



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

JAYRON ALVES RIBEIRO JUNIOR

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO EM LAJES LISAS COM SUBSTITUIÇÃO  
DE AGREGADOS GRAÚDOS NATURAIS POR RECICLADOS DE CONCRETO**

Tucuruí – PA

2022

JAYRON ALVES RIBEIRO JUNIOR

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO EM LAJES LISAS  
COM SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS GRAÚDOS NATURAIS POR  
RECICLADOS DE CONCRETO**

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: infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Maurício de Pina Ferreira

Tucuruí – PA

2022

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)

---

A474a Alves Ribeiro Junior, Jayron  
Análise experimental da resistência à punção em lajes  
lisas com substituição de agregados graúdos naturais por  
reciclados de concreto / Jayron Alves Ribeiro Junior. — 2022.  
85 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Maurício de Pina Ferreira  
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético,  
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia,  
Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2022.

1. Agregado reciclado. 2. Concreto armado. 3. Lajes  
lisas. 4. Punção. I. Título.

CDD 624.1834

---

JAYRON ALVES RIBEIRO JUNIOR

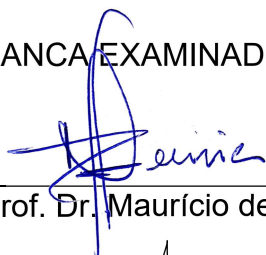
**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO EM LAJES LISAS  
COM SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS GRAÚDOS NATURAIS POR  
RECICLADOS DE CONCRETO**

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: infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Maurício de Pina Ferreira

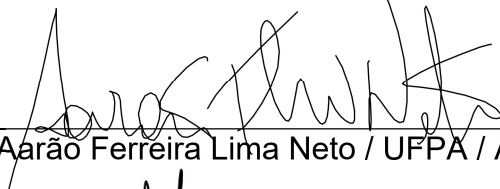
Aprovada em 12 de maio de 2022.

BANCA EXAMINADORA:



---

Prof. Dr. Maurício de Pina Ferreira / UFPA / Orientador



---

Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto / UFPA / Avaliador Interno



---

Prof. Dr. Manoel José Mangabeira Pereira Filho / UFPA / Avaliador interno



---

Prof. Dr. Marcos Honorato de Oliveira / UNB / Avaliador Externo

*Dedico essa dissertação a minha  
avó Osvaldina Alves Ribeiro  
(in memoriam).*

## AGRADECIMENTOS

Ao arquiteto do universo por conduzir meus passos e me manter firme durante a jornada. Deus, em sua infinita bondade, proporcionou-me sabedoria para lidar com as situações adversas e colocou as pessoas certas no caminho para que tudo ocorresse bem.

A minha eterna sensei e amiga Ângela Ruriko Sakamoto, pelo apoio e incentivo à iniciação científica. Sou grato a minha esposa Gislayne Alves, aos meus pais (Jayron e Mauricélia) e avós (Osvaldina e Ibanês), pela compreensão, força e motivação diária.

Ao meu orientador, Maurício de Pina Ferreira e ao professor Aarão Ferreira Lima Neto, por possibilitarem a realização da pesquisa. Tão importantes quanto, sou grato à Iana Ingrid Rocha Damasceno e Shara Katharine Melo Silva Portilho por serem minhas companheiras durante a execução da pesquisa.

Afinal, o que seria a vida sem boas amizades? Portanto, deixo meus agradecimentos a todos os amigos que fiz em Tucuruí, em especial ao Pablo Virgolino Freitas, André Felipe Souza da Cruz, Thainá Oliveira e Vinicius de Oliveira Costa, que se tornaram irmãos de batalha que pretendo levar para o resto da vida.

À Francirene Bonfim e à professora doutora Fernanda Gouveia pelo auxílio prestado no Laboratório de Engenharia Civil; ao Jedson Abrantes, Manoel Mangabeira e todas as outras pessoas que contribuíram em diversas fases da pesquisa, deixo aqui meu muito obrigado.

Ao Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia – NDAE, Núcleo de Modelagem Estrutural Aplicada – NUMEA, à Universidade Federal do Pará – UFPA (Campus Tucuruí e Belém) por disponibilizarem equipamentos, recursos financeiros e humanos para a realização das diversas etapas dessa pesquisa, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (Capes – código de financiamento 001) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro e concessão de bolsas de estudo e produtividade.

## RESUMO

A popularização da utilização de agregados reciclados de concreto tem aumentado em virtude de aspectos socioeconômicos, mas sobretudo, motivada pela sustentabilidade e, nesse contexto, algumas normas internacionais foram publicadas com o intuito de viabilizar e padronizar o uso desse material. Apesar da constante evolução dos estudos sobre punção, ainda há necessidade de ajustes normativos nacionais e internacionais em relação à utilização de agregados reciclados de concreto em lajes lisas de concreto armado. Dois motivos explicam a ligeira influência de incorporação de agregados reciclados na resistência à punção em lajes de concreto: menor resistência mecânica e melhor ligação entre a pasta de cimento e o agregado reciclado de concreto devido ao maior teor de cimento, porosidade e rugosidade, quando comparado com agregado natural. Desse modo, a resistência à punção é influenciada por essas propriedades dos agregados ao longo do plano de cisalhamento das fissuras, os dois efeitos compensaram um ao outro, levando a uma resistência à punção semelhante. Esta pesquisa realizou o ensaio experimental de 6 lajes lisas de concreto armado sem armaduras de cisalhamento submetidas a carregamento simétrico, contendo variações na taxa de armadura de combate à flexão (0,7% e 1,4%) e taxa de substituição de agregado natural por agregado gráudo reciclado de concreto (0%, 30% e 100%). As lajes eram octogonais com 2500 mm de distância entre faces paralelas, lados de 1030 mm e espessura de 210 mm, moldadas com concreto com fck de 25 MPa e apoiadas em pilares de 300 mm de lado. As normas utilizadas como parâmetro de estimativa de capacidade resistente foram a NBR 6118:2014, ACI 318:2019 e Eurocode 2:2004. Os resultados experimentais mostraram que as lajes com ARCO-G (agregados gráudos reciclados e concreto) apresentaram redução máxima de 6 % na capacidade resistente a punção quando comparadas as lajes com agregados gráudos naturais. A taxa de armadura foi capaz de aumentar a carga de fissuração no estado limite de serviço (ELS) e o agregado reciclado de concreto pouco influenciou na abertura de fissuras nas lajes com maior taxa de armadura de combate à flexão.

Palavras-chave: Agregado reciclado. Concreto armado. Lajes lisas. Punção.

## ABSTRACT

The popularization of the use of recycled concrete aggregates has increased due to socioeconomic aspects, but above all, as sustainability is being pursued and, in this context, some international standards have been published to facilitate and standardize the use of this material. Despite the constant evolution of studies on punching shear, there is a need for national and international regulatory adjustments in relation to the use of recycled concrete aggregates in flat reinforced concrete slabs. Two reasons explain the slight influence of the incorporation of recycled aggregates on the punching shear resistance of concrete slabs: lower mechanical strength and better bond between the cement paste and the recycled concrete aggregate due to the higher cement content, porosity, and roughness, when compared with natural aggregate. Thus, the punching shear strength is influenced by these properties of the aggregates along the shear plane of the cracks, the two effects offset each other, leading to a similar punching shear strength. This research carried out the experimental test of 6 flat slabs of reinforced concrete without shear reinforcement subjected to symmetrical loading, containing variations in the rate of flexural combat reinforcement (0.7% and 1.4%) and replacement rate of natural aggregate by recycled concrete aggregate (0%, 30% and 100%). The study evaluated the influence of these variables on the punching shear resistant capacity and analyzed the upper limits of resistance. The slabs were octagonal with 2500 mm of distance between parallel faces, sides of 1030 mm and thickness of 210 mm, molded with concrete with fck of 25 MPa and supported on columns of 300 mm of side. The standards used as a parameter for estimating resistant capacity were NBR 6118:2014, ACI 318:2019 and Eurocode 2:2004. The experimental results showed that the slabs with ARCO showed a maximum reduction of 6 % in the punching shear resistance when compared to the slabs with conventional coarse aggregates. The reinforcement rate was able to increase the cracking load at the service limit state (ELS) and the recycled concrete aggregate had little influence on the opening of cracks in the slabs with the highest rate of flexural reinforcement.

Keywords: Recycled aggregate. Reinforced concrete. Flat slabs. Punching shear.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Resposta carga x rotação das lajes de Kinnunen e Nylander.....	29
Figura 2.2 - Acidente no edifício Pipers Row Car Park, em Wolverhampton.....	29
Figura 2.3 – Acidente estrutural no shopping Rio Poty, em Teresina – PI.....	30
Figura 2.4 – Comportamento carga-deslocamento.....	32
Figura 2.5 – Padrão de fissuração.....	32
Figura 2.6 – Perímetro de controle conforme a ABNT NBR 6118:2014.....	35
Figura 2.7 – Perímetro de controle conforme o Eurocode 2:2004.....	36
Figura 2.8 – Perímetro de controle conforme o ACI 318:2019.....	38
Figura 2.9 – Distribuição das linhas de ruptura.....	39
Figura 2.10 – Geometria das lajes de Reis et al. (2015) .....	42
Figura 2.11 – Geometria das lajes de Francesconi et al. (2016).....	45
Figura 2.12 - Espécimes e sistema de ensaio de Mahmoud et al. (2018).....	47
Figura 2.13 – Relação carga x deslocamento.....	48
Figura 2.14 – Geometria dos espécimes de Xiao et al. (2019).....	50
Figura 2.15 – Sistema de ensaio de Xiao et al. (2019).....	50
Figura 2.16 – Geometria dos espécimes de Sahoo e Singh (2020) .....	52
Figura 3.1 – Geometria das lajes.....	54
Figura 3.2 – Armadura de flexão das lajes.....	55
Figura 3.3 – Lajes com $\rho=0,7\%$ .....	56
Figura 3.4 – Lajes com $\rho=1,4\%$ .....	56
Figura 3.5 – Detalhamento dos pilares.....	57
Figura 3.6 – Posicionamento dos LVDTs.....	61
Figura 3.7 – Posicionamento dos extensômetros de aço.....	61
Figura 3.8 – Posicionamento dos extensômetros de concreto.....	62
Figura 3.9 – Sistema de ensaio.....	63
Figura 4.1 – Abatimento.....	65
Figura 4.2 – Resistência à compressão.....	65
Figura 4.3 – Resistência à tração.....	65
Figura 4.4 – Módulo de elasticidade.....	65
Figura 4.5 – Deformações nas armaduras de flexão.....	66
Figura 4.6 – Deformações na superfície do concreto.....	66
Figura 4.7 – Resposta carga-deslocamento.....	67
Figura 4.8 – Resposta carga-fissuração.....	68
Figura 4.9 – Mapa de fissuração.....	68 e 69
Figura 4.10 – Comparativo de resistência entre lajes de referência e ARCO-G.....	71
Figura 4.11 – Histograma conforme o critério de COLLINS (2011).....	73

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Considerações normativas para agregados reciclados.....	21
Tabela 2.2 – Resultados experimentais de Rao et al. (2012).....	40
Tabela 2.3 – Características das lajes de Reis et al. (2015).....	43
Tabela 2.4 – Resultados experimentais de Francesconi et al. (2016).....	46
Tabela 2.5 – Resultados experimentais de Mahmoud et al. (2018).....	49
Tabela 2.6 – Resultados experimentais de Xiao (2019).....	51
Tabela 2.7 – Resultados experimentais de Sahoo e Singh (2020).....	51 e 52
Tabela 3.1 – Característica das lajes.....	54
Tabela 3.2 – Dosagem do concreto.....	58
Tabela 3.3 – Caracterização dos agregados.....	59
Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas do aço.....	60
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do concreto.....	64
Tabela 4.2 – Tabela de classificação dos modos de ruptura.....	70
Tabela 4.3 – Resultados experimentais.....	71
Tabela 4.4 – Escala de penalidade segundo Collins (2001).....	72
Tabela 4.5 – Classificação segundo o critério de Collins (2011) .....	73

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ACI – American Concrete Institute.

AN – Agregado Natural.

ARCO – Agregados Reciclados de Concreto.

ARCO-G - Agregados Graúdos Reciclados de Concreto.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.

CREA – Conselho Regional de Engenharia e Agronomia.

EC2 – Eurocode 2.

EER - Extensômetros Elétricos de Resistência (EER).

HSE – Health Safety Executive.

LVDT - Linear Variable Differential Transformer.

NBR – Norma Brasileira.

NDAE – Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia.

ZTI – Zona de Transição.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	é a maior dimensão do pilar.
$a/c$	é a relação água cimento.
$b$	é a menor dimensão do pilar.
$C$	é a dimensão da face do pilar.
$C_c$	é o consumo de cimento.
$d$	é a altura útil.
$D_{máx}$	é o diâmetro máximo característico.
$d_x$	é a altura útil das barras dispostas no eixo x.
$d_y$	é a altura útil das barras dispostas no eixo y.
$E$	é o módulo de elasticidade.
$\mathcal{E}_{ys}$	é a deformação de escoamento do aço.
$\mathcal{E}_{ct}$	é a deformação limite a tração do concreto.
$\mathcal{E}_s$	é a deformação do aço.
$\mathcal{f}$	é o diâmetro da barra de flexão.
$f_c$	é a resistência à compressão do concreto.
$f_{ct}$	é a resistência à tração do concreto.
$f_{ck}$	é a resistência característica do concreto à compressão.
$f_{ys}$	é a tensão de escoamento do aço.
$r$	é a distância do centro da laje até o LVDT.
$r_q$	é o raio de aplicação de carga.
$u_0$	é o perímetro do pilar.
$u_1$	é o perímetro de controle afastado a $2d$ das faces do pilar.
$\rho$	é a taxa geométrica da armadura de flexão.
$\rho_w$	é dado como a taxa de armadura transversal.
$m_r$	é o momento resistente da laje.
$v_{min}$	é a tensão mínima.
$V$	é a força cortante.
$V_u$	é a carga de ruptura.
$V_{flex}$	carga teórica de ruptura a flexão.
$V_{teórico}$	carga teórica das normas.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1 Justificativa</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>17</b>
1.2.1 Objetivo geral .....	17
1.2.2 Objetivos específicos .....	17
<b>1.3 Estrutura da dissertação</b> .....	<b>18</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1 A construção civil e a extração de recursos naturais</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2 Resíduos de Construção e Demolição (RCD) – Definição, composição e classificações</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3 Utilização de concreto com agregados reciclados</b> .....	<b>21</b>
2.3.1 Propriedades e influência dos agregados reciclados na produção de concreto.....	22
2.3.2 Granulometria.....	23
2.3.3 Massa específica e massa unitária .....	24
2.3.4 Absorção de água .....	25
2.3.5 Resistência à compressão .....	26
2.3.6 Resistência à tração e módulo de elasticidade .....	27
<b>2.4 Punção em lajes lisas de concreto armado</b> .....	<b>27</b>
2.4.1 Acidentes causados por punção na ligação laje-pilar .....	29
2.4.2 Padrão de fissuração e formação da fissura da punção.....	31
2.4.3 Fatores que influenciam na resistência à punção em lajes sem armadura de cisalhamento.....	33
2.4.3.1 Resistência à compressão do concreto .....	33
2.4.3.2 Taxa de armadura de flexão tracionada .....	33
2.4.3.3 Efeito escala.....	34
2.4.4.4 Dimensões e geometria do pilar .....	34
<b>2.5 Recomendações normativas para cargas de ruptura de lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento</b> .....	<b>34</b>
2.5.1 ABNT NBR 6118:2014.....	34
2.5.2 EN 1992-1-1:2004.....	36
2.5.3 ACI 318:2019.....	37

<b>2.6 Resistência à flexão</b> .....	<b>39</b>
<b>2.7 Pesquisas relacionadas</b> .....	<b>40</b>
2.7.1 Rao et al. (2012) .....	40
2.7.2 Reis et al. (2015).....	41
2.7.3 Francesconi et al. (2016) .....	44
2.7.4 Mahmoud et al. (2018).....	47
2.7.5 Xiao et al. (2019).....	49
2.7.6 Sahoo e Singh (2020).....	51
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>53</b>
<b>3.1 Características das lajes</b> .....	<b>53</b>
3.1.1 Armaduras de flexão das lajes.....	54
3.1.2 Armaduras dos pilares .....	56
<b>3.2 Materiais utilizados</b> .....	<b>57</b>
3.2.1 Agregados naturais, reciclados de concreto, dosagem e traço .....	57
3.2.2 Concretagem e cura das lajes.....	59
3.2.3 Aço.....	60
<b>3.3 Instrumentação</b> .....	<b>60</b>
3.3.1 Deslocamentos verticais .....	60
3.4.2 Deformações nas armaduras e no concreto.....	61
<b>3.4 Sistema de ensaio</b> .....	<b>62</b>
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>64</b>
<b>4.1 Materiais</b> .....	<b>64</b>
<b>4.2 Deformações nas armaduras de flexão</b> .....	<b>65</b>
<b>4.3 Superfície do concreto</b> .....	<b>66</b>
<b>4.4 Deslocamentos verticais</b> .....	<b>67</b>
<b>4.5 Mapa de fissuração</b> .....	<b>67</b>
<b>4.5 Classificação dos modos de ruptura das lajes</b> .....	<b>69</b>
<b>4.6 Estimativas normativas</b> .....	<b>71</b>
4.6.1 Desempenho das normas para lajes sem armadura de cisalhamento.....	71
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>73</b>
<b>ANEXO A – Sistema de ensaio</b> .....	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>76</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e industrial é responsável pelo aumento do consumo dos recursos naturais e energéticos, no qual a construção civil exerce papel fundamental no emprego destes recursos. O aumento na produção de resíduos levou a sociedade a se preocupar com o correto descarte desse material uma vez que os resíduos de construção e demolição (RCD) geram impactos ambientais se forem descartados de forma inapropriada, podendo resultar em depósitos ilegais, assoreamento de rios, contaminação de solos e lençóis freáticos.

