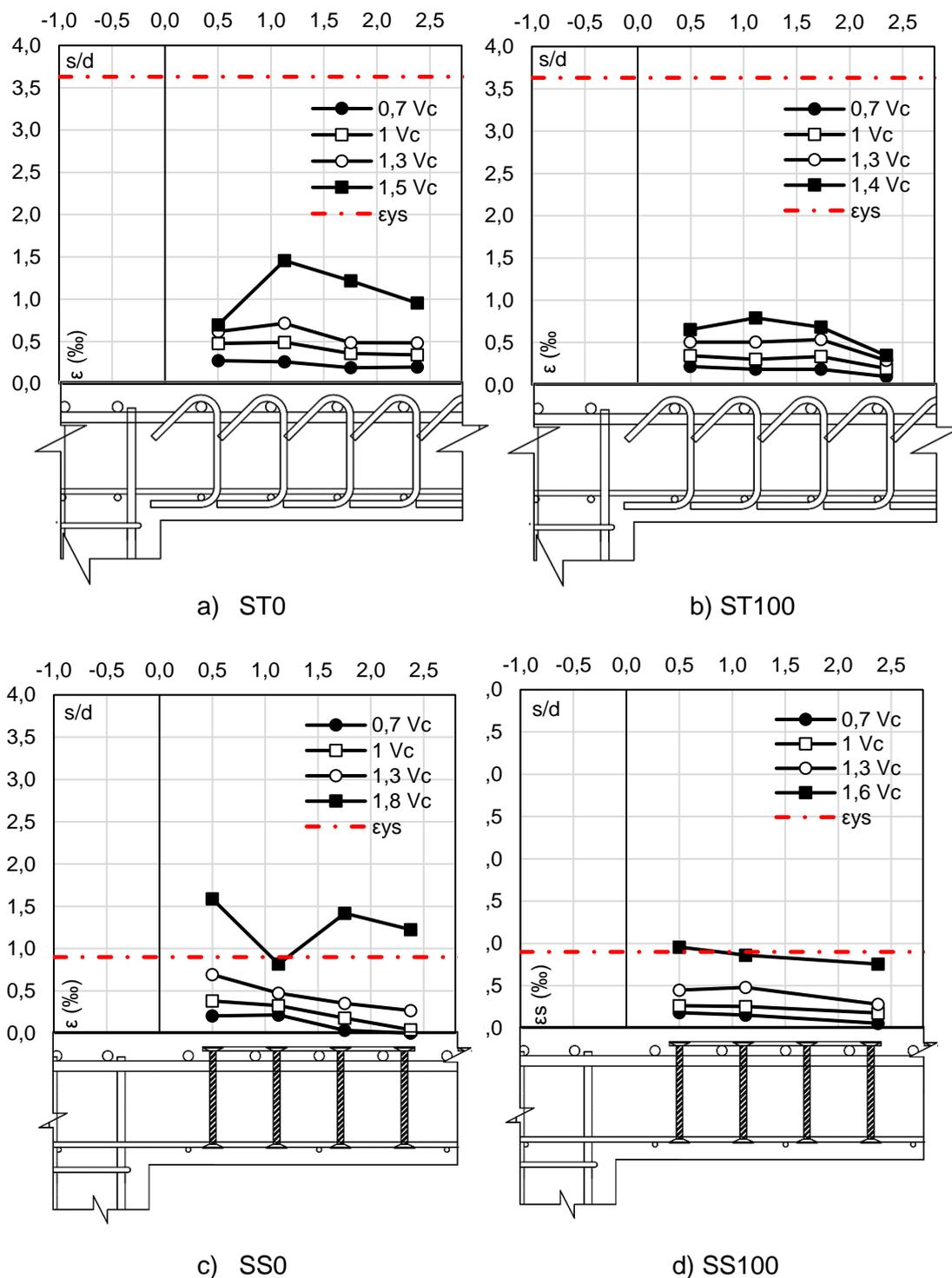


Figura 4.13 – Perfil de deformações de cisalhamento das lajes testadas (Autora, 2023).

Nas lajes confeccionadas com *double headed studs* (SS0 e SS100), foi possível identificar um comportamento que indica a ruptura por arrancamento do cone de concreto, que ocorre de forma frágil, como mostrado nos gráficos de comportamento carga-deformação, e pode ser afetada tanto pela resistência do material quanto pelo tipo de agregado (Figura 4.14). Destaca-se também, que devido

perda de leitura dos dados referentes à terceira camada da armadura de cisalhamento da laje SS100 os mesmos não foram apresentados na imagem correspondente.



Figura 4.14 – Ruptura por arrancamento do cone de concreto, SS0 (Autora, 2023).

Já nas lajes com estribo individual (ST0 e ST100) é possível verificar um comportamento diferente, uma espécie de patamar próximo à solicitação máxima, o que indica a possibilidade de ter ocorrido um desdobramento da armadura (como parece indicar a Figura 4.15) esse comportamento é ainda mais evidente na laje com substituição total de agregado graúdo natural pelo reciclado de concreto.



Figura 4.15 – Possível desdobramento da armadura (Autora, 2023).

4.7 Fissuração das lajes

O padrão de fissuração dos modelos ensaiados foi mapeado, para isso, durante o ensaio realizou-se o monitoramento da abertura das fissuras com o auxílio de um fissurômetro. Durante a execução dos ensaios, o carregamento foi aplicado de maneira contínua e, conforme cada passo de carga, houve intervalos específicos para acompanhar a fissuração de cada laje. As fissuras monitoradas foram as de flexão

adjacente à face do pilar e uma das radiais, além da fissura de cisalhamento tangencial.

O comportamento quanto à fissuração das lajes ensaiadas pode ser visualizado na Figura 4.16, através do gráfico carga versus abertura de fissuras. A Figura 4.17, por sua vez, mostra o mapa de fissuração das lajes ensaiadas, na forma de desenhos feitos em computador feitos a partir da sobreposição das imagens reais das lajes.

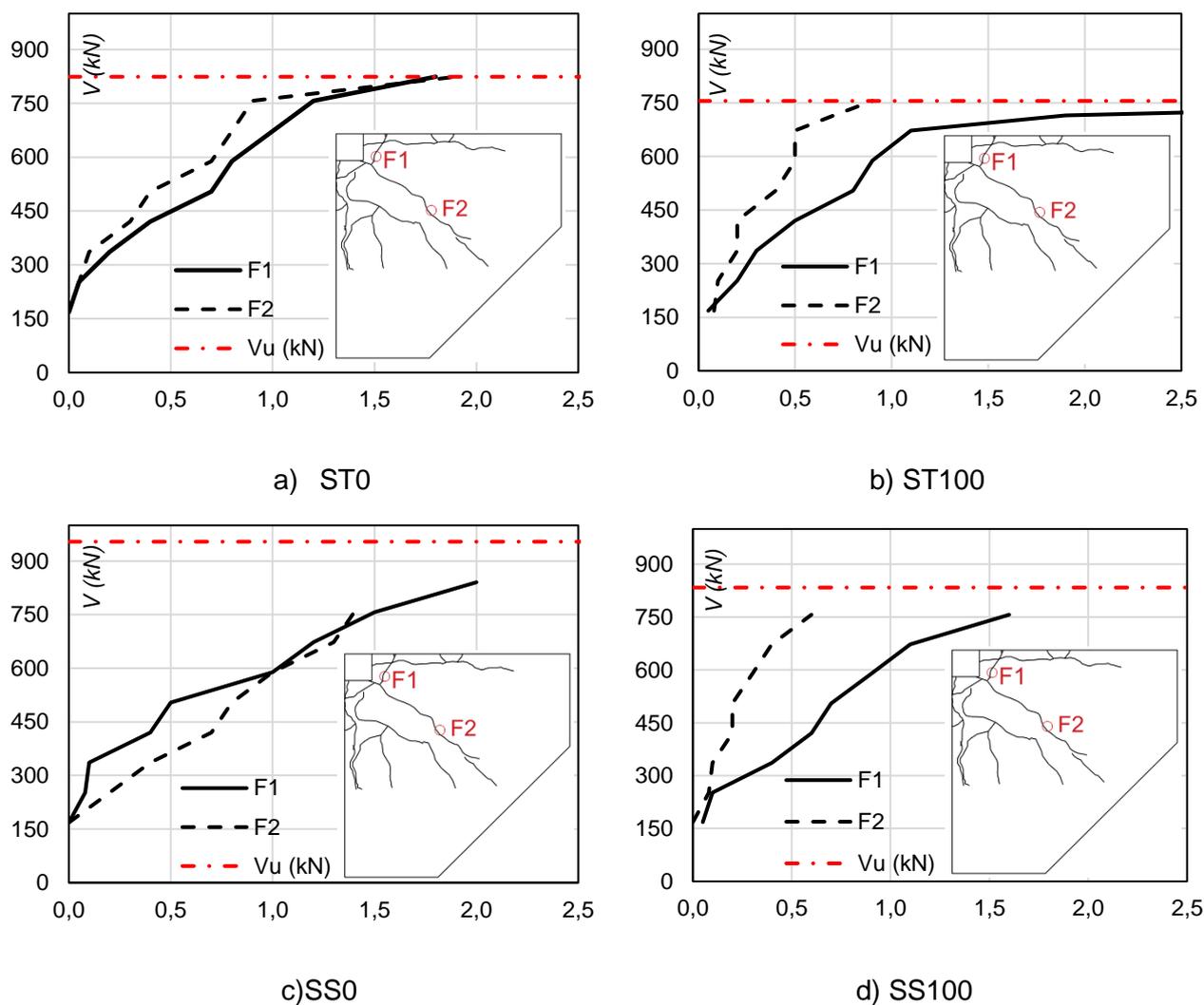


Figura 4.16 – Carga versus abertura de fissura (Autora, 2023).