É necessária a reinserção dos RCDs no ciclo produtivo da construção civil e uma das alternativas é a produção de agregados reciclados de concreto (ARCO) por meio do processo de britagem e peneiramento de elementos descartados de concreto, uma vez que o concreto é um dos seus principais constituintes (VALENÇA; MELO; WANDERLEY, 2008).

O ARCO pode ser utilizado em diversas aplicações tanto estruturais como não estruturais (ABNT NBR 15116/2021) . A utilização de ARCO em concretos estruturais requer atenção especial, uma vez que se faz necessário avaliar a influência desse material nas propriedades mecânicas do concreto. As propriedades mecânicas de concretos produzidos com ARCO tem sido alvo de diversos estudos ao longo dos anos, uma vez que a heterogeneidade do ARCO pode levar a uma variabilidade nas propriedades do concreto com agregados reciclados.

Rao et al., (2012); Reis et al., (2015); Francesconi et al., (2016), Mahmoud et al., (2018); Xiao et al., (2019); Sahoo e Singh, (2020) utilizaram os agregados reciclados de concreto no estudo de lajes lisas de concreto armado e relataram redução na resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade.

As lajes lisas compõem um sistema construtivo que tem sido utilizado de forma expressiva na construção civil brasileira (FERREIRA, 2010). Esse sistema é composto por lajes apoiadas diretamente no pilar e, uma vez que não há utilização de vigas, traz algumas vantagens como: maior flexibilidade na composição de ambientes, possibilidade de aumento na quantidade de pavimentos devido à redução do pé-direito, melhor simplificação, havendo possibilidade de reduzir o peso da edificação e da mão de obra (PINTO, 2015).

Como desvantagem, o sistema de lajes lisas exige controle rigoroso nos deslocamentos verticais e deve-se atentar às ligações laje-pilar que ocorrem nesse sistema construtivo, que podem ocasionar a ação de ruptura por cisalhamento bidirecional sem aviso prévio, conhecida como punção (OLIVEIRA, 2013).

A ruptura por punção ocorre de forma frágil, ou seja, é repentina, ocorre com pequeno ou até sem nenhum aviso prévio e pode levar a consequências desastrosas, podendo resultar até mesmo em colapsos progressivos de estruturas no mesmo pavimento, por meio da transferência de cargas, e no colapso progressivo das lajes dos pavimentos inferiores devido ao impacto do material das lajes superiores (RABELLO, 2010).

Kinnuen e Nylander (1960) foram precursores na abordagem racional sobre os mecanismos de resistência da ligação laje-pilar e criaram um modelo para prever a carga de ruptura. No decorrer do tempo outros modelos foram desenvolvidos, como os de Shehata (1990), Menetrey (2002), Muttoni (2008) e outras propostas realizadas com métodos de controle rigorosos e validações científicas que foram utilizadas em recomendações normativas.

Quanto às prescrições normativas mais relevantes para modelos de cálculos referentes à resistência à punção, destacam-se a ABNT NBR 6118 (2014), o EUROCODE 2 (2004), o ACI 318 (2019). Entretanto, mesmo com diversos modelos de cálculo propostos, ainda não há concordância sobre a previsão da variação da resistência à punção conforme a alteração dos parâmetros influenciadores da sua resistência.

Rao et al. (2012), Reis et al. (2015), Francesconi et al. (2016), Mahmoud et al., (2018), Xiao et al. (2019) e Sahoo e Singh (2020) estudaram lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento, com uso de agregados reciclados de concreto e obtiveram resultados satisfatórios em relação à resistência à punção, porém as lajes ensaiadas por esses autores possuíam dimensões (largura x comprimento x altura), entre 1100 mm x 1100 mm x 50 mm a 1500 mm x 1500 mm x 120 mm, que não são usuais em construções de edifícios.

Segundo Pereira Filho (2016), para contribuir com o desenvolvimento de previsões normativas seguras, é necessário conhecer com precisão a tendência de variação da resistência à punção conforme a variação dos parâmetros que podem alterá-la.

Esta pesquisa trata, a partir de análise experimental, sobre a resistência à punção em lajes lisas de concreto armado com substituição de agregados naturais por agregados reciclados de concreto, em dimensões (2500 mm x 2500 mm x 210 mm) mais próximas da realidade utilizada na construção civil.

## 1.1 Justificativa

Em tempos de redução de consumo e busca por soluções dos impactos causados pelo processo de urbanização, faz-se necessário que haja participação acadêmica no processo de busca por mundo mais sustentável. Este estudo agrega assuntos relacionados à construção civil e aproveitamento de resíduos, tendo em vista a profundidade do tema para a sociedade, tal como o retorno das pesquisas científicas para o meio acadêmico.

A popularização da utilização de agregados reciclados de concreto no mundo tem aumentado em virtude de aspectos socioeconômicos, mas sobretudo, ao passo que se caminha em busca da sustentabilidade e, nesse contexto, algumas normas internacionais foram publicadas com o intuito de viabilizar e padronizar o uso desse material.

Apesar da constante evolução dos estudos sobre punção, há a necessidade de ajustes normativos nacionais e internacionais em relação à utilização de agregados reciclados de concreto em estruturas de concreto armado.

Dois motivos explicam a ligeira influência de incorporação de agregados graúdos reciclados na resistência à punção em lajes de concreto: menor resistência mecânica do ARCO-G e melhor ligação entre a pasta de cimento e o ARCO-G devido ao maior teor de cimento, porosidade e rugosidade, quando comparado com agregado natural. Desse modo, a resistência à punção é influenciada por essas propriedades dos agregados ao longo do plano de cisalhamento das fissuras, os dois efeitos compensaram um ao outro, levando a uma resistência à punção semelhante.

Pesquisas sobre agregado reciclado de concreto como as de Rao et al. (2012), Reis et al. (2015), Francesconi et al. (2016), Mahmoud et al. (2018), Xiao et al. (2019) e Sahoo e Singh (2020) têm sido realizadas a fim de desvendar as incógnitas a respeito dos fatores que influenciam nas propriedades dos materiais por

eles produzidos. Contudo, ainda há a necessidade de mais informações sobre os parâmetros que tornam complexa a utilização desses materiais. Portanto, esta pesquisa pretende contribuir com a compreensão do comportamento de estruturas de concreto armado, delimitada à punção em lajes lisas sem armadura de cisalhamento, utilizando agregados reciclados de concreto.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Este trabalho busca avaliar o efeito da substituição de agregados naturais por agregados graúdos reciclados de concreto (ARCO-G) no comportamento e resistência à punção de lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar experimentalmente o comportamento à flexão, rigidez e resistência das lajes lisas com agregados graúdos reciclados de concreto em diferentes teores (0%, 30% e 100%);
- Investigar a influência de diferentes taxas de armadura de flexão (0,7% e 1,4%) no comportamento e resistência de lajes lisas de concreto armado;
- Comparar os resultados dos ensaios experimentais com os critérios de dimensionamento à punção, seguindo as prescrições normativas ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2019) e Eurocode 2 (2004).

### 1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação está estruturada em 5 capítulos e referências bibliográficas conforme descritos sucintamente a seguir.

O capítulo 1 contextualiza, justifica e revela a importância do tema, além de expor os objetivos gerais e específicos.

O capítulo 2 diz respeito à revisão bibliográfica elaborada acerca da produção de concreto com agregados reciclados, suas principais características e resistências à tração, compressão e módulo de elasticidade. O capítulo também relata de forma breve sobre os acidentes causados por punção e fala sobre o padrão de fissuração, formação das fissuras e os fatores que influenciam na resistência à punção. São apresentadas recomendações normativas para cargas de ruptura por punção de acordo com as normas ABNT NBR 6118:2014, EN 1992-1-1:2004 (Eurocode 2), ACI 318:2019 e análise da resistência à flexão pelo método da teoria de fissuração crítica, ressaltando que as seções tratam das considerações normativas sobre lajes lisas sem armadura de cisalhamento, apenas com armadura de combate à flexão.

O capítulo 3 apresenta como foi realizado o programa experimental no laboratório de estruturas do campus de Tucuruí da Universidade Federal do Pará e detalha a característica das lajes, os materiais utilizados, instrumentação a concretagem e sistema de ensaio. Os modelos experimentais apresentados neste capítulo fazem parte da tese (em fase de elaboração) de doutorado de Iana Ingrid Rocha Damasceno (DAMASCENO, 2022).

O capítulo 4 trata sobre os resultados dos experimentos ensaiados nesta pesquisa. Dentre esses resultados estão as propriedades mecânicas do concreto, deformações nas armaduras de flexão e na superfície do concreto, deslocamentos verticais, cargas últimas e comparação com as previsões normativas NBR 6118 (2014), EUROCODE 2 (2004) e ACI 318 (2019). Os resultados apresentados neste capítulo fazem parte da tese de doutorado (em fase de elaboração) de Iana Ingrid Rocha Damasceno (DAMASCENO, 2022.2).

O capítulo 5 contém as conclusões desta dissertação.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 O papel da construção civil e a extração de recursos naturais**

O setor econômico que mais consome recursos naturais no mundo é a construção civil, em especial, agregados minerais para a confecção de concretos e argamassas. Conforme Tam, Soomro e Evangelista (2018), a demanda atual por agregados chega a cerca de 40 bilhões de toneladas anuais.

Diante desse cenário de alto consumo, as jazidas de agregados naturais tornam-se cada vez mais escassas. Outra problemática é o impacto ambiental causado pela geração de resíduos de construção e demolição (RCD), que é uma problemática comum a diversos países que aumenta proporcionalmente ao desenvolvimento da construção civil.

No Brasil, apesar de haver princípios, diretrizes e sistemas trazidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, sancionada em agosto de 2010, o descarte final desses resíduos, em sua maioria, ainda é realizado de forma inapropriada (SANTOS, 2016). Os RCD's são depositados em locais impróprios e acarretam à degradação ambiental e problemas socioeconômicos.

Nesse contexto, a reinserção desses materiais na construção civil pode ser uma alternativa sustentável para a fim de amenizar os problemas causados, promovendo a redução da extração de matéria-prima natural e os impactos causados pela destinação imprópria dos resíduos. Toda via, a utilização dos Resíduos de Construção civil como agregado exigem estudos prévios sobre a influência nas argamassas e concretos produzidos, tanto nas propriedades em estado fresco, quanto endurecido (LINTZ, 2012).

### **2.2 Resíduos de Construção e Demolição (RCD) – Definição, composição e classificações**

O Resíduo de Construção e Demolição (RCD) é aquele oriundo de construções, demolições, reformas e reparos de estruturas e estradas. A composição do RCD tende a ser variável, pois depende do tipo, etapa da obra,

insumos disponíveis regionalmente, mão de obra e técnicas de demolição empregadas (WERLE, 2010).

No Brasil, a composição do RCD é majoritariamente de brita, areia, concreto, argamassa, cerâmicas, madeira, papelão, plásticos e metais, ou seja, materiais não poluentes e quimicamente inertes (ABRELPE, 2020). Porém, é preciso cautela na classificação do RCD, pois este pode estar contaminado com tintas e substâncias de tratamentos de superfícies.

Os RCD's são classificados, no Brasil, segundo as diretrizes da Resolução CONAMA nº 307 (2002) e das resoluções CONAMA 348 (2004), CONAMA 431 (2011) e CONAMA 448 (2012). Segundo a normativa os resíduos da construção devem ser classificados da seguinte maneira:

- Classe A - resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, como:
  - a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, e ainda solos provenientes de terraplanagem;
  - b) de construção, demolição, reformas e reparos em edificações: componentes cerâmicos, argamassa e concreto;
  - c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto fabricadas em canteiros de obras;
- Classe B - resíduos recicláveis para outras finalidades, como: papel, plásticos, restos de madeira, metais, vidros e gesso;
- Classe C - resíduos para os quais não há tecnologias ou aproveitamentos economicamente viáveis que possibilitem sua reciclagem ou recuperação;
- Classe D - resíduos perigosos provenientes do processo de construção, como tintas, solventes e óleos; ou ainda resíduos contaminados ou prejudiciais à saúde advindos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros; assim como telhas e outros objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos danosos à saúde.

Nesta pesquisa, optou-se por utilizar apenas o RCD classe A, mais especificamente o agregado reciclado constituído predominantemente por resíduos de concreto (ARCO). A ABNT NBR 15116 (2021) baliza os requisitos e métodos de ensaios para os agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland.

## 2.3 Utilização de concreto com agregados reciclados

A popularização da utilização de agregados reciclados é justificada pelo aumento da geração de resíduos sólidos e esgotamento dos recursos naturais em consequência das operações das sociedades industrializadas que apresentam crescimento econômico e populacional (TAM et al., 2018). De acordo com Cordeiro (2013), a reciclagem desses materiais desempenha papel fundamental para a sustentabilidade, uma vez que se tem a conservação dos recursos naturais e redução de áreas de aterro.

A Tabela 2.1 evidencia algumas considerações de normas internacionais sobre a utilização de agregados reciclados na construção civil.

**Tabela 2.1 - Considerações normativas internacionais para agregados reciclados**

Fração do agregado	País	Norma ou especificação	Máximo teor de agregado reciclado	Máxima resistência à compressão (28 dias)	Aplicação
Graúdo	Alemanha	DIN 4226-100 (2002)	35%	25 MPa	Estrutural
		DIN EM 12620 (2017)	25%	35 MPa	
		DAfStb (2010)	100%	25 MPa	
	Austrália	AS 1141.6.2-1996 (R2016)	30%	40 MPa	
		Brasil	NBR 15116 (2021)	20%	
	Bélgica	PTV 406 9.0 (2020)	Não especificado	30 Mpa	
	Espanha	EHE (2008)	20	40 MPa	Não estrutural
	Hong Kong	CS-3 (2013)	20%	30 MPa	
		HKBD (2004)	100%	20 MPa	
	Japão	BSCJ (1977)		30 MPa	
		JIS A 5021 (2018)			Estrutural
JIS A 5022 (2018)		Não especificado	45 MPa		
		JIS A 5023 (2018)			

**Fonte: Autor (2021)**

No Brasil, de acordo com a ABNT NBR 15116 (2021), o ARCO (agregado reciclado de concreto) é a única classe de agregado reciclado que pode ser empregada na confecção de compósitos ou produtos como concretos de cimento Portland, artefatos pré-fabricados e argamassa com função estrutural. Ainda segundo a norma, o teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado, nesses casos, deve ser de no máximo 20% da massa de agregados totais

e empregados em concretos das classes de agressividade I e II da ABNT NBR 6118 (2014).

Os agregados reciclados de concreto podem ser utilizados em concretos de cimento Portland destinados a usos não estruturais, artefatos pré-fabricados sem função estrutural e argamassa de assentamento, revestimento e contrapiso, em teores de substituição de até 100% da massa de agregados naturais. Para este tipo de utilização deve-se atender a todos os critérios estabelecidos pelas normas específicas desses produtos e compósitos, independente dos teores de substituição do agregado natural por agregado reciclado.

Nesse contexto, Rao et al. (2012), Reis et al. (2015) e Francesconi et al. (2016), Mahmoud et al. (2018), Xiao et al. (2018) e Sahoo e Singh (2020), analisaram a viabilidade da utilização de agregados graúdos reciclados de concreto – ARCO-G na produção de elementos estruturais e obtiveram resultados satisfatórios comparando o comportamento à punção de lajes lisas com agregados naturais e com agregados reciclados de concreto, destacando a importância dos estudos relacionados a este tipo de material.

### **2.3.1 Propriedades e influência dos agregados reciclados na produção de concreto**

O concreto produzido com agregado reciclado é composto por agregados naturais e uma camada de argamassa aderida, provenientes dos concretos de origem triturados. Essa camada é responsável pela redução das propriedades mecânicas e é associada ao aumento de rugosidade, porosidade e absorção de água do agregado reciclado de concreto quando comparado ao agregado natural (JUAN, GUTIÉRREZ, 2009).

Além disso, o concreto produzido com agregado natural reciclado, em virtude de sua forma, textura e maior capacidade de absorção de água, resulta no aumento da relação água/cimento para garantir a trabalhabilidade e possui maior número de poros capilares, exigindo maior quantidade de pasta de cimento, elevando o custo.

Sanchez (2004) analisou a influência do tamanho dos grãos na quantidade de argamassa aderida e afirmou que a quantidade de argamassa aderida é

inversamente proporcional ao tamanho do grão. Essa informação é comprovada pela bibliografia de diversos autores como Barra (1996), Santos et al. (2002) e Juan e Gutiérrez (2009). Portanto, é consenso que a utilização de agregados miúdos de concreto reciclado não é recomendada na produção de novos concretos.

Entre outras propriedades importantes do agregado natural reciclado, cabe a baixa densidade e baixa resistência à fragmentação. Os agregados reciclados possuem mais impurezas que os naturais, esse fato é devido à etapa de demolição que o resíduo faz parte. O ideal é que haja coleta seletiva durante o processo de escolha do material, a fim de amenizar a quantidade de impurezas. Kisku et al. (2017) afirma que a qualidade do concreto está diretamente relacionada à qualidade do agregado utilizado, desse modo a análise das propriedades mecânicas do ARCO é imprescindível, assim como a investigação das propriedades do concreto que de origem desses agregados.

Existem algumas ressalvas para a utilização de concretos com agregado reciclado provenientes de concretos de baixa qualidade e de resistência desconhecida na fabricação de novos concretos. Em concretos produzidos a partir de agregados reciclados existem duas zonas de transição, a antiga e a nova. Sendo que a porosidade se encontra na matriz cimentícia, na zona de transição pasta-agregado (FERREIRA, 2007).

Todavia, Cordeiro (2013) afirma que o agregado reciclado só influenciará na resistência do concreto quando a matriz do novo concreto for mais resistente que do concreto original, uma vez que possivelmente o concreto romperá no agregado.

A proporção da utilização de agregado reciclado de concreto precisa ser avaliada, contudo a maior dificuldade está na insuficiência de diretrizes para a definição de dosagem desse material (KISKU et al., 2017).

### **2.3.2 Granulometria**

Os agregados reciclados de concreto, tanto miúdos quanto graúdos, tendem a apresentar composições granulométricas contínuas e com grande quantidade de finos, de forma que são graduados de maneira bem distribuída, o que permite maior capacidade de interação física entre as partículas (MARTÍN-MORALES *et al.*, 2011; MALTA, 2012).

Quanto às propriedades relacionadas ao estado fresco, nota-se que agregados com granulometria contínua tendem a originar concretos mais trabalháveis (MEHTA; MONTEIRO, 2014). No estado endurecido, tais agregados proporcionam um concreto mais denso, favorecendo a resistência à compressão e outras propriedades mecânicas (OLIVEIRA, 2012).

A dosagem do concreto leva em consideração, entre outros aspectos, o módulo de finura, o teor de finos e a dimensão máxima do agregado, obtidos por meio da composição granulométrica. O tamanho das partículas dos agregados é diretamente proporcional ao Módulo de Finura (MF) e à Dimensão Máxima Característica ( $D_{m\acute{a}x}$ ). A diminuição da superfície dos agregados, normalmente, implica na redução da necessidade de pasta para a lubrificação dos grãos, e de água para molhar a superfície do agregado (LEITE, 2001).

### **2.3.3 Massa específica e massa unitária**

A massa específica pode ser definida como a massa do material, considerando os poros internos por unidade de volume, é uma propriedade que depende da porosidade. A massa unitária, por sua vez, é a massa das partículas dos agregados que ocupam uma unidade de volume, considerando os vazios entre os grãos. Essas duas propriedades são importantes e necessárias para a definição de dosagens de concreto. Além disso, a massa específica está relacionada à taxa de absorção de água dos agregados, ou seja, a redução da massa específica, está ligada a um aumento da porosidade, que tem importante relação com a absorção de água dos agregados reciclados (MOREIRA, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os agregados reciclados de concreto, normalmente, possuem massa específica e massa unitária inferiores às dos agregados naturais (CABRAL, 2007). Essa redução da massa específica é decorrente das características dos componentes dos agregados reciclados, visto que são menos densos que os agregados naturais. Na massa unitária, além densidade do material, outros fatores influenciam essa diminuição como a porosidade elevada e a forma mais irregular das partículas dos agregados, que aumentam os vazios entre grãos (CORDEIRO *et al.*, 2017).

A literatura técnica mostra que a densidade da argamassa utilizando ARCO é expressivamente menor que a dos agregados naturais, visto que os agregados reciclados de concreto se diferenciam dos agregados naturais na medida em que são compostos por dois materiais distintos: agregado natural e argamassa aderida. Nesse sentido, observa-se que quanto maior for a quantidade de argamassa aderida, menor será a massa específica do agregado reciclado de concreto (JUAN; GUTIÉRREZ, 2009; CAVALHEIRO, 2011; SHI *et al.*, 2016).

A qualidade da argamassa presente no agregado de concreto também exerce influência em sua densidade. Sabe-se que a argamassa aderida é um material poroso e essa porosidade está intimamente ligada à relação *a/c* e densidade do concreto que a originou. Por esse motivo, pode-se inferir que agregados reciclados mais densos são oriundos de concretos com maiores resistências, já que estes são produzidos com relações *a/c* menores e possuem maior compacidade (ETXEBERRIA *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2014).

#### **2.3.4 Absorção de água**

A absorção de água é a capacidade máxima de água absorvida por um material, em relação a sua massa seca, em percentagem (DUAILIBE, 2008). A determinação da taxa de absorção do agregado é imprescindível para o estudo de dosagem. Em razão da porosidade elevada, a absorção de água é maior nos agregados reciclados de concreto que nos agregados naturais. Assim, para que se alcance uma mesma trabalhabilidade, os concretos feitos com agregados reciclados de concreto precisam de uma relação *a/c* tanto maior quanto maior for o teor de substituição do agregado natural pelo de ARCO (OLIVEIRA, 2012).

Em situações em que se desconsidera a absorção haverá, além da diminuição da relação *a/c* efetiva, redução significativa da trabalhabilidade da mistura (ETXEBERRIA *et al.*, 2007; LÓPEZ-GAYARRE *et al.*, 2009). Por isso, é extremamente necessário compensar a taxa de absorção quando forem produzidos concretos com ARCO. Todavia, deve-se tomar cuidado, pois a compensação total da água poderá aumentar a relação *a/c* efetiva das misturas e conseqüentemente reduzir a resistência mecânica do concreto (POON *et al.*, 2004).

### 2.3.5 Resistência à compressão

De maneira geral, a resistência à compressão dos agregados reciclados de concreto é menor quando comparada a concretos produzidos com agregados naturais de mesmo consumo de cimento. Os fatores relacionados a isso estão relacionados à porosidade do resíduo de concreto advinda da quantidade de argamassa aderida ao agregado natural, menor resistência do agregado reciclado, processo de produção do concreto, entre outros. Assim, a resistência à compressão do concreto decrescerá à medida que a taxa de substituição do agregado reciclado aumentar.

Para concretos com 100% de agregados graúdos reciclados de concreto, trabalhos como os de Rahal (2007) mostraram uma queda de até 9% na resistência à compressão em comparação à concretos fabricados com AN. Uma análise de resultados experimentais realizada por Behera et al. (2014) apontou para uma diminuição na resistência à compressão na ordem de até 30%. Butler et al. (2011) encontrou uma redução de 12% a 25%, enquanto Bairagi et al. (1993) relata uma queda de até 60% na resistência à compressão, esse comportamento anômalo é atribuído a heterogeneidade dos agregados reciclados segundo Etxeberria et al. (2007).

Outro fator avaliado por diversos autores, é a influência da relação água cimento ( $a/c$ ), assim como em concretos com agregados naturais os concretos produzidos com agregado reciclado também apresentam redução na resistência a compressão com o aumento da relação  $a/c$ , conforme aponta Khan (1984). Ravindraiah et al. (1988), ressalta que a resistência à compressão é inversamente proporcional ao fator água cimento ( $a/c$ ). Khan (1984) observou que o ARCO ainda requer uma relação  $a/c$  0,05 – 0,1 menor do que o concreto com AN, esse comportamento foi atribuído à formação da zona de transição - ZTI mais fraca devido à baixa disponibilidade de água entre a argamassa e agregados antigos. Assim, a zona transição atua como elo mais fraco tornando-se um fator de controle para falha do concreto.

### **2.3.6 Resistência à tração e módulo de elasticidade**

Semelhante à resistência à compressão do concreto com agregado graúdo reciclado de concreto, a resistência à tração é influenciada pelo tamanho, tipo, qualidade e quantidade de agregado reciclado. De modo que a resistência à tração diminui de maneira proporcional à adição de agregado reciclado. Porém, segundo Araújo et al. (2016) é possível controlar esse efeito ao selecionar criteriosamente o agregado reciclado na produção do concreto.

Contudo, Butler et al. (2013) e Etxeberria et al. (2007) relatam que o concreto com agregado graúdo reciclado de concreto mostrou desempenho melhor que o concreto convencional em relação à resistência à tração. Rao, Jha e Misra (2007) encontraram que para 100% de substituição, a resistência à tração do concreto foi reduzida de 15% a 20% e, ainda, a resistência à tração em relação à resistência à compressão de concretos com ARCO-G está na ordem de 9% a 13%.

Em relação ao módulo de elasticidade, Ignjatovic et al. (2017) observou que concretos com 50% e 100% de ARCO-G apresentaram até 13% de diminuição dele. Segundo Rahal e Alrefaei (2017) taxas de substituição menores que 20% do uso de ARCO-G tem efeito similar no módulo de elasticidade e resistência a compressão do concreto. No entanto, Rao et al. (2012) encontrou que para 100% de substituição, o módulo de elasticidade do concreto foi reduzido de 50 a 70% do concreto sem substituição. De acordo com Etxeberria et al. (2007) concretos com 100% de ARCO-G também apresentam menores módulos de elasticidade.

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

## **2.4 Punção em lajes lisas de concreto armado**

O fenômeno da punção ocorre inicialmente nas tensões principais acima da linha neutra que 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. 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 (PAIVA, 2015).

Em outras palavras, a ruptura por punção acontece por corte localizado. As elevadas tensões de corte, também chamadas de tensões de cisalhamento, originam tensões principais de tração em um plano inclinado com o plano da laje, que sofre ruptura, por ausência de armadura apropriada, o elemento plano rompe segundo a forma de um tronco de cone.

Como trata-se de um fenômeno complexo, há diversos parâmetros que podem influenciar na resistência à punção, os principais são: resistência à compressão do concreto, taxa de armadura de flexão tracionada, dimensões e geometria do pilar, efeito do tamanho e a presença de armadura de cisalhamento.

Alguns autores desenvolveram métodos teóricos de estimativa da capacidade resistente à punção, entre eles, destaca-se Muttoni (2008) que criou a teoria da fissura crítica para o cálculo da resistência à punção em lajes lisas sem armaduras de cisalhamento. Embasado nas pesquisas de Kinnunen e Nylander (1960), o autor compreende que a resistência à punção diminui com o acréscimo da rotação da laje ( $\psi$ ), a qual é função da carga aplicada e da resistência à flexão, podendo ser explicada pelo surgimento de uma fissura crítica de cisalhamento cortando a biela.

A Figura 2.1 evidencia a perda de resistência à punção com o aumento da rotação das lajes devido a diminuição das taxas de armadura de flexão e mostra o comportamento do critério de ruína adotado pelo modelo.

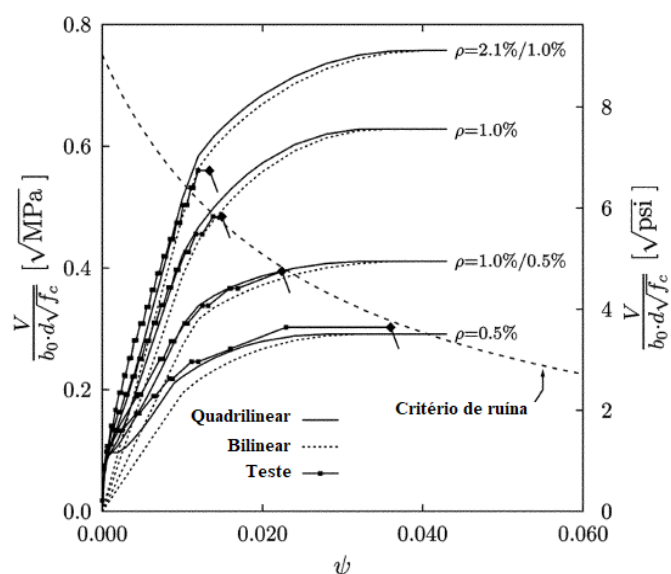


Figura 2.1 – Resposta carga x rotação das lajes de Kinnunen e Nylander (1960).  
Fonte: (MUTTONI, 2008)

#### 2.4.1 Acidentes causados por punção na ligação laje-pilar

A literatura evidencia diversos casos de acidentes estruturais em edifícios ocasionados por punção, como o colapso parcial do último pavimento do edifício Pipers Row Car Park, que pode ser visto na Figura 2.2 (a) e (b) e o acidente estrutural causado por puncionamento, no shopping Rio Poty na Figura 2.3.



Figura 2.2 - Acidente no edifício Pipers Row Car Park, em Wolverhampton.  
Fonte: WOOD (2003)

O edifício-garagem Pipers Row tinha capacidade para 400 carros e teve sua obra concluída em 1965. Sua estrutura era composta por lajes lisas e ruiu em março

de 1997 por punção em torno dos pilares, tal fato ocorreu devido às falhas de inspeção e reparos necessários não realizados.

Somado a isso, o laudo realizado pelo *Health & Safety Executive – HSE*, órgão governamental do Reino Unido responsável por regulamentos e normas de segurança do trabalho, apontou que parte do concreto utilizado foi mal compactado e possuía resistência abaixo dos 20,5 MPa especificados em projeto, o que contribuiu para a diminuição da resistência à punção (SESSA, 2017).