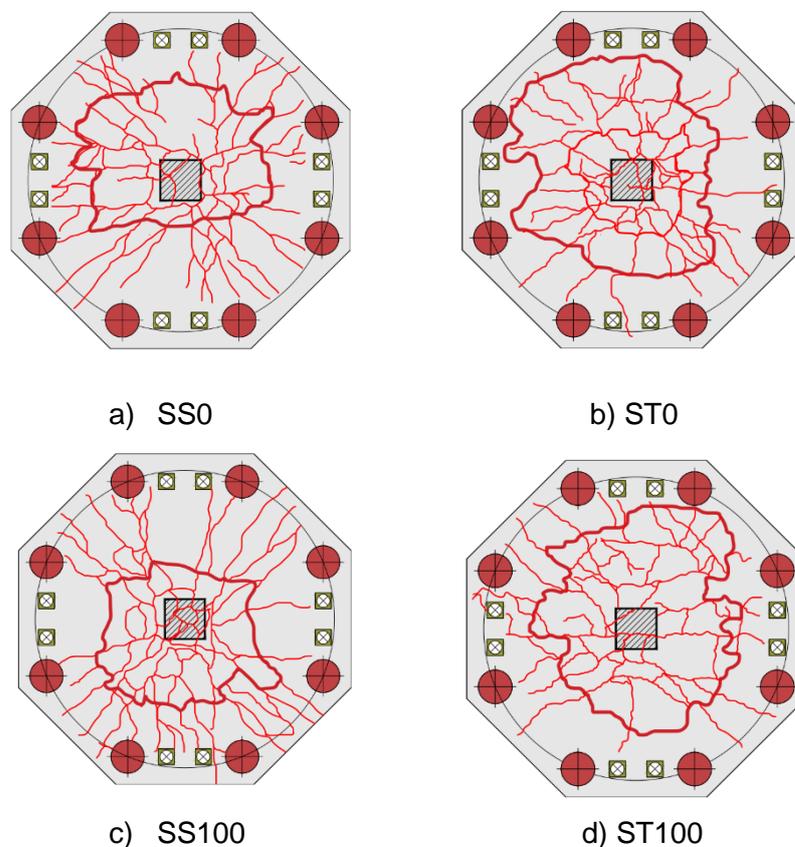


Figura 4.17 – Mapa de fissuração das lajes (Autora, 2023).

Inicialmente, por volta dos 150 kN, apareceram as primeiras fissuras. A primeira fissura a surgir foi ocasionada pelo momento radial, trata-se de uma fissura tangencial que contorna o pilar, em seguida apareceram as fissuras radiais, decorrentes do momento circunferencial. Finalmente, outras fissuras tangenciais apareceram, em diferentes níveis de carregamento próximos ao colapso, conforme explicado por Mueller *et al.* (1984).

O comportamento foi parecido para todas as lajes. Observando as figuras foi possível concluir que embora as fissuras de todas as lajes tenham surgido com carga similar, percebeu-se que nas lajes com *double headed studs* o concreto teve maior relevância no controle da abertura e da propagação das fissuras quando comparadas às lajes com estribo.

Destaca-se que após seu aparecimento, as fissuras se comportaram de maneira estável até o momento do colapso. Percebeu-se ainda que as armaduras de cisalhamento estabilizaram a fissura tangencial que mostrou crescimento constante até o final do ensaio.

De acordo com Eligehausen e Balogh (1995), *apud* Pereira Filho (2021), a armadura de cisalhamento pode funcionar como entalhos no concreto, gerando zonas de fragilidade. Devido limitações técnicas não foi possível realizar o corte das lajes, entretanto as análises dos resultados experimentais e o cálculo teórico das resistências, indicam que todas as lajes romperam por punção.

4.8 Comparações entre os resultados experimentais e as prescrições normativas

A Tabela 4.7 mostra um resumo dos resultados de resistência à punção obtidos experimentalmente (v_u) e faz um comparativo entre esses dados e as estimativas obtidas por meio das normas analisadas, descritas no item 2.2.2 do Capítulo 2, a saber: ACI, EC2, NBR, o nível III de aproximação do MC10 além da previsão de ruptura por flexão. Destaca-se que a tabela contém apenas as resistências teóricas calculadas para falhas dentro da zona das armaduras de cisalhamento, ou por tração diagonal ($V_{R,cs}$) ou por esmagamento da biela próxima ao pilar ($V_{R,max}$), uma vez que as peças foram preliminarmente dimensionadas para não haver ruptura na região externa às armaduras de cisalhamento ($V_{R,out}$).

Uma alternativa desejável para analisar mais profundamente as lajes testadas determinando seu plano de ruptura seria a realização do corte das mesmas, no entanto, não foi possível realizá-lo devido limitações técnicas na região onde foram realizados os ensaios, todavia utilizou-se das estimativas normativas e das análises dos resultados experimentais para classificar os modos de ruptura das lajes ensaiadas, indicando que todas as lajes romperam por punção.

Tabela 4.7 – Cargas experimentais e teóricas e modos de ruptura das lajes ensaiadas.

Laje	LBF0	SS0	SS100	ST0	ST100
Armadura de cisalhamento	-	Double Headed Stud	Double Headed Stud	Estribo individual	Estribo individual
V_u (kN)	562,52	954,33	833,85	824,00	755,37
Modo de Ruptura	Pun	In	In	In	In
V_u / V_c	1,00	1,70	1,48	1,46	1,34
V_u / V_{flex}	0,39	0,59	0,52	0,53	0,49
EC2	$V_u / V_{R,cs}$	-	1,05	0,95	0,98
	$V_u / V_{R,max}$	0,56	0,92	0,88	0,97
	$V_u / V_{R,EC2}$	0,97	1,05	0,95	0,98
	Modo de Ruptura	Pun	In	In	In
ACI	$V_u / V_{R,cs}$	-	0,85	0,76	0,96
	$V_u / V_{R,max}$	-	0,98	0,90	1,25
	$V_u / V_{R,ACI}$	1,20	1,03	0,90	1,25
	Modo de Ruptura	Pun	Max	Max	Max
MC10	$V_u / V_{R,cs}$	1,03	0,62	0,55	0,44
	$V_u / V_{R,max}$	-	0,91	0,82	0,93
	$V_u / V_{R,MC10}$	1,03	0,91	0,82	0,93
	Modo de Ruptura	Pun	Max	Max	Max
NBR	$V_u / V_{R,cs}$	-	0,70	0,62	0,67
	$V_u / V_{R,max}$	0,41	0,68	0,65	0,72
	$V_u / V_{R,NBR}$	0,90	0,70	0,65	0,72
	Modo de Ruptura	Pun	In	Max	Max

Onde:

Pun indica tração diagonal nas lajes sem armadura de cisalhamento;

In indica tração diagonal nas lajes dentro da região das armaduras de cisalhamento;

Max indica o esmagamento da biela próxima ao pilar;

Flex indica ruptura por flexão.

Conforme mencionado anteriormente, analisando os resultados apresentados, constata-se que todas os espécimes ensaiados romperam por punção.