Felizmente não houve vítimas devido o estacionamento estar vazio no momento do acidente. Após isso, optou-se por demolir o resto do edifício, uma vez que toda a estrutura estava comprometida (WOOD, 2003).



**Figura 2.3 - Acidente estrutural no shopping Rio Poty, em Teresina – PI.  
Fonte: CREA – PI (2013)**

Em julho de 2013, aproximadamente 12 trabalhadores estavam no edifício quando parte da edificação desabou, levando 2 deles a óbito. Após essa tragédia, uma comissão foi formada para investigar as causas do acidente. De acordo com o CREA – PI (2013), o desabamento ocorreu em uma área de cerca de 40.000 m<sup>2</sup>, que incluíam quatro pavimentos e a laje de cobertura.

O sistema estrutural utilizado foi o de lajes lisas protendidas de concreto armado, porém, segundo o laudo técnico, houve colapso progressivo na estrutura devido à retirada precoce do escoramento a laje do 4º pavimento, enquanto a laje do 5º pavimento estava sendo executada. Somado a isso, havia furos juntos aos pilares, impedindo a inserção adequada das armaduras de punção e flexão necessárias, além do seccionamento da armadura passiva negativa sobre o pilar, reduzindo ainda mais a resistência da estrutura (SESSA, 2017).

Para evitar acidentes por colapso progressivo, recomenda-se algumas alternativas a fim de aumentar a resistência à punção: prover o aumento da espessura das lajes em regiões próximas aos pilares ou áreas carregadas; aumentar a dimensão dos pilares ou utilizar capitéis; utilizar concreto de alta resistência nas regiões próximas aos pilares ou áreas carregadas, utilizar concreto protendido ou com fibras e utilizar armaduras de combate à punção como por exemplo: estribos, barras dobradas, *shearheads* e *strudails*.

#### **2.4.2 Padrão de fissuração e formação da fissura da punção**

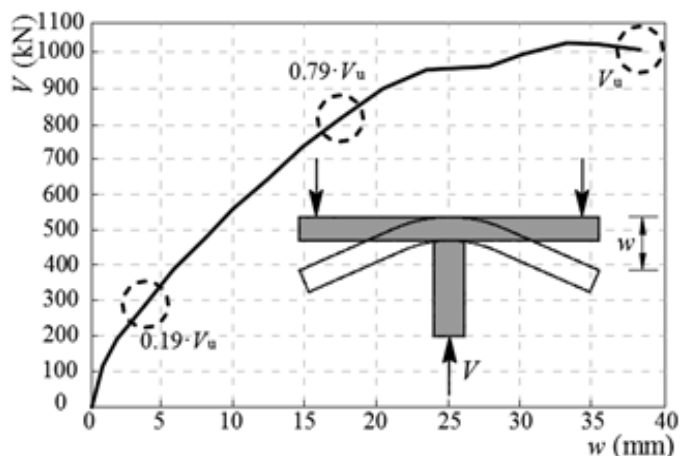
No sistema de lajes lisas, a ruptura por punção ocorre nas regiões da ligação laje-pilar que sofrem influência de tensões resultantes da combinação de esforços de flexão e cisalhamento ao redor dos pilares.

O padrão de fissuração em lajes lisas depende fundamentalmente se a laje é unidirecional ou bidirecional, da geometria e do tamanho do apoio. Para lajes com pilares com continuação em outros pavimentos, a primeira fissura em lajes bidirecionais com carregamento centrado ocorre no contorno do pilar, gerando fissuras radiais formadas por tensões tangenciais e em seguida, fissuras tangenciais formadas por tensões radiais. Para lajes com pilares sem continuação em outros pavimentos, as primeiras fissuras surgem na parte superior do pilar. (PEREIRA FILHO, 2016)

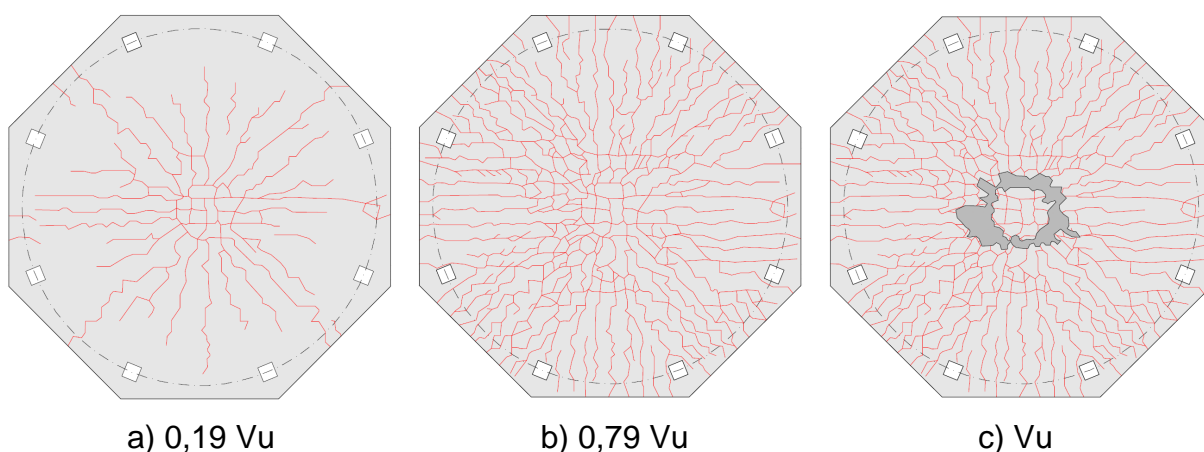
Para Eder (2011) a punção é caracterizada pela formação de uma fissura circunferencial inclinada em ângulos que variam de  $25^\circ$  a  $35^\circ$  para lajes sem armadura de cisalhamento. Essa fissura inclinada surge na superfície tracionada do concreto e se propaga em direção à base do pilar conforme o incremento de carregamento.

Recomenda-se que a angulação da fissura seja medida a partir do centroide das armaduras de flexão, tendo em vista que a angulação da fissura muda depois que ela cruza essas armaduras. Segundo Birkle (2004), o ângulo da superfície de ruptura influencia na resistência a punção, com maiores níveis de resistência para fissuras com ângulos maiores. O comportamento carga x deslocamento e o padrão de fissuração em diferentes estágios de carregamento no ensaio da laje P22 de

Mueller et al. (1984) são apresentados na Figura 2.4 e Figura 2.5 a), b) e c), respectivamente.



**Figura 2.4 - Comportamento carga x deslocamento**  
**Fonte: MUELLER et al. (1984), adaptado por PEREIRA FILHO (2016)**



**Figura 2.5 - Padrão de fissuração.**  
**Fonte: MUELLER et al. (1984), adaptado pelo autor (2021)**

Na verificação da punção em lajes lisas, as normas recomendam que a capacidade resistente seja determinada a partir de uma tensão aplicada em uma área de controle.

Esta área é resultante do produto da altura útil da laje por um perímetro de controle estipulado conforme cada recomendação normativa. Devido à região em que ocorre a punção estar na zona de momentos fletores máximos, é natural que em projeto seja dimensionada uma grande quantidade de armaduras para combater os esforços de tração devido à flexão.

Para Regan (1981) essa armadura pode influenciar na carga última à punção, pois o aumento de sua área de aço resulta no aumento da zona comprimida de concreto devido à flexão, conseqüentemente aumentando a região íntegra de concreto capaz de resistir ao cisalhamento. Além disso, uma maior taxa de armadura de flexão pode controlar melhor a abertura das fissuras, favorecendo a transferência de esforços por meio do engrenamento dos agregados.

### **2.4.3 Fatores que influenciam na resistência à punção em lajes sem armadura de cisalhamento**

#### **2.4.3.1 Resistência à compressão do concreto**

Em lajes que não possuem armadura de punção, a resistência à tração do concreto é a principal responsável em combater os esforços de cisalhamento. Um dos primeiros e principais parâmetros definidos em projeto para qualquer elemento de concreto armado é a resistência à compressão do concreto. Menetrey (2002) afirma que a parcela resistente do concreto é função da componente vertical de uma tensão resistente de tração atuando na área da superfície de ruptura, que nos remete à conclusão de que a parcela de resistência do concreto é influenciada pelo comportamento à flexão da laje.

#### **2.4.3.2 Taxa de armadura de flexão tracionada**

Para levar em consideração corretamente a influência da armadura de flexão das lajes é preciso definir a quantidade de armaduras que de fato contribui. É comum que a taxa de armadura de flexão seja definida como  $x y$ , sendo  $x$  e  $y$  as taxas de armaduras de flexão nas direções  $x$  e  $y$ , tornando dificultando a definição da área de influência das armaduras de flexão em  $x$  e  $y$ . Regan (1981) sugere que a influência da armadura de flexão na resistência à punção seja proporcional à raiz cúbica da taxa de armadura flexão.

### **2.4.3.3 Efeito de tamanho**

O efeito de tamanho, refere-se ao fato de que, em igualdade de condições, as lajes que possuem menor altura útil são mais resistentes quando comparadas a lajes de maior espessura, ou seja, a influência do efeito de tamanho está relacionada com a altura útil da laje. Este fato pode ser justificado devido a possibilidade de maior heterogeneidade do concreto em lajes mais espessas.

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

### **2.4.4.4 Dimensões e geometria do pilar**

A geometria e as dimensões do pilar são determinantes em relação à maneira que as tensões se distribuem na ligação laje-pilar e afetam a resistência de uma laje.

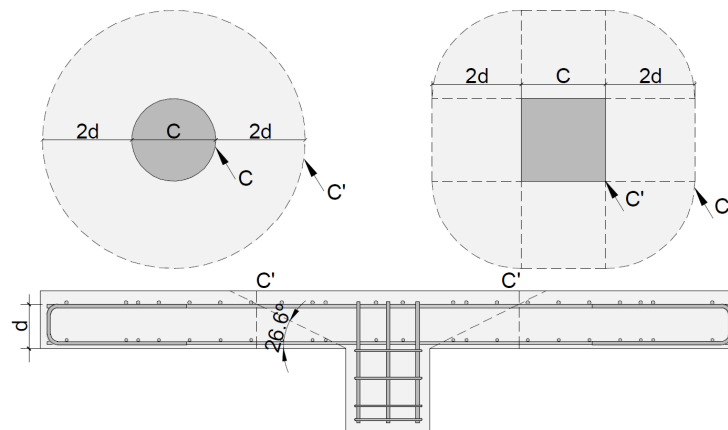
Para pilares alongados, em que a relação entre o maior lado e o menor lado é maior que 2 (dois), a ruína tende a ocorrer de forma mais abrupta, e o tamanho do cone de punção e a resistência da ligação são menores, quando comparados com pilares de seções quadradas. Isto pode ser explicado pelo fato de esses pilares apresentarem uma concentração de tensões nos cantos (MELGES, 2001).

## **2.5 Recomendações normativas para cargas de ruptura de lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento**

### **2.5.1 ABNT NBR 6118:2014**

A ABNT NBR 6118:2014 (2014), assim como a EN 1992-1-1:2004 (Eurocode 2:2004), tem sua recomendação baseada no texto do CEB - FIP Model Code 1990

(1993) e verifica a resistência à punção em lajes lisas sem armadura de cisalhamento ( $V_{Rc}$ ) considerando as diagonais comprimidas do concreto. Nesse modelo de análise, a superfície de controle é dada como a relação entre o perímetro do pilar ou área carregada e é realizada a verificação do perímetro de controle na distância de duas vezes a média de altura útil da laje ( $d$ ). A Figura 2.6 mostra o perímetro de controle para pilares de centro com seções retangulares.



**Figura 2.6 - Perímetro de controle conforme a ABNT NBR 6118:2014.**  
**Fonte: ABNT NBR 6118 (2014)**

A verificação de resistência à punção para lajes lisas sem armadura de cisalhamento, obedecendo os critérios da ABNT NBR 6118 (2014), deve ser realizada conforme a Equação 2.1.

$$V_{Rc.NBR} = 0,182 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot c' \cdot d$$

$$(100 \cdot V_{Rc.NBR} = 0,182 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot c' \cdot d \quad (2.1)$$

Onde:

$V_{Rc.NBR}$  = Resistência ao cisalhamento de lajes lisas sem armadura de cisalhamento segundo a NBR 6118:2014 (em MPa);

$k$  é um parâmetro que considera o efeito de escala, obtido a partir de

$$k = 1 + \frac{\sqrt{200}}{d}, \text{ com } d \text{ em milímetros;}$$

$\rho$  é a média geométrica da taxa de armadura de flexão nas duas direções calculada por  $\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}$  onde  $\rho_x$  e  $\rho_y$  são as taxas de armadura de flexão da laje

nos sentidos  $x$  e  $y$ , considerando 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 (MPa);

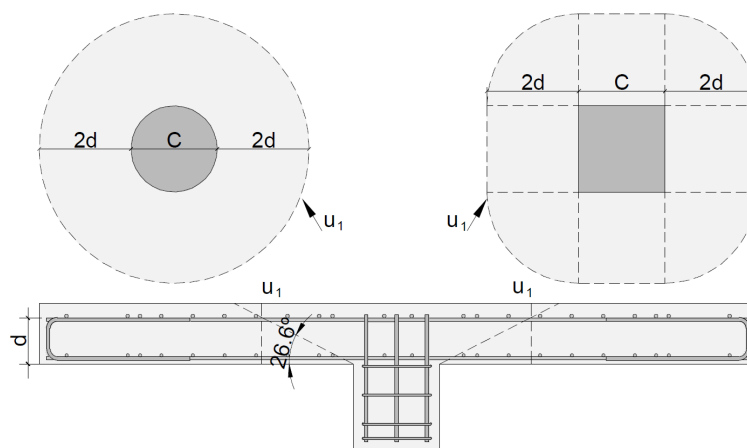
$u_1$  é o perímetro de controle afastado a  $2 \cdot d$  das faces do pilar;

$d$  é a altura útil da laje (em centímetros).

Esse modelo de verificação é semelhante ao da norma Eurocode 2 (2004), porém na análise feita pela ABNT NBR 6118 (2014) não há limitações para a taxa de armadura de flexão ( $\rho$ ) e efeito escala. Além disso, o coeficiente de segurança ( $\gamma_c$ ) é 1,4 para a ABNT NBR 6118, enquanto na Eurocode 2 (2004) é 1,5.

### 2.5.2 EN 1992-1-1:2004

Conhecida como Eurocode 2 (2004), a EN 1992-1-1:2004 estabelece que deve ser feito um perímetro de controle afastado a duas vezes a altura útil da face do pilar ou área carregada, considerando uma inclinação hipotética de fissuração a  $26,6^\circ$ , que pode ser vista na Figura 2.7.



**Figura 2.7 - Perímetro de controle conforme o Eurocode 2:2004.**  
**Fonte: Eurocode 2 (2004)**

A estimativa de resistência à punção utilizada por essa norma é baseada em formulações científicas que consideram o efeito escala ( $k$ ), taxa de armadura de flexão ( $\rho$ ) e a resistência do concreto ( $f_c$ ) e pode ser obtida pela Equação 2.2.

$$V_{R_c, EC2} = 0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot u_1 \cdot d \geq v_{\min} \quad (2.2)$$

Onde:

$V_{Rc.EC2}$  = Resistência ao cisalhamento de lajes lisas sem armadura de punção segundo a Eurocode 2 (MPa);

0,18 é o coeficiente  $\left(\frac{C_{Rc}}{Y_c}\right)$  recomendado pela norma;

$k$  é um parâmetro que considera o efeito de escala, obtido a partir de

$$k = 1 + \frac{\sqrt{200}}{d} \leq 2, \text{ com } d \text{ em milímetros};$$

$\rho$  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  $\rho_x$  e  $\rho_y$  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 (MPa);

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

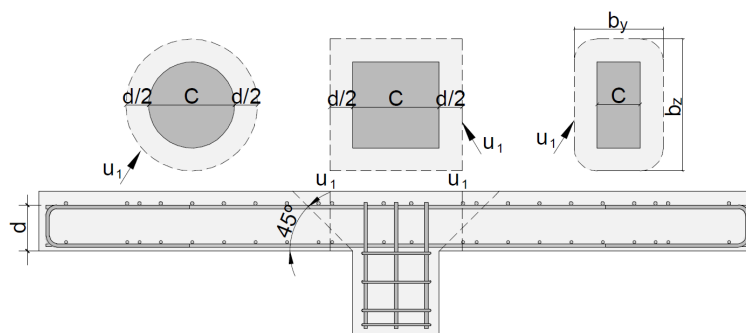
$d$  é a altura útil da laje (em milímetros);

$v_{min}$  é a tensão resistente mínima para o caso de taxas de armadura de flexão muito baixas, obtida a partir de  $v_{min} = 0,035 \cdot k^{2/3} \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d$

### 2.5.3 ACI 318:2019

A estimativa de resistência à punção para lajes lisas de concreto armado sem armaduras de cisalhamento adotada por esse modelo é verificada considerando uma tensão resistente aplicada a uma distância afastada do perímetro de controle semelhante à ABNT NBR 6118:2014, porém a  $\frac{d}{2}$  da face do pilar, com superfície média posicionada no meio da fissura de punção com inclinação determinada a  $45^\circ$ .

A carga de ruptura de lajes lisas sem armadura de punção pode ser obtida multiplicando a tensão  $v_{Rc}$  pela área que teoricamente está sendo aplicada, de forma análoga ao que é sugerido pela NBR 6118:2014. A Figura 2.8 mostra o perímetro de controle recomendado pelo ACI 318 (2019).



**Figura 2.8 - Perímetro de controle conforme o ACI 318:2019.  
Fonte: ACI 318 (2019)**

Essa norma utiliza um modelo no qual a resistência da laje sem armadura de cisalhamento é dada pelo menor valor entre as expressões da Equação 2.3. Isso acontece porque a resistência à punção não depende exclusivamente da raiz da resistência à compressão ( $\sqrt{f_c}$ ).

A segunda expressão considera o efeito negativo que pilares com dimensões reduzidas em relação à altura útil da laje, enquanto a terceira estima redução na tensão resistente para pilares retangulares devido às concentrações de tensões em suas extremidades.

$$V_{\min} \begin{cases} 0,33 \cdot \lambda_s \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c} \\ 0,17 \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \cdot \lambda_s \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c} \\ 0,083 \cdot \left(2 + \frac{\alpha_s \cdot d}{u_1}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c} \end{cases} \quad (2.3)$$

Onde:

$\lambda$  é o fator de redução, para concreto leves = 0,75 e demais tipos = 1,0;

$\lambda_s$  é o efeito escala, obtido a partir de  $\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + 0,004 \cdot d}} \leq 1,0$

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

MPa;

$\beta$  é a relação entre o maior e menor lado do pilar  $\left[\frac{a}{b}\right]$ , onde  $a$  e  $b$

representam a maior e menor dimensão, respectivamente;

$\alpha_s = 40$  para pilares internos, 30 para pilares de extremidade e 20 para pilares de canto;

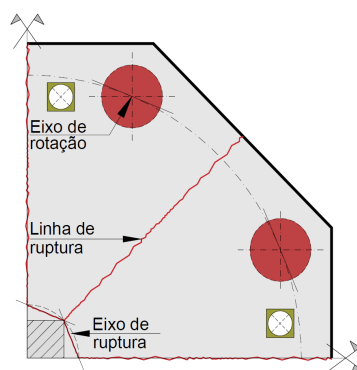
$u_1$  é o perímetro de controle em mm;

$d$  é a altura útil da laje em mm.

## 2.6 Resistência à flexão

A resistência à flexão foi calculada a partir do modelo teórico de linhas de ruptura, que obtém resultados satisfatórios e é comumente utilizada por pesquisadores da área, como Regan (2000), Ferreira (2010), Lima Neto (2012), Freitas (2018) e Pereira Filho (2021).

O modelo apresentado nesta seção foi desenvolvido por Regan (2015) e considera o carregamento aplicado simetricamente em todos os bordos das lajes, idealizando uma laje armada em duas direções. A Figura 2.9 mostra a distribuição das linhas de ruptura e eixo de rotação que foram utilizados nesta pesquisa, baseadas em trabalhos com lajes de geometria similar, como o de Freitas (2018) e Pereira Filho (2021).



**Figura 2.9 - Distribuição das linhas de ruptura.**  
**Fonte: (FERREIRA et al., 2021)**

A partir do octógono formado ao redor do pilar, foram traçadas linhas de rupturas distribuídas em 8 pontos espaçados de maneira uniforme. É possível notar que os eixos de rotação nos pilares não formam um quadrado, isso deve-se à aproximação equivalente do pilar a um octógono, pois a partir dele é traçada uma distribuição das possíveis linhas de ruptura do elemento, uma vez que o carregamento foi aplicado em 8 pontos espaçados igualmente. Com isso, pode-se

correlacionar à deflexão das lajes e aplicar a Equação 2.10 para determinar a carga de ruptura ( $V_{flex}$ ).

$$V_{flex} = 9,76 \cdot m_r$$

Onde:

$$m_r \text{ é o momento resistente da laje, obtido por } m_r = \rho \cdot f_{ys} \cdot d^2 \cdot \left( 1 - \frac{\rho \cdot f_{ys}}{2 \cdot f_c} \right).$$

$\rho$  é a taxa de armadura de flexão das lajes;

$f_{ys}$  é a tensão de escoamento do aço;

$d$  é a altura útil das armaduras;

$f_c$  é a resistência à compressão do concreto.

## 2.7 Pesquisas relacionadas

### 2.7.1 Rao et al. (2012)

Este trabalho avalia o comportamento experimental de lajes lisas com substituição parcial e total de agregados naturais por reciclados. O programa experimental utilizado foi composto por 6 lajes lisas de concreto armado simplesmente apoiadas, com dimensões de 1100x1100x50 mm e diferentes taxas de ARCO (0, 20, 40, 60, 80 e 100 %), submetidas a um carregamento central aplicado em uma placa metálica de 100x100x20 mm afim de simular o pilar. A Tabela 2.2 apresenta os resultados dos parâmetros avaliados.

**Tabela 2.2 – Resultados experimentais de Rao et al. (2012)**

Laje	%ARCO	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$V_{rc}$ (kN)
NCAC-S	0	43.33	3.35	48.20
RCAC-20-S	20	42.52	3.25	47.20
RCAC-40-S	40	40.96	3.16	45.80
RCAC-60-S	60	38.37	3.11	44.60
RCAC-80-S	80	35.48	2.88	42.80
RCAC-100-S	100	33.48	2.78	41.40

**Fonte: (RAO et al., 2012), adaptado pelo Autor (2021)**

Onde:

$f_c$  = Resistência à compressão

$f_t$  = Resistência à tração por compressão diametral

$V_{rc}$  = Capacidade resistente ao cisalhamento

O efeito da substituição de agregado natural por ARCO, foi avaliado por meio dos seguintes parâmetros: modo de fissuração, cargas últimas, curvas de carga-deslocamento, rigidez e energia de absorção.

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

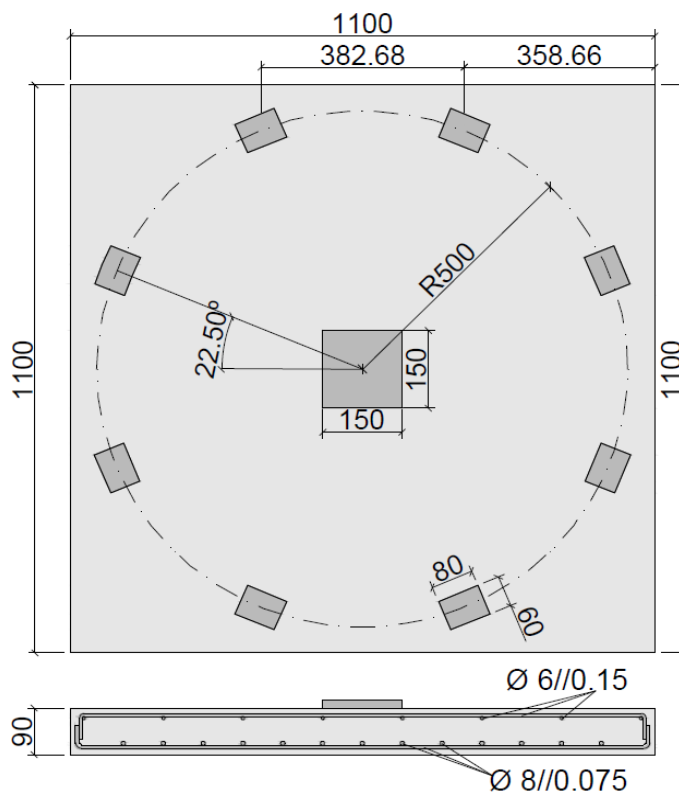
De acordo com os resultados apresentados, os autores concluíram que o aumento do teor de ARCO resulta na redução da resistência à compressão e tração do concreto, assim como para carga última e carga de fissuração, de modo que até 40 % de substituição a redução é considerada admissível (RAO et al., 2012). No entanto, quanto ao padrão de falha por punção todas as lajes se comportaram de maneira semelhante independentemente da porcentagem de substituição de ARCO.

### **2.7.2 Reis et al. (2015)**

Esta pesquisa objetivou avaliar o efeito da incorporação de agregado graúdo reciclado de concreto (ARCO-G) no comportamento à punção de lajes de concreto armado, através de investigações experimentais, numéricas e analíticas.

A respeito do programa experimental, verificou-se que consistiu em um total de 8 lajes de concreto armado. As dimensões das lajes foram de 1100x1100x90 mm com uma placa de 150x150x30 mm posicionada entre a laje e o macaco hidráulico para simular um pilar. O carregamento foi aplicado de cima para baixo no centro das lajes em 8 pontos distribuídos em um padrão circular. A geometria geral, as dimensões das lajes, bem como as armaduras longitudinais e a localização dos

apoios são apresentadas na Figura 2.10. Vale ressaltar que não foram utilizadas armaduras de cisalhamento e o concreto foi especificado para ter uma resistência de compressão mínima aos 28 dias de 30 MPa.



**Figura 2.10 - Geometria geral dos modelos de Reis et al., (2015)**  
**Fonte: (REIS et al., 2015)**

Nesta pesquisa, a principal variável de estudo incluiu 4 taxas de substituição de agregado natural (AN) por ARCO-G: 0%, 20%, 50% e 100%, considerando duas lajes por taxa de substituição. As propriedades do concreto no estado fresco foram avaliadas quanto ao teste de abatimento de tronco de cone (*slump test*) e a densidade aparente. Este último, diminuiu com o ARCO-G, justificado pela menor densidade do ARCO-G em relação ao agregado natural.

Para avaliar as propriedades mecânicas de cada tipo de concreto usado para moldar as lajes foram realizados os seguintes teste aos 28 dias: resistência a compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

A Tabela 2.3 apresenta as principais características das lajes analisadas, assim como a redução das propriedades mecânicas do concreto reciclado em relação ao concreto de referência.

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

Laje	Teor de substituição (%)	Resistência à compressão (cubo)		Resistência à tração por compressão diametral		Módulo de elasticidade	
		<i>f<sub>ck</sub></i> (MPa)	Redução da resistência à compressão com 28 dias (%)	<i>f<sub>ct</sub></i> (MPa)	Redução da resistência à tração com 28 dias (%)	<i>E</i> (GPa)	Redução do módulo de elasticidade com 28 dias (%)
RC-1	0	46,8 + 2,0	-	3,17+ 0,42	-	33,7+ 0,6	-
RC-2							
C20-1	20	44,3 + 2,3	-5,4	2,90+ 0,24	-8,3	32,8+ 0,8	-2,7
C20-2							
C50-1	50	46,6 + 1,0	-0,5	2,94+ 0,21	-7,0	32,7+ 0,7	-3,1
C50-2							
C100-1	100	45,6 + 1,2	-2,5	2,86+ 0,32	-9,5	31,5+ 0,6	-6,7
C100-2							

Fonte: (REIS et al., 2015), adaptado pelo Autor (2021)

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

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

No tocante da resistência a punção verificou-se que a incorporação de ARCO-G não afetou significativamente o comportamento das lajes, com variação máxima de 4,8% para C20. Para lajes C100 a redução foi de apenas 2%, sendo justificado pela incerteza experimental.

A comparação das propriedades mecânicas do concreto e a resistência à punção das lajes apresentou uma ligeira correlação, uma vez que, a ligeira redução da resistência à compressão apresentada pelas misturas com ARCO-G parece explicar o comportamento das lajes similar as lajes correspondentes.

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

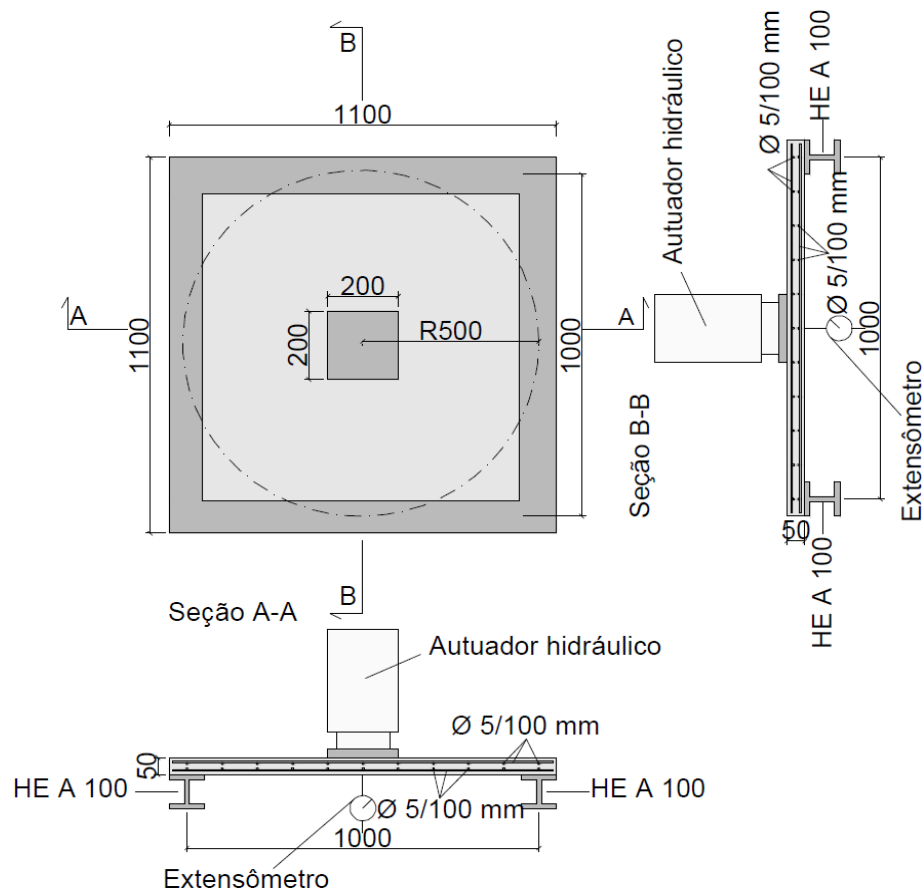
O estudo analítico buscou avaliar a precisão relativa das formulações disponíveis nas normas internacionais para prever a força de punção em lajes de concreto armado. Em particular, as seguintes diretrizes foram analisadas: EUROCODE 2 – EC2 (2004), ACI 318 (2019) e o *fib* Model Code 2010 (2013), de modo que este apresentou as previsões mais precisas.

### **2.7.3 Francesconi et al. (2016)**

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

O programa experimental foi realizado com 15 lajes com dimensões de 1100x1100x50 mm e foram utilizadas 5 taxas de substituição: 0, 30, 50, 80 e 100%. Cada laje foi apoiada por vigas de aço nas quatro bordas. A carga foi aplicada no centro de cada modelo através de uma placa de aço e 200x200x5 mm, simulando um pilar. A Figura 2.11 apresenta o sistema de ensaio utilizado.