A laje SS0 foi a que se aproximou mais da carga de flexão com $0,59 v_u / v_{flex}$, dessa forma, descartou-se a possibilidade das demais lajes terem rompido por flexão.

Quanto à possibilidade de ruptura por esmagamento da biela próxima ao pilar, essa

também foi descartada visto que as deformações internas no concreto foram todas maiores que -1% .

A fim de avaliar o desempenho e realizar comparação entre as equações normativas de dimensionamento à punção nas lajes lisas de concreto armado, foi empregado como parâmetro um estudo feito por Collins (2001). A metodologia do autor classifica critérios normativos distintos, avaliando a segurança, precisão e economia dos resultados.

Collins (2001) realiza a classificação dos procedimentos de dimensionamento em termos de uma escala de demérito, atribuindo faixas de penalidade para as relações entre as cargas experimentais e teóricas ($V_{R,exp} / V_{R,teo}$). Essa penalidade baseia-se no entendimento de que uma relação $V_{R,exp} / V_{R,teo}$ inferior a 0,5 é bem pior, em termos de segurança, quando comparada a uma relação superior a 2,0.

No entanto, valores demasiadamente conservadores são penalizados com 2,0, assim como a classificação de baixa segurança, por serem antieconômicos. O valor de demérito de cada procedimento é obtido através do somatório do $V_{R,exp} / V_{R,teo}$, existente em cada intervalo, por sua respectiva penalidade. Quanto maior o valor do somatório total, pior é considerado o processo normativo. A Tabela 4.8 mostra a escala de penalidade de acordo com Collins (2001).

Tabela 4.8 – Escala de penalidade de Collins (2001).

$V_{R,exp}/V_{R,teo}$	Classificação	Penalidade
< 0,50	Extremamente perigoso	10
[0,50-0,65]	Perigoso	5
[0,65-0,85]	Baixa segurança	2
[0,85-1,30]	Segurança apropriada	0
[1,3-2,00]	Conservador	1
$\geq 2,00$	Extremamente conservador	2

Dessa forma, a Tabela 4.9, mostra o resumo da avaliação do desempenho dos métodos teóricos, ponderados conforme o critério de Collins (2001), denominado *Demerit Points Classification* (DPC).

Tabela 4.9 – Classificação das lajes ensaiadas segundo o critério de Collins (2001).

$V_{R,exp} / V_{R,teo}$		<0,5	[0,50-0,65]	[0,65-0,85]	[0,85-1,30]	[1,30-2,00]	>2,00	Total
EC2	Nº de Lajes	0	0	0	4	0	0	4
	Penalidade total	0	0	0	0	0	0	0
ACI	Nº de Lajes	0	0	0	4	0	0	4
	Penalidade total	0	0	0	0	0	0	0
MC10	Nº de Lajes	0	0	1	3	0	0	4
	Penalidade total	0	0	2	0	0	0	2
NBR	Nº de Lajes	0	0	4	0	0	0	4
	Penalidade total	0	0	8	0	0	0	8

Analisando conjuntamente as tabelas apresentadas, pode-se concluir que as previsões para as lajes a partir das normas ACI 318 e *Eurocode 2* (2014) se comportaram de forma similar, com todas as lajes enquadradas na faixa de segurança apropriada. Entende-se que a segurança do EC 2 e do ACI foi garantida devido as limitações conservadoras utilizadas em suas equações, que explicam a resistência máxima do suporte de concreto. Para o EC2, estimativas de segurança foram obtidas devido aos limites considerados para o cálculo da armadura de cisalhamento ($VRcs < 1,5VRc$).

Nas estimativas baseadas no MC10, por sua vez, quase todas as lajes atenderam ao critério de segurança, exceto pela SS100, cuja relação ($V_{R,exp} / V_{R,teo}$) foi de 0,82, considerada com baixa segurança, de acordo com o critério de Collins (2001). A segurança obtida, considerando o nível III do MC10, advém das estimativas de segurança para as lajes armadas com estribos treliçados pré-fabricados, obtidas por meio da consideração de k_{sys} igual a 2,0, cujo valor é recomendado para armadura de cisalhamento com ausência de dados experimentais. A NBR 6118 (2023) apresenta resultados contra a segurança para todas as lajes.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 *Comportamento geral das lajes à punção*

5.1.1 **Comportamento carga-deslocamento das lajes testadas**

Realizou-se o monitoramento dos deslocamentos verticais em 11 pontos na superfície das lajes, posicionados sempre de maneira semelhante, fixados em perfis metálicos, para funcionar como um *yoke* e possibilitar a construção de perfis de deslocamento. O deslocamento no centro do pilar foi monitorado pelo LVDT 6, pelo qual aferiu-se o deslocamento máximo nas lajes.

Nesse contexto, no que diz respeito à distribuição e quantidade de deflectômetros e potenciômetros empregados para a leitura dos deslocamentos, essas apresentaram comportamento coerente para a relação carga-deslocamento e mostraram-se satisfatórias. De forma que os LVDT's localizados nas faces dos pilares apresentaram menor deslocamento se comparados aos localizados no centro do pilar, o que já se esperava, levando-se em conta os efeitos de deformações de cisalhamento adjacente à face do pilar, conforme ocorreu na análise experimental de outros autores da literatura como Lips, Ruiz e Muttoni (2012) e Pereira Filho (2021).

Vale ressaltar ainda que, a inserção de ARCO nas lajes, não mostrou, nesta pesquisa, influência tão significativa na relação carga-deslocamento, embora as lajes sem ARCO tenham apresentado incremento de carga ligeiramente superior às lajes com agregado reciclado. Já em relação à inserção de armadura de cisalhamento, notou-se nitidamente melhor desempenho, a exemplo da maior carga de ruptura e maior ductilidade nas lajes com armadura de cisalhamento, quando comparadas às lajes sem este tipo de armadura (lajes LBF0 e LBF100 de Ribeiro Júnior (2021)).