As principais investigações foram realizadas a partir dos padrões de ruptura, cargas finais e curvas de carga deflexão. Além disso, comparações e análises das normas internacionais ACI 318 (2019), Eurocode 2 (2004) e *fib* Model Code 2010 (2013) para lajes submetidas à punção também foram desenvolvidas.



**Figura 2.11 – Geometria dos modelos de Francesconi et al., (2016)**  
**Fonte: (FRANCESCONI et al., 2016)**

Os autores relatam uma redução na resistência a compressão, tração e módulo de elasticidade do concreto com a substituição do agregado natural pelo reciclado. No entanto, o comportamento das lajes à punção foi detectado independentemente da presença dos agregados reciclados, uma vez que a redução da resistência observada nos 29 corpos de prova do concreto não refletiu diretamente na redução das cargas últimas das lajes com ARC.

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

**Tabela 2.4 - Resultados experimentais de Francesconi et al. (2016)**

Laje	%ARCO	Vu		Vrd,ACI		Vrd,EC2		Vrd,MC10							
		Exp	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		72,50													
NC0-2	0	68,70	68,70	78,90	67,10	89,40	52,94		83,00	59,18	90,06	65,60	96,27	71,49	
NC0-3		64,90													
RC1-1		64,90													
RC1-2	30	72,50	69,97	74,60	63,40	86,47	51,01		78,50	56,00	85,18	62,05	90,41	66,99	
RC1-3		72,50													
RC2-1		64,90													
RC2-2	50	68,70	66,17	73,70	62,60	85,74	50,58		77,50	55,27	84,10	61,26	89,26	66,14	
RC2-3		64,90													
RC3-1		68,70													
RC3-2	80	64,90	68,70	70,20	59,70	83,02	48,98		73,85	52,67	80,14	51,38	85,06	63,04	
RC3-3		72,50													
RC4-1		68,70													
RC4-2	100	68,70	69,97	66,70	56,70	80,23	47,33		70,15	50,03	76,12	55,45	80,8	59,87	
RC4-3		72,50													

**Fonte: Francesconi et al. (2016), adaptado pelo autor (2021)**

No caso do ACI 318 (2019), deve ser avaliado o parâmetro  $k$  que considera a densidade do agregado e pode modificar a resistência ao cisalhamento. Quanto ao Eurocode 2 (2004), o parâmetro  $k$  que avalia a esbeltez das lajes deve ser criteriosamente observado uma vez que a altura útil das lajes influencia diretamente no desempenho delas.

Por fim, o *fib Model Code 2010* (2013) considera o parâmetro  $k_{dg}$ , referente a diâmetro máximo dos agregados, desempenha um papel importante para a avaliação da eficiência em todos os níveis de aproximação. Desse modo, os parâmetros relacionados aos agregados e a esbeltez dos modelos, devem ser cuidadosamente avaliados principalmente quanto a sua relação com a resistência à punção.

### 2.7.4 Mahmoud et al. (2018)

Esta pesquisa avalia o comportamento experimental de lajes de concreto armado com diferentes teores de substituição de agregados naturais por agregados reciclados submetidas à ensaios de punção. O sistema de ensaio utilizado foi realizado com carregamento centrado em placas nas quatro bordas e pode ser visto na Figura 2.12.

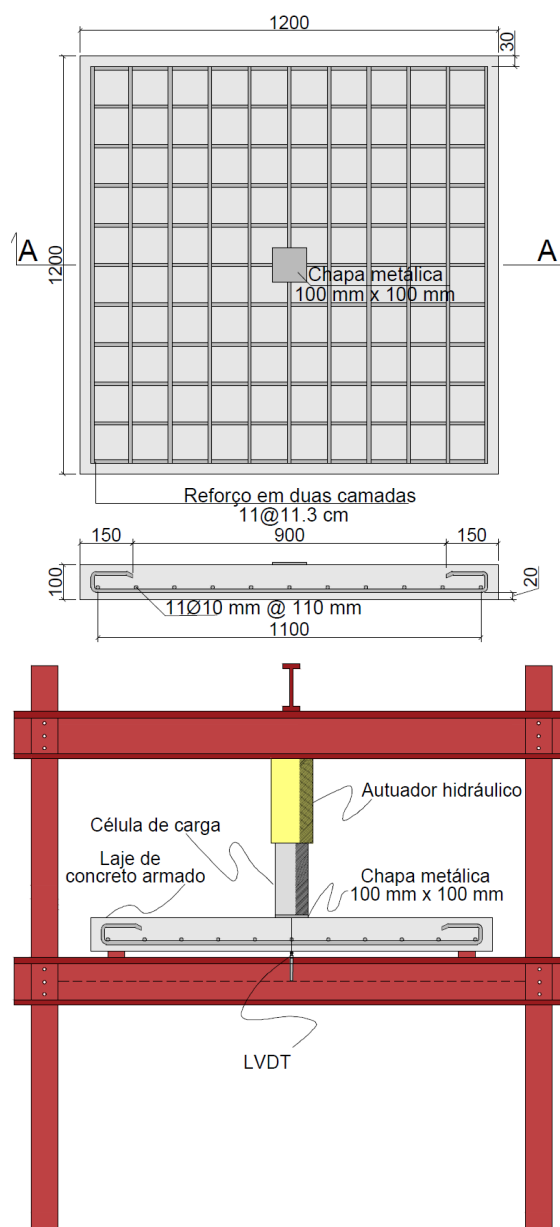
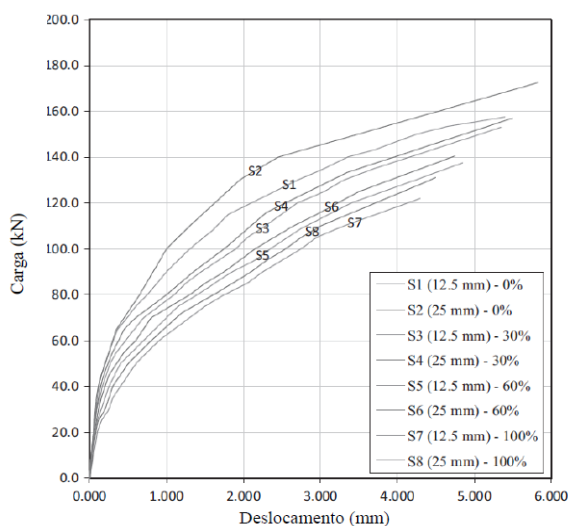


Figura 2.12 – Espécimes e sistema de ensaio de Mahmoud et al. (2018)  
Fonte: Mahmoud et al. (2018)

Foram analisadas 8 lajes de concreto armado, utilizando dois tipos de agregado (natural e reciclado) e duas granulometrias (12.5 e 25 mm), com quatro taxa de substituição (0, 30, 60 e 100%). As lajes ensaiadas tinham dimensões de 1200x1200x100 mm, armadas nas duas direções com barras de 10 mm de diâmetro e cobertura de 20 mm.

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

Os autores ressaltam também a redução na energia de absorção, definida através da área abaixo da curva carga-deslocamento, como mostra a Figura 2.13, assim como para rigidez das lajes com o aumento do teor de ARC e com a diminuição do tamanho do agregado.



**Figura 2.13 - Relação carga x deslocamento.**  
**Fonte: (MAHMOUD et al., 2018)**

As lajes foram comparadas analiticamente por meio de códigos internacionais de modo que todos foram considerados conservadores na estimativa da capacidade resistente à punção dos modelos ensaiados e a norma que mais se

aproximou dos resultados experimentais foi o Eurocode 2 (2004). A Tabela 2.5 apresenta os resultados encontrados neste trabalho.

**Tabela 2.5 - Resultados experimentais de Mahmoud et al. (2018)**

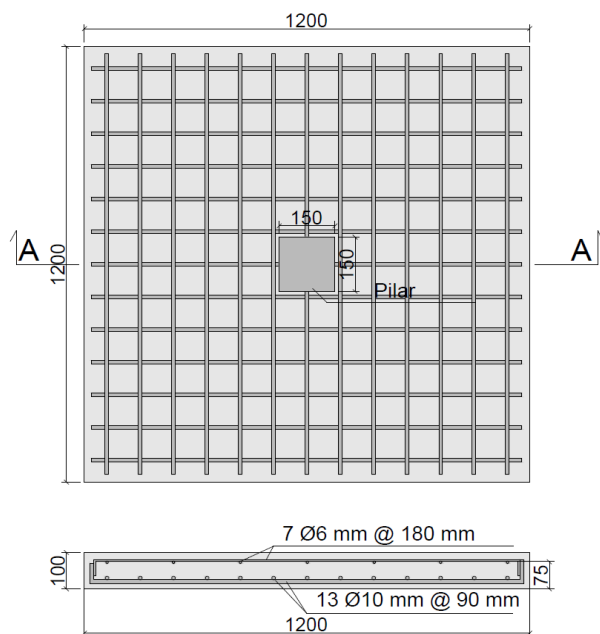
Laje	ARCO (%)	Ø agregado (mm)	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	Carga da primeira fissura (kN)	Carga última (kN)	Energia de absorção (kN/m)	$P_{ACI}$ (kN)	$P_{EC2}$ (kN)
S1	0	12,5	36,90	3,80	116	157,5	0,652	95,40	128,7
S2	30		34,50	3,71	105	153	0,591	92,30	125,9
S3	60		32,50	3,58	95,4	137,5	0,471	89,60	123,4
S5	100		31,60	3,5	85,5	122	0,36	88,30	123,3
S2	0	25	39,70	3,91	120	172,5	0,773	98,90	131,9
S4	30		36,40	3,73	110	157	0,63	94,70	128,1
S6	60		34,10	3,67	100	140,5	0,476	91,70	125,3
S8	100		33,60	3,63	90,3	131	0,403	91,10	124,8

**Fonte: (MAHMOUD et al., 2018), adaptado pelo autor (2021)**

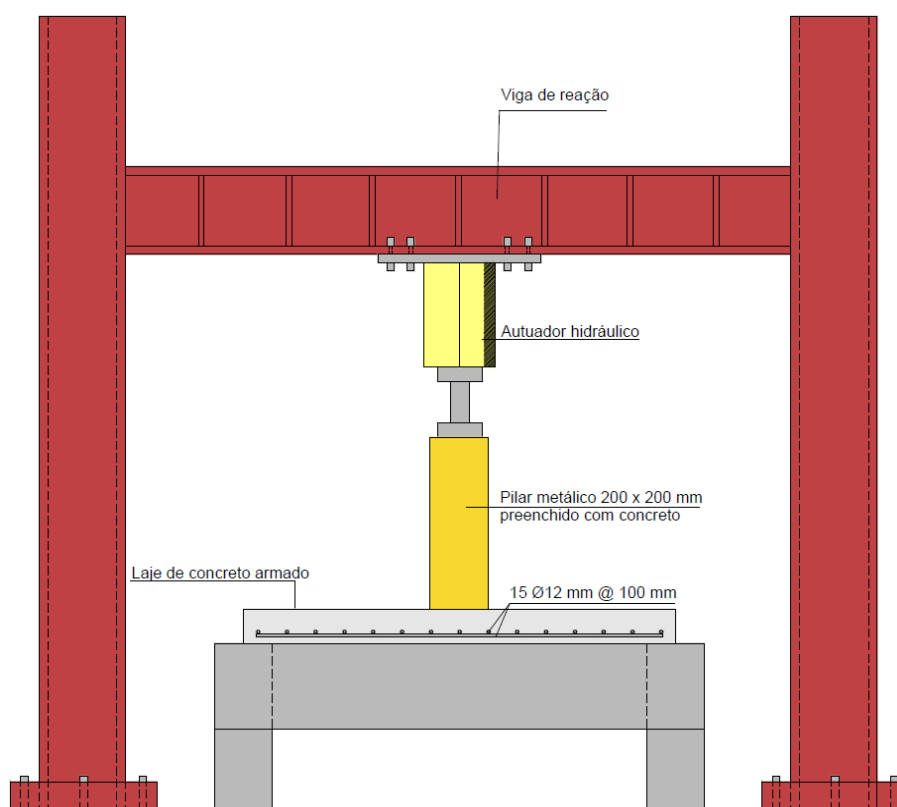
### 2.7.5 Xiao et al. (2019)

Foi realizado um estudo sobre o comportamento e resistência à punção de 8 lajes lisas de concreto armado utilizando concreto reciclado. Os principais fatores da pesquisa foram a taxa de substituição de agregado natural por agregado reciclado e fibras de aço. A geometria dos espécimes pode ser vista conforme a Figura 2.14 e o sistema de ensaio na Figura 2.15.

As porcentagens de substituição de agregados reciclados usados nos testes foram de 0%, 30%, 50% e 100%, respectivamente e a taxa de incorporação de fibras de aço foi de 0%, 0,5% e 1,0%. A Tabela 2.6 mostra a resistência à compressão do concreto e módulo de elasticidade das lajes.



**Figura 2.14 – Geometria dos espécimes de Xiao et al. (2019)**  
**Fonte: Xiao et al. (2019)**



**Figura 2.15 – Sistema de ensaio de Xiao et al. (2019)**  
**Fonte: Xiao et al. (2019)**

**Tabela 2.6 - Resultados experimentais de Xiao (2019)**

Laje	$f_c$ (MPa)	E (MPa)	Vu (kN)
RAC0RAC30-0%	39,90	3,73	320,0
RAC0RAC30-0%	31,35	3,50	313,4
RAC50-0%	33,25	2,96	307,1
SFRAC50-0,5%	38,95	3,20	366,8
SFRAC50-1%	36,10	3,05	370,6
RAC100-0%	28,50	2,74	303,4
SFRAC100-0,5%	31,35	2,32	331,2
SFRAC100-1%	32,30	2,47	350,2

Fonte: Xiao et al. (2019)

O teste foi controlado por passos de carga constantemente até o espécime romper. Verificou-se que com o aumento da porcentagem de substituição de agregados reciclados de concreto a resistência à punção foi reduzida e conforme houve o aumento da adição de fibras de aço, a carga final foi melhorada e a deformação seguiu uma tendência crescente.

### 2.7.6 Sahoo e Singh (2020)

Nesta pesquisa foi realizado um estudo sobre o comportamento e resistência à punção em 12 lajes de concreto armado construídas com três diferentes taxas de substituição (0%, 50% e 100%) de agregados reciclados de concreto derivados de resíduos de concreto de laboratório e taxa de armadura de flexão de 0,21 e 1,16%.

Os resultados experimentais de Sahoo e Singh (2020) podem ser observados na Tabela 2.7.

**Tabela 2.7 - Resultados experimentais de Sahoo e Singh (2020)**

Laje	$f_c$ (MPa)	Carga de punção experimental (kN)		Vflex (kN)	Previsões de carga conforme critérios normativos			
		Vexp	Vmédia		ACI 318/2014		EC2	
					Vaci	Vmédia/Vaci	Vce	Vmédia/Vce
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						

Laje	$f_c$ (MPa)	Carga de punção experimental (kN)		Vflex (kN)	Previsões de carga conforme critérios normativos			
					ACI 318/2014		EC2	
		Vexp	Vmédia		Vaci	Vmédia/Vaci	Vce	Vmédia/Vce
N100-1	29,4	218,9	224,43	236,8	121,9	1,84	134,95	1,66
N100-2		230						
M0-1	43,7	259,3	254,72	246,7	148,7	1,71	154,1	1,65
M0-2		250,1						
M50-1	43,5	252,6	254,18	246,6	148,43	1,71	153,8	1,65
M50-2		255,8						
M100-1	43	257,1	258,57	246,4	147,57	1,75	153,28	1,68
M100-2		260,1						

Fonte: Sahoo e Singh (2020)

A geometria dos espécimes pode ser vista conforme a Figura 2.16.

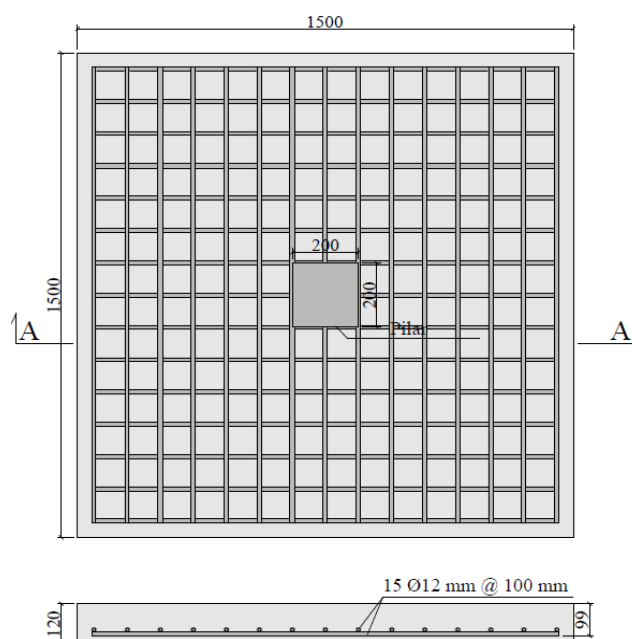


Figura 2.16 – Geometria dos espécimes de Sahoo e Singh (2020)  
Fonte: Sahoo e Singh (2020), adaptado pelo Autor (2021)

As relações carga-deslocamento obtidas nos ensaios experimentais demonstraram que o efeito da substituição de agregado graúdo natural por ARCO-G não obteve resultados significantes para ambos os tipos de concreto, no que diz respeito à resistência à compressão e capacidade resistente à punção.

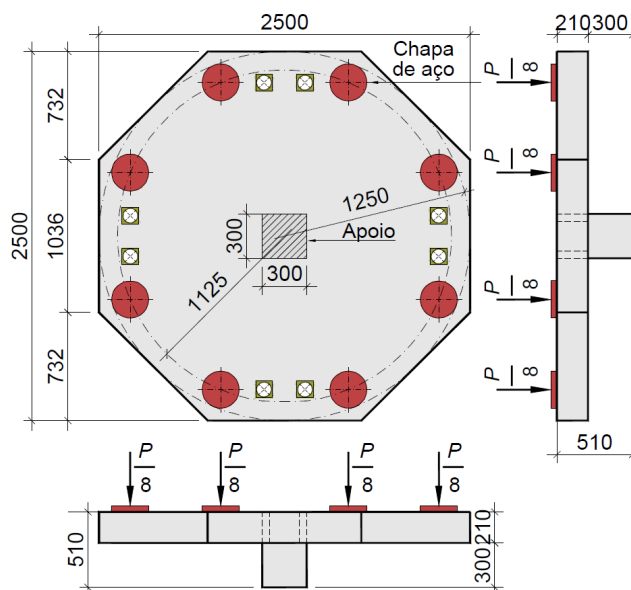
### **3. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Esta pesquisa teve como motivação analisar experimentalmente a capacidade resistente à punção na região de ligação laje-pilar em lajes lisas de concreto armado, com diferentes taxas de armadura de flexão e teores de substituição de agregado natural por ARCO-G. Foram realizados ensaios experimentais de seis lajes lisas de concreto armado, sendo duas sem substituição de agregados naturais por reciclados de concreto e quatro com agregados reciclados de concreto submetidas a carregamento simétrico e pilar interno, a fim de analisar a influência da taxa de substituição do agregado natural (AN) por agregado graúdo reciclado de concreto (ARCO-G) na resistência à punção.

Os agregados reciclados de concreto foram produzidos no período de setembro de 2019 a janeiro de 2021. A pesquisa experimental compreendeu o período de agosto de 2020 a abril de 2021 e foi realizada no Laboratório de Estruturas do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia - NDAE da Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí.

#### **3.1 Características das lajes**

Os ensaios foram realizados em modelo de ligação laje-pilar de geometria octogonal com lados de 1040 mm, distância entre faces opostas de 2500 mm e altura nominal de 210 mm. Os apoios foram distribuídos de modo circunferencial em pontos equidistantes em um raio de 1125 mm. As lajes foram carregadas de modo centrado por meio de pilares quadrados de 300 mm x 300 mm. As principais variáveis deste programa são: a taxa de substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto, sendo 0%, 30% e 100% e a taxa de armadura de flexão (0,7% e 1,4%). A Figura 3.1 demonstra a geometria das lajes ensaiadas e a Tabela 3.1 resume as informações desse programa experimental.



**Figura 3.1 - Geometria das lajes**  
Fonte: Autor (2021)

Na tabela são apresentadas a altura útil ( $d$ ) das lajes medidas anterior à concretagem, taxa ( $\rho$ ), diâmetro das barras de flexão ( $\varnothing f$ ), tensão de escoamento do aço ( $f_{ys}$ ) e módulo de elasticidade ( $E_s$ ) da armadura de flexão.

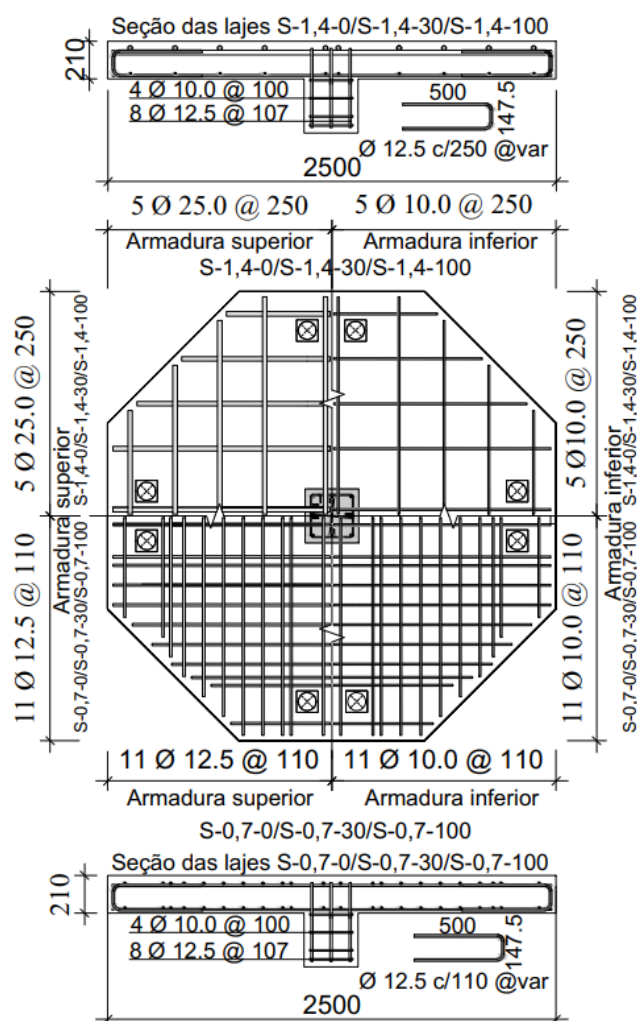
**Tabela 3.1 - Características das lajes.**

Laje	Teor de ARCO-G (%)	$d$ (mm)	$\rho$ (%)	$\varnothing f$ (mm)	$f_{ys}$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$f_c$ (MPa)
S-0,7-0	0	162,5	0,7	12,5	535	200	20.73
S-0,7-30	30	165					21.92
S-0,7-100	100	165	23.05				
S-1,4-0	0	165	1,4	25,0			22.78
S-1,4-30	30	164,8					21.52
S-1,4-100	100	166,8					21.44

Fonte: Autor (2021)

### 3.1.1 Armaduras de flexão das lajes

As armaduras foram compostas por barras de aço CA 50 distribuídas nas faces superiores e inferiores das lajes. Os espécimes apresentaram 8 furos quadrados de 100 mm de lado, necessários para a montagem no sistema de ensaio. Por sua vez, estes furos entraram em conflito com algumas armaduras de flexão, exigindo reajuste de posicionamento nos pontos de interferência. As armaduras de flexão das lajes ensaiadas podem ser vistas conforme a Figura 3.2.



**Figura 3.2 – Armaduras de flexão das lajes**  
**Fonte: Autor (2021)**

A malha inferior de todas as lajes foi composta por barras de  $\varnothing 10.0$  mm, alinhadas com as armaduras superiores, objetivando evitar a fissuração da laje durante a mobilização e a degradação total dos modelos após a ruptura por punção. Foram confeccionados ganchos no formato de “u” com barras de  $\varnothing 12.5$  mm para garantir a ancoragem das armaduras de flexão. A fôrma e a disposição as armaduras podem ser vistas conforme as Figuras 3.3 e 3.4.



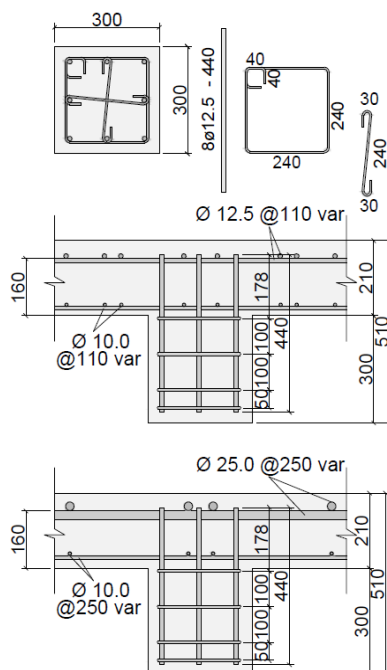
**Figura 3.3 - Lajes com  $\rho = 0,7\%$   
Fonte: Autor (2021)**



**Figura 3.4 - Lajes com  $\rho = 1,4\%$   
Fonte: Autor (2021)**

### **3.1.2 Armaduras dos pilares**

As armaduras dos pilares foram compostas por 8 barras de 12.5 mm de diâmetro de aço CA-50 dispostas longitudinalmente e estribos de 8.0 mm de diâmetro, com espaçamento variando entre 50 mm e 100 mm, com 30 mm de cobertura de concreto. O detalhamento dos pilares é mostrado na Figura 3.5.



**Figura 3.5 - Detalhamento dos pilares.**  
**Fonte: Autor (2021)**

## 3.2 Materiais utilizados

### 3.2.1 Agregados naturais, reciclados de concreto, dosagem e traço

Os agregados naturais que utilizados nesta pesquisa foram areia natural de quartzo e brita comercialmente numerada como #1, oriunda de rochas basálticas.

A caracterização da areia foi realizada segundo a ABNT NBR NM 45 (2006) para massa unitária e a ABNT NBR NM 52 (2009) para massa específica, assim como a caracterização da brita #1, que foi realizada conforme a ABNT NBR NM 53 (2009) para massa específica e ABNT NBR NM 45 (2006) para massa unitária. A graduação granulométrica foi feita de acordo com a ABNT NBR NM 248 (2003).

A substituição de agregados naturais por agregados reciclados foi feita por meio da parcela gráuda. Foram estudados 3 traços de concreto contendo: 0%, 30% e 100% de agregado gráudo reciclado de concreto, de modo que o teor de 0% será analisado como traço de referência, utilizando somente agregados naturais.

Os agregados reciclados utilizados nesta pesquisa são oriundos do beneficiamento de corpos-de-prova cilíndricos descartados no laboratório de engenharia civil da Universidade Federal do Pará – Campus Belém e de

concreteiras municipais. Os corpos de prova foram selecionados de modo que não apresentassem substituições e/ou adições, como fibras naturais, aço ou sintéticas.

Foi utilizado britador do tipo mandíbula para o beneficiamento dos corpos-de-prova que, após triturados, passaram por um processo de peneiramento de modo a separar os agregados obtidos em faixas granulométricas, com graduações de #19 mm, #12,5 mm, #9 mm e #4,8 mm, garantindo o diâmetro máximo do ARCO-G de 19 mm.

Foi aplicado à dosagem o cimento CP II F-32, com características físicas e mecânicas de acordo com a ABNT NBR 5736 (1991). Conforme a ABNT NBR 16697 (2018) esse cimento possui em sua composição de 11% a 25% de material carbonático, de 75% a 89% de clínquer e sulfatos de cálcio. A escolha desse aglomerante se deu por conta da facilidade de obtenção no mercado local e sua variedade de aplicações em obras.

Para a dosagem do concreto foram utilizadas as curvas de dosagem elaborado por SANTOS et al. (2015), baseado no método de dosagem IPT/EPUSP proposto por HELENE e TERZIAN (1992). O traço do concreto e as quantidades de materiais utilizados estão dispostos na Tabela 3.2 e 3.3, onde pode-se verificar a resistência ( $f_c$ ) do concreto requerida aos 28 dias, teor de substituição de ARCO-G, relação água cimento ( $a/c$ ), massa unitária ( $m$ ) e o consumo de cimento ( $C_c$ ). O teor de argamassa ( $\alpha_{arg}$ ) dos traços é igual a 51%, pretendendo o mesmo  $f_{cj}$  de 31,6 MPa.

**Tabela 3.2 - Dosagem do concreto.**

ARCO-G (%)	Nome	a/c	Consumo de agregado miúdo natural (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de agregado graúdo natural (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de ARCO-G (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
0	CCC 0	0,59	757,9	1057,2	0	342,5
30	CPC 30	0,60	738,6	732,1	310,2	349,9
100	CPC 100	0,65	731,4	0	1016,1	338,3

**Fonte: Autor (2021)**

**Tabela 3.3 – Caracterização dos agregados**

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

**Fonte: Autor (2021)**

É possível observar a diferença entre as densidades dos agregados graúdos, com um decréscimo na massa específica do agregado reciclado em comparação ao agregado natural. O agregado miúdo se enquadrou na zona ótima, pois seu módulo de finura ficou no intervalo de 2,20 a 2,90, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2019). Ainda segundo a norma, o agregado graúdo natural e o reciclado ficaram na zona granulométrica 9,5/25.

### 3.2.2 Concretagem e cura das lajes

A concretagem de cada espécime foi realizada durante 3 horas sendo utilizado vibrador de imersão para o correto adensamento do concreto. Cerca de 4 horas após o término da concretagem iniciou-se o processo de cura úmida das lajes e dos corpos de prova. O processo adotado tanto para as lajes como para os corpos de prova foi o mesmo e consistiu em colocar sacos de cimento umidificados sobre a superfície de concreto que estivesse exposta, sendo umidificados 2 vezes por dia durante 7 dias. Logo após a umidificação das lajes e dos corpos de prova, estes elementos eram cobertos por uma lona plástica, que tinha a função de auxiliar na retenção da umidade em torno das peças de concreto.

Para cada laje foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos com 100 mm de base por 200 mm altura, sendo utilizados para a caracterização da resistência à compressão e tração. Para determinação do módulo de elasticidade do concreto foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos de 150 mm de altura por 300 mm de

comprimento, 2 para cada laje, rompidos no dia do ensaio experimental da respectiva laje.

Os ensaios de compressão simples seguiram as recomendações da norma NBR 5739:2007, os ensaios de compressão diametral atenderam às exigências da NBR 7222:2011 e módulo de elasticidade a NBR 8522:2008.