Analisando os resultados obtidos nesta pesquisa, de maneira mais aprofundada, acerca do comportamento à punção das lajes lisas com armadura de cisalhamento com substituição total de agregados graúdos naturais por agregados reciclados de concreto verificou-se ainda que as maiores capacidades resistentes à punção quanto ao uso de armadura de cisalhamento foram das lajes lisas fabricadas com *double headed studs* em detrimento das fabricadas com estribos individuais, sendo que a laje com maior carga de ruptura (SS0), chegou a superar em 1,26 vezes

a capacidade resistente medida para a laje com a menor carga de ruptura (ST100), apresentando respectivamente $V_u = 954,33kN$ e $V_u = 755,37kN$.

Quando comparadas à laje de referência sem armadura de cisalhamento e sem ARCO (LBF0, produzida por Ribeiro Júnior (2022), denominada pelo autor de S-1,4%-0) todos os espécimes produzidos apresentaram resistência à punção superiores, com o menor valor (ST100) superando em 1,34 vezes o da laje de referência, que apresentou $V_u = 562,52kN$.

Observou-se ainda, conforme mencionado, que as lajes com substituição total de agregados graúdos naturais por agregados reciclados de concreto apresentaram capacidades resistentes à punção ligeiramente inferiores às das lajes com agregado natural, e que sua ruptura é mais frágil, corroborando com os resultados encontrados por Lu, Zong e Du (2014). A diferença entre as cargas de ruptura das lajes com mesma armadura de cisalhamento foi de 12,6% para as lajes com *double headed studs* e 8,3% para as com estribo individual.

5.1.2 Deformações no concreto e nas armaduras

Foi possível observar que em nenhuma das lajes houve ruptura por esmagamento do concreto e que as maiores deformações foram registradas nas proximidades dos pilares. Verificou-se ainda, comparando os dados obtidos nesta pesquisa com os de Ribeiro Júnior (2022), que a utilização da armadura de cisalhamento promove um aumento considerável em relação à ductilidade da ligação laje-pilar, dessa forma, observou-se que quando não há o emprego da armadura de cisalhamento a ligação laje-pilar torna-se muito mais suscetível a ruptura frágil, em outras palavras, sem maiores avisos relacionados às deformações, corroborando com resultados encontrados na literatura, como Oliveira (2013), por exemplo.

5.1.3 Fissuração

Observou-se em todas as lajes, um padrão de fissuração no qual a primeira fissura visível aconteceu entre a laje e as faces do pilar sob valores de carga ligeiramente superiores a 10% da carga última resistida pela laje, conforme observado por Oliveira (2013). Na sequência, ocorreu a fissuração radial, nos cantos do pilar em direção à borda da laje, propagando-se nos quatro quadrantes da lajes, de maneira

relativamente simétrica. Observa-se ainda que, após a análise dos resultados, foi possível concluir que, embora as fissuras de todas as lajes tenham surgido com carga similar, percebeu-se que nas lajes com *double headed studs* o concreto teve maior relevância no controle da abertura e da propagação das fissuras quando comparadas às lajes com estribo.

5.2 Comparações entre as previsões normativas e os resultados experimentais

Acerca da comparação entre a estimativa da capacidade resistente à punção das lajes lisas com armadura de cisalhamento com ARCO graúdo prescritos pelas normas *fib Model Code 2010* (2013), ABNT NBR 6118 (2023), *Eurocode 2* (2014) e ACI 318 (2019) e os resultados obtidos pelo programa experimental, observou-se que as quase todas as previsões normativas apresentaram valores bem próximos aos experimentais, exceto pela norma brasileira, que indicou que as lajes apresentaram valores contra a segurança.

Para análise do desempenho das lajes foi utilizado como parâmetro um estudo feito por Collins (2001), conforme apresentado, além disso, para avaliar os coeficientes de variação para os resultados de cada uma das lajes utilizou-se a classificação de Gomes (1990) na qual os coeficientes de variação são considerados como baixos quando inferiores a 10%, médios entre 10 e 20%, altos entre 20 e 30% e muito altos se superiores a 30%.

Os resultados calculados por meio das estimativas da norma *Eurocode 2*, dentre as normas analisadas, foram os mais precisos para as lajes confeccionadas, apresentando para a relação $V_u/VEC2$ um valor médio de 0,99 e coeficiente de variação de 3,81%. Oliveira (2013) percebeu em seus estudos que o EC2 apresenta uma forte tendência a prever rupturas no perímetro fora da região da armadura de cisalhamento. Ferreira (2010) também percebeu esse comportamento em suas pesquisas.

Nesse contexto, de maneira geral, a literatura aponta que esse fato está associado à estimativa conservadora da verificação da região fora da armadura de cisalhamento considerando um perímetro afastado a uma distância de $1,5d$ da última camada da armadura de cisalhamento, o que indica que essa distância é bastante conservadora.

A norma norte americana ACI 318, de forma geral, dentre todas as estimativas normativas analisadas, apresenta as previsões mais conservadoras, tendo para a relação V_u/V_{ACI} um valor médio de 1,09 e coeficiente de variação com valor de 12,55%. De acordo com Oliveira (2013), esse fato está associado à subestimação das parcelas de resistência à punção tanto do concreto como do aço. Ainda segundo o autor, a relação das parcelas de resistência do concreto $VR_{,c}(ACI) / VR_{,c}(EC2)$ tem valor médio de 0,85 e para a NBR a relação $VR_{,c}(ACI) / VR_{,c}(NBR)$ tem valor médio de 0,79, o que evidencia o quanto o ACI reduz a capacidade resistente do concreto de forma bastante conservadora.

Assim, Oliveira (2013) conclui que, embora o ACI considere de forma mais apropriada a condição de ancoragem dos diferentes tipos de armadura de cisalhamento, o seu conservadorismo com relação à capacidade resistente dos materiais talvez necessite ser reavaliado a fim de evitar níveis exagerados de segurança que podem levar a um dimensionamento demasiadamente oneroso.

Diante disso, em relação aos critérios de dimensionamento à punção, pode-se depreender que a segurança do *Eurocode 2* e do ACI foi assegurada devido as limitações conservadoras empregadas em suas equações, que explicam a resistência máxima do suporte de concreto. Para o *Eurocode 2*, estimativas de segurança foram obtidas devido aos limites considerados para o cálculo da armadura de cisalhamento ($VR_{cs} < 1,5VR_c$).

Em relação ao nível III do MC10, apenas uma das lajes estudadas apresentou resultado contra a segurança, tendo para a relação V_u/V_{ACI} um valor médio de 0,88 e coeficiente de variação com valor de 4,76%. De acordo com a literatura, a segurança obtida advém das estimativas de segurança para as lajes armadas com estribos treliçados pré-fabricados, obtidas por meio da consideração de k_{sys} igual a 2,0, cujo valor é recomendado para armadura de cisalhamento com ausência de dados experimentais.

Finalmente, analisando a NBR 6118 nota-se que esta norma está com um rendimento muito baixo em relação às suas estimativas da carga última de punção, apresentando todos os resultados contra a segurança. A NBR apresentou valor médio de 0,70 para a relação V_u/V_{NBR} e um coeficiente de variação de 4,13%.

5.3 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros:

- A utilização de outros teores de substituição de ARCO, a fim de encontrar um teor ótimo;
- Verificar a influência da pré-molhagem no comportamento mecânico dos concretos produzidos;
- O uso de outros tipos de agregado reciclados, visando a sustentabilidade;
- Utilização de arranjos diferentes ou mesmo outros tipos de armadura de cisalhamento;
- Estudar possíveis adaptações a serem feitas na ABNT NBR 6118 (2023) a fim de alcançar maior segurança em suas previsões;
- Realização do corte das lajes para analisar mais profundamente as lajes testadas, determinando seu plano de ruptura.

6. REFERÊNCIAS

ACI 318. Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan. 2019.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022.** São Paulo, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248: 2003.** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **ABNT NBR 9939: 2011.** Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **ABNT NBR 8953: 2015.** Concreto para fins estruturais. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **ABNT NBR 16889: 2020.** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **ABNT NBR 16916: 2021.** Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. NBR. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **ABNT NBR 15116: 2021.** Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de Cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **ABNT NBR 16972: 2021.** Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **ABNT NBR 16973: 2021.** Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 mm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **ABNT NBR 6118: 2023.** Projeto de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2023.

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

BEHERA, M.; BHATTACHARYYA, S.K.; MINOCHA, A.K.; DEOLIYA, R.; MAITI, S. 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, 2014.

BEUTEL, R.; HEGGER, J. The effect of anchorage on the effectiveness of the shear reinforcement in the punching zone. **Cement & Concrete Composite**, 24, 539- 549, 2014.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Lex: Coletânea de Legislação e Jurisprudência**, São Paulo, 2022.

BRASIL. Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. **Lex: Coletânea de Legislação e Jurisprudência**, São Paulo, 2022.

BUTLER, A. M. **Uso de Agregados Reciclados de Concreto em Blocos de Alvenaria Estrutural**. São Carlos, 2007. 535 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

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

CARVALHO, C.B. **Análise crítica dos critérios normativos de dimensionamento à punção em lajes lisas**. Minas Gerais, 2008. Dissertação (Pós-Graduação) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte, MG.

CAVALHEIRO, A.P. **Contribuição para a implementação de agregado reciclado de concreto em uma empresa de pré-fabricados de concreto**. 2011. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

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

CEN. (2010). EN 1992-1-1:2004/AC:2010. **Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1 General rules and rules for buildings**. Brussels, Belgium.

CEN. (2014). BS EN 1992-1-1:2004 A1:2014. **Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1 General rules and rules for buildings**. Brussels, Belgium.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 307 de 05 de julho de 2002**. Brasília, 2002.

_____. **Resolução nº 348 de 16 de agosto de 2004**. Brasília, 2004.

_____. **Resolução nº 431 de 24 de maio de 2011**. Brasília, 2011.

_____. **Resolução nº 448 de 18 de janeiro de 2012**. Brasília, 2012.

CORDEIRO, Luciana de Nazaré Pinheiro. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2013. 127 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa

de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CORDEIRO, L. N. P.; MASUERO, A. B.; MOLIN, D. C. C. D.; SOUZA, P. S. L.; PAES, I. N. L. Avaliação de processos de misturas de concretos com agregados graúdos reciclados. Porto Alegre, **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, 2017.

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

EOM, T. et al. Punching Shear Tests of Slabs with High-Strength Continuous Hoop Reinforcement. **ACI Structural Journal**, [s.l.], v. 115, n. 5, p.1295-1305, setembro 2018. American Concrete Institute.

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

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

FERREIRA, M. P.; BARROS, R. N. M.; PEREIRA FILHO, M. J. M.; TAPAJÓS, L. S. e QUARESMA, F. S. One-way shear resistance of RC members with unconnected stirrups. **Latin American Journal of Solids and Structures**, [s.l.], v. 13, n. 15, p.2970-2990, dez. 2016.

FRANCESCONI L., PANI L., STOCHINO F. (2016). Punching shear strength of reinforced recycled concrete slabs. **Construction and Building Materials**.

FREITAS, M. V. P. **Análise Experimental dos Limites Superiores de Resistência à Punção de Lajes Lisas de Concreto Armado com Armaduras de Cisalhamento**. 2018. 120 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará. Tucuruí, Pará, 2018.

HUANG, B. WU, H. SHU, X. BURDETTE E.G. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. Elsevier Journal. **Construction and Building Materials**, 2009.

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

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. **JIS A 5021:2018**: Recycled aggregate for concrete-Class H. Japão: Japanese Industrial Standard, 2018. 32 p. Disponível em: https://www.techstreet.com/standards/jis-a-5021-2018?product_id=2035817#jumps. Acesso em: jun. 2022.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. **JIS A 5022:2018**: Recycled aggregate for concrete-Class M. Japão: Japanese Industrial Standard, 2018. Disponível em: <https://standards.globalspec.com/std/10385916/jis-a-5022>. Acesso em: jun. 2022.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. **JIS A 5023:2018**: Recycled aggregate concrete-Class L. Japão: Japanese Industrial Standard, 2018. Disponível em: <https://standards.globalspec.com/std/10385917/jis-a-5023>. Acesso em: jun. 2022.

KINNUNEN, S; NYLANDER, H. **Punching of Concrete Slabs Without Shear Reinforcement**. Transactions N° 158, Royal Institute of Technology, Stockholm.1960.

KUERES, D.; HEGGER, J. Two-parameter kinematic theory for punching shear in prestressed concrete slabs, **Magazine of Concrete Research**, pp. 1-15. 2018.

KUERES, D.; SCHMIDT, P.; HEGGER, J. Two-parameter kinematic theory for punching shear in reinforced concrete slabs with shear reinforcement. **Engineering Structures**, v. 181, p. 216–232, 2019.

LEITE, M.B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa Pós-graduação em engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LINTZ, R. C. C. *et al.* **Estudo do reaproveitamento de resíduos de construção em concretos empregados na fabricação de blocos**. Rev. IBRACON Estrut. Mater., São Paulo, v. 5, n. 2, p. 166-181, abr. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S198341952012000200004&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: jun. 2022. p. 166-181.

LIMA NETO, A. F., 2012. **Punção em Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Capitéis**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.TD. – 003 A/12 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF. 167p.

LUO, J., ZONG, Y., DU, C. **The failure mechanism and finite element analysis of recycled concrete two-way slabs with stud-shear reinforcement**. 2014. Advanced Materials Research Vol 1020 (2014) pp 303-307.

MAHMOUD, Zaki I. *et al.* Punching shear behavior of recycled aggregate reinforced concrete slabs. **Alexandria Engineering Journal**, [S.L.], v. 57, n. 2, p. 841-849, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2015.12.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016815001970?via%3Dihub>. Acesso em: jun. 2022.

MALTA, J. O. **Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição**. 2012. 1792 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Escola Politécnica, Universidade federal da Bahia, Salvador, 2012.

MALESEV, M., RADONJANIN, V, MARINKOVIC, S. **Recycled concrete as aggregate for structural concrete production**. Sustainability. 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2.ed.São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p, 2008.

MELGES, J. L. P. **Análise Experimental da Punção em Lajes de Concreto Armado e Protendido**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 406 p, 2001.

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.

MODEL CODE 2010. **fib Model Code 2010, First complete draft—V. 2, Bulletin 56, fib**. Lausanne, Switzerland, Abril, 288. 2013.

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

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

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

MUTTONI, A. Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Flat Slabs Without Transverse Reinforcement. **ACI Structural Journal**, Vol. 105, N° 4, Jul-Ago. 440-450, 2008.

OLIVEIRA, M. E. D. **Agregado reciclado de construção e demolição: influência em propriedades de argamassas para revestimento**. 2012. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2012.

OLIVEIRA, M. H. **Punção em Lajes Lisas com Armadura de Cisalhamento Submetidas a Carregamento Excêntrico e Apoiadas sobre Pilares Retangulares**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 02 A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 223 p. 2013.

OLIVEIRA, D. C., GOMES, R. B., MELO, G. S. **Punção em lajes lisas de concreto armado com furo adjacente ao pilar e transferência de momento**. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, 2014. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/riem/a/kKNfwsCZtRVpkTj4q4PCCKw/?lang=pt>>. Acesso em: jun. 2021

OLORUNSOGO F.T.; PADAYACHEE N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. **Cement and concrete research**, v. 32, (2002), 179-185.

PAIVA, O. S., FERREIRA, M. P., OLIVEIRA, D. R. C., LIMA NETO, A. F., TEIXEIRA, M. R. **Influência do Índice de Retangularidade dos Pilares e das Condições de**

Contorno na Resistência à Punção de Ligações Laje-pilar. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, Belém-PA, v.8, n.3, p.260-295, jun. 2015.

PAMPLONA, M. K. Y. (2018). **Resistência ao Fendilhamento de Elementos Estruturais de Concreto Simples e Armado com Agregados Reciclados de Concreto.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 110p.

PARK, R.; GAMBLE, W. L. **Reinforced Concret Slabs.** John Wiley & Sons Inc., New York, 2000.

PEDROZO, R. F. E. **Influência da Substituição Do Agregado Miúdo Natural por Agregado Reciclado Fino em Propriedades de Argamassas e Concretos.** 2008. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

PEREIRA FILHO, Manoel José Mangabeira. **Avaliação dos Métodos Normativos para Previsão da Resistência à Punção de Lajes sem Armadura de Cisalhamento e com Conectores de Aço.** 2016. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

PEREIRA FILHO, M. J. M. (2021). **Resistência à punção de lajes lisas armadas ao cisalhamento com estribos treliçados pré-fabricados.** Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD - 002 A/21, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 202p

RABELLO, F. T. **Análise Comparativa de Normas para Punção em Lajes de Concreto Armado.** 250 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010.

RAHAL, K. (2007), **Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate.** Building and Environment 42, 407–415.

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

RAO H. S.; REDDY, V.S.K. e GHORPADE, V.G. **Influence of recycled coarse aggregate on punching behaviour of recycled coarse aggregate concrete slabs.** Int J Mod Eng Res; 2(4):2815–20. 2012.

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

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

REIS, N., BRITO, J. de, CORREIA, J.R., ARRUDA, M.R.T. Punching shear behaviour of concrete slabs incorporating coarse recycled concrete aggregates. **Engineering and Structure**. 2015.

RIBEIRO JUNIOR, J. A. **Análise experimental da resistência à punção em lajes lisas com substituição de agregados graúdos naturais por reciclados de concreto**. 2022. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2022.

RODRIGUES, C. R. DE SÁ; FUCALE, S. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 99-111, jan./mar. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

RUIZ, M. F.; 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.

SÁ; A. J. M. **Agregados Graúdos Reciclados de Concreto - Uma Opção para uso em Dosagens Estruturais**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal do Pará. Belém, PA, 2016.

SAHOO, Saumyaranjan; SINGH, Bhupinder. Recycled aggregate concrete slab punching shear capacity. **Structures**, [S.L.], v. 24, p. 426-443, abr. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012419302073?via%3Dihub>>. Acesso em: jun. 2021.

SANTOS, J.; BRANCO, F.; BRITO, J. Mechanical Properties of concrete with coarse recycled concrete aggregates. **Sustainable Building**, 2002.

SANTOS, E. V. **Punção em Lajes Lisas: Métodos de Cálculo, Prescrições Normativas e Exemplos de Aplicação**. 225 p. 2018. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2018.

SESSA, T. C. **Colapso progressivo de edificações de concreto armado em construção**. – Rio de Janeiro: UFRJ / COPPE, 2017. XV, 117 p.: il.; 29,7 cm. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2017.

SHI, C.; LI, Y.; ZHANG, J.; LI, W.; CHONG, L.; XIE, Z. **Performance enhancement of recycled concrete aggregate: A review**. Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 466-472, 2016.

SILVA, R.V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. **Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production**. Construction and Building Materials, v. 65, p. 201-217, 2014.

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

XIAO, J., WANG, W., ZHOU, Z., TAWANA, M. Punching shear behavior of recycled aggregate concrete slabs with and without steel fibres. **Frontiers Of Structural And Civil Engineering**, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 725- 740, 5 dez. 2018. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11709-018-0510-6>>. Acesso em: jun. 2021.

WOOD, J. G. M. Pipers Row Car Park, Wolverhampton - Quantitative Study of the Causes of the Partial Collapse on 20th March 1997. **Health and Safety Executive (HSE)**, 2003.

YUAN, H.; SHEN, L. (2011), **Trend of the research on construction and demolition waste management**. Waste Management, n. 31, p. 670–679.

Página de assinaturas



Aarao Neto
563.116.132-04
Signatário



Mauricio Ferreira
691.601.122-04
Signatário



Marcos Oliveira
946.018.361-15
Signatário



Manoel Filho
806.283.032-20
Signatário

HISTÓRICO

- 25 jan 2024** 21:58:02  **Shara Katharine Melo Silva Portilho** criou este documento. (E-mail: shara.engenhariacivil@gmail.com)
- 30 jan 2024** 10:33:01  **Manoel José Mangabeira Pereira Filho** (E-mail: manoelmangabeira@hotmail.com, CPF: 806.283.032-20) visualizou este documento por meio do IP 187.114.28.218 localizado em Belém - Para - Brazil
- 30 jan 2024** 10:40:02  **Manoel José Mangabeira Pereira Filho** (E-mail: manoelmangabeira@hotmail.com, CPF: 806.283.032-20) assinou este documento por meio do IP 187.114.28.218 localizado em Belém - Para - Brazil
- 26 jan 2024** 10:37:05  **Mauricio De Pina Ferreira** (E-mail: mpinaf@gmail.com, CPF: 691.601.122-04) visualizou este documento por meio do IP 200.239.105.39 localizado em Belém - Para - Brazil
- 26 jan 2024** 10:37:36  **Mauricio De Pina Ferreira** (E-mail: mpinaf@gmail.com, CPF: 691.601.122-04) assinou este documento por meio do IP 200.239.105.39 localizado em Belém - Para - Brazil
- 29 jan 2024** 15:31:28  **Marcos Honorato Oliveira** (E-mail: honorato.eng@gmail.com, CPF: 946.018.361-15) visualizou este documento por meio do IP 177.235.4.174 localizado em Brasília - Federal District - Brazil
- 29 jan 2024** 15:32:08  **Marcos Honorato Oliveira** (E-mail: honorato.eng@gmail.com, CPF: 946.018.361-15) assinou este documento por meio do IP 177.235.4.174 localizado em Brasília - Federal District - Brazil
- 25 jan 2024** 21:59:22  **Aarao Ferreira Lima Neto** (E-mail: aaraol@yahoo.com.br, CPF: 563.116.132-04) visualizou este documento por meio do IP 187.255.219.28 localizado em Belém - Para - Brazil



25 jan 2024
21:59:36



Aarao Ferreira Lima Neto (E-mail: aaarol@yahoo.com.br, CPF: 563.116.132-04) assinou este documento por meio do IP 187.255.219.28 localizado em Belém - Para - Brazil