### 3.2.3 Aço

Foram retirados 3 corpos de cada barra instrumentada, utilizados para a caracterização das propriedades mecânicas do aço. Estes foram submetidos a ensaios de tração axial realizados no laboratório de engenharia civil de Tucuruí – PA da Universidade Federal do Pará, de acordo com as recomendações da NBR 6892:2018. Foi utilizada a média dos resultados de 3 corpos de prova de cada diâmetro (e 50 cm de comprimento) para determinar suas propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas do aço**

Armadura	$\varnothing$ (mm)	$f_{ys}$ (MPa)	$\varepsilon_{ys}$ (‰)	$f_u$ (MPa)	$E_s$ (GPa)
Flexão	12,5	590,27	2,98	727,70	198,26
	25,0	527,41	2,74	790,00	192,41

**Fonte: Autor (2021)**

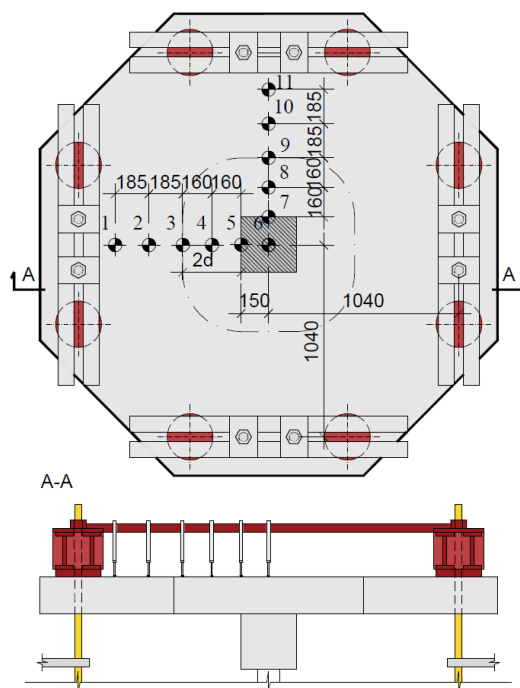
## 3.3 Instrumentação

### 3.3.1 Deslocamentos verticais

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

Os deslocamentos verticais foram medidos em 11 pontos por meio de deflectômetros do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), fabricados pelas empresas KYOWA, LVDT sensors e Gefran. Os pontos monitorados foram os

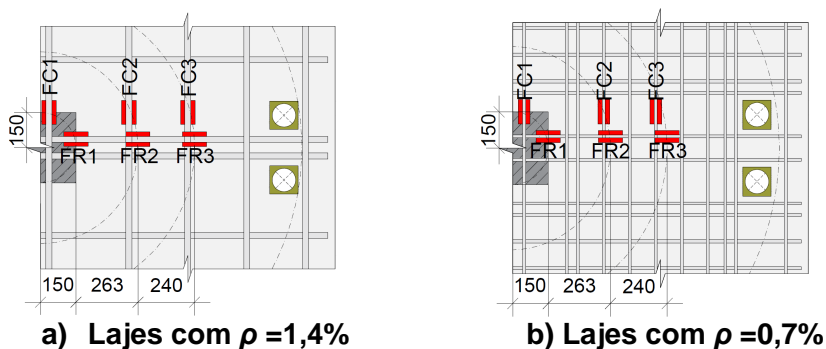
mesmos para todas as lajes, permitindo assim um nivelamento para efeito de comparação. O posicionamento dos LVDT's pode ser visto conforme a Figura 3.6.



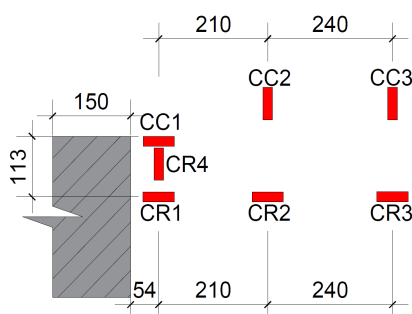
**Figura 3.6 – Posicionamento dos LVDTs.**  
Fonte: Autor (2021)

### 3.4.2 Deformações nas armaduras e no concreto

Para análise das deformações nas armaduras de flexão foram utilizados dois extensômetros elétricos em cada ponto, diametralmente opostos, buscando minimizar possíveis efeitos de flexão nas barras, de onde foram retiradas médias com intuito de acompanhar as deformações durante todas as etapas do carregamento. O posicionamento dos extensômetros pode ser visto nas Figuras 3.7 a) e b) e 3.8.



**Figura 3.7 – Posicionamento dos extensômetros de aço.**  
Fonte: Autor (2021)



**Figura 3.8 - Posicionamento dos extensômetros de concreto**

**Fonte: Autor (2021)**

Em virtude da simetria, a extensometria foi realizada somente em um quadrante. As barras de aço foram devidamente preparadas para receber a fixação dos extensômetros. As barras foram limadas e lixadas com o objetivo de eliminar as mossas na região de fixação, com o devido cuidado para não danificar a seção nominal.

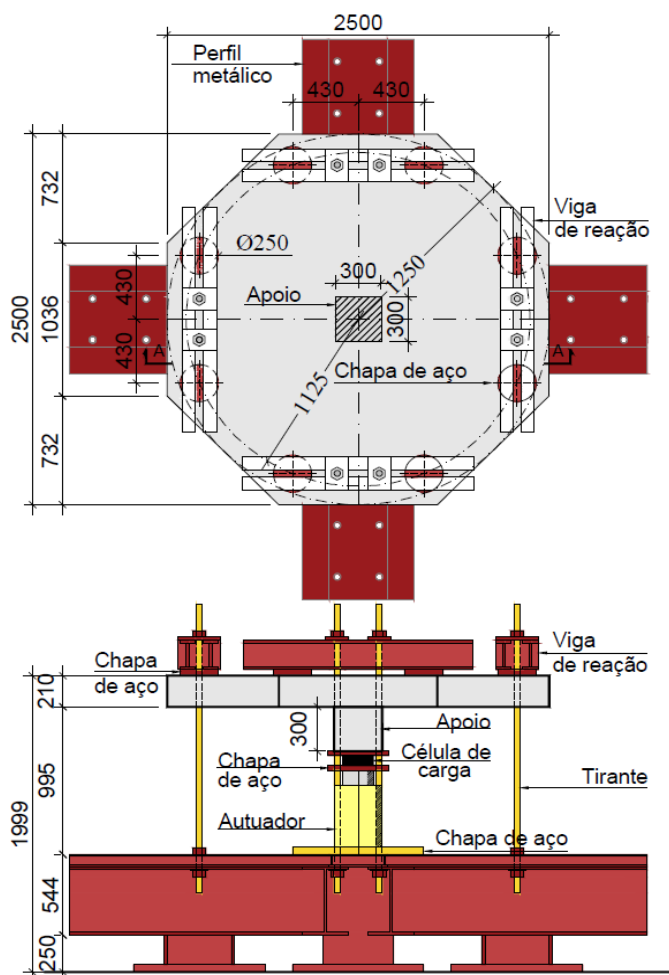
Com a superfície lisa, foi feita uma limpeza com álcool etílico objetivando retirar os resíduos presentes na superfície de instrumentação das barras. Posteriormente os extensômetros foram colados consecutivamente com adesivo instantâneo de ciano acrilato (cola SUPER BONDER).

Após a fixação dos extensômetros, cada terminal foi soldado à ponta de um cordão flexível paralelo, preso à barra por braçadeiras plásticas. Depois de soldados os terminais, a região da solda foi protegida contra possíveis atritos e choques mecânicos, por uma camada de resina epóxi, que funciona também como isolante elétrica. Por fim, uma camada de silicone e fita de auto fusão envolveu o conjunto para proporcionar maior proteção mecânica.

### 3.4 Sistema de ensaio

Os ensaios foram o marco inicial para estudos de lajes lisas no Laboratório de Estruturas do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico (NDAE) da UFPA. O sistema foi projetado e construído para funcionar como pórtico fechado, permitindo o ensaio de diversos tipos de espécimes, incluindo lajes de diferentes proporções. O carregamento foi aplicado de baixo para cima, no centro do pilar, por meio de um cilindro hidráulico, fazendo com que o elemento fosse levantando reagindo em 4 vigas de reação simetricamente posicionadas, niveladas e ligadas à mesa de reação

por meio de 8 tirantes de aço e oito chapas de aço distribuídas simetricamente em relação ao centro da laje, servindo de ponto de aplicação de carga, proporcionando um raio de carga de 1125 mm. O sistema de ensaio em planta pode ser visto conforme as Figura 3.9 e Anexo A.



**Figura 3.9 - Sistema de ensaio**  
**Fonte: Autor (2021)**

A montagem dos ensaios se deu com a utilização de um caminhão munck, o qual posicionava a laje sobre tubos metálicos dispostos junto a face da mesa de reação, fazendo com que o centro do pilar ficasse alinhado com o centro de aplicação da carga.

Os equipamentos utilizados para a aplicação e medição dos carregamentos foram considerados satisfatórios, a carga última foi monitorada por meio de uma célula de carga e confirmada por meio da pressão exercida no cilindro. Para verificar a simetria de distribuição de carregamento adotou-se o critério de monitoramento dos deslocamentos nos 4 pontos de reação da laje.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Materiais

Foi verificada a trabalhabilidade do material realizando ensaio de abatimento de tronco de cone, em acordo com a NBR 16889 (2020). Em virtude de a concretagem ter sido realizada no local, com auxílio de betoneira de 400 litros, as lajes precisaram de 7 a 9 betonadas para serem finalizadas e todos os traços foram avaliados quanto à trabalhabilidade. A Tabela 4.1 apresenta o resultado das médias dos ensaios de corpos de prova de resistência à compressão ( $f_c$ ), resistência à tração ( $f_{ct}$ ) e abatimento de tronco de cone.

**Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do concreto**

Laje	$f_c$ MPa	$f_{ct}$ MPa	a/c	Abatimento (cm)
S-0,7-0	20,73	2,57	0,59	13,1
S-0,7-30	21,92	2,38	0,57	12,4
S-0,7-100	23,05	2,41	0,62	12,4
S-1,4-0	22,78	3,48	0,59	12,5
S-1,4-30	21,52	2,95	0,59	12,7
S-1,4-100	21,44	2,48	0,65	11,9

**Fonte: Autor (2021)**

Os resultados de resistência à compressão, tração, módulo e abatimento foram semelhantes independente da taxa de substituição (0%, 30% e 100%), cumprindo com o propósito produzir um concreto com mesmas propriedades, em virtude da variação no traço. Estes resultados podem ser vistos conforme as Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

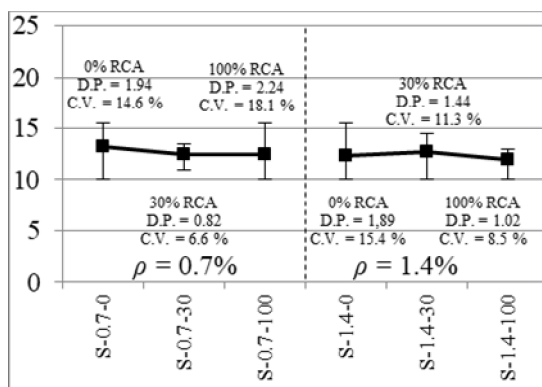


Figura 4.1 - Abatimento

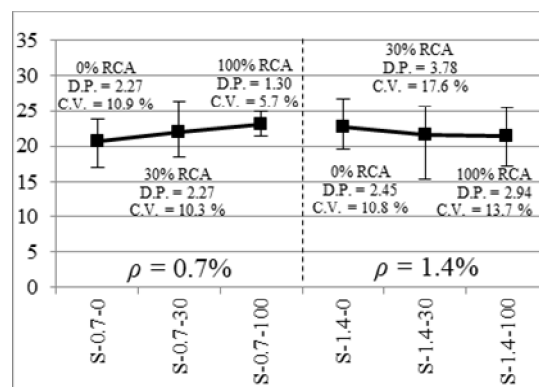


Figura 4.2 - Resistência à compressão

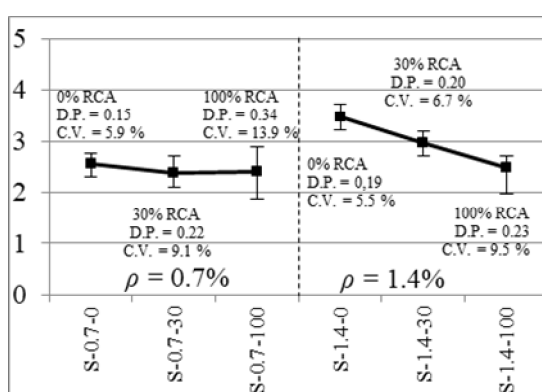


Figura 4.3 - Resistência à tração

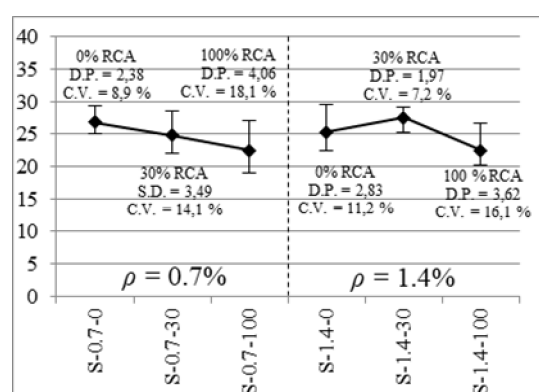
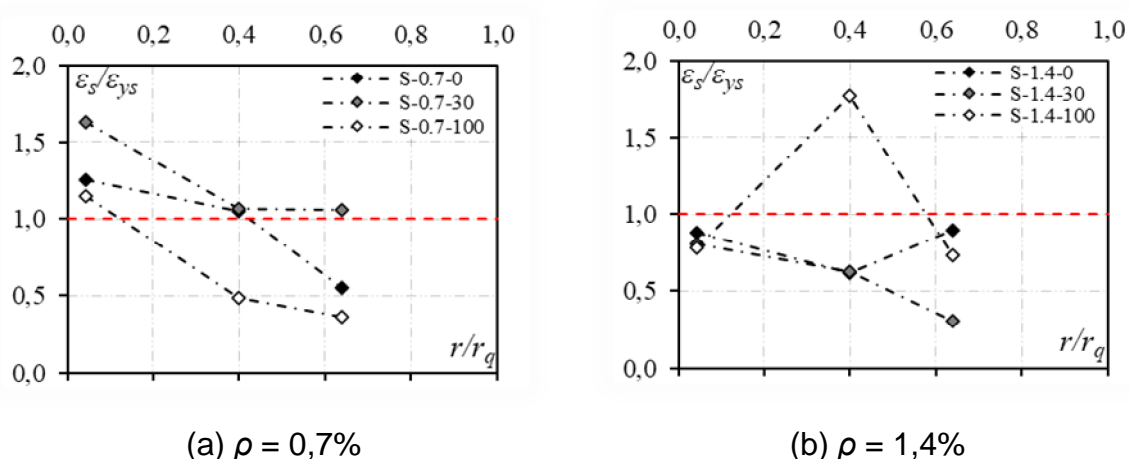


Figura 4.4 - Módulo de elasticidade

Fonte: Autor (2021)

## 4.2 Deformações nas armaduras de flexão

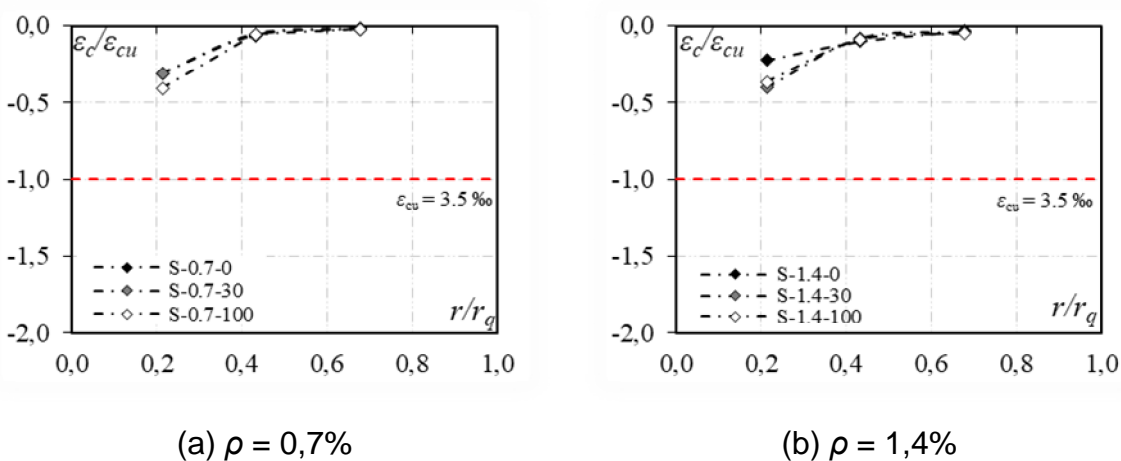
As Figuras 4.5 a) e b) mostram o perfil de deformação na armadura de flexão e na superfície do concreto para o carregamento máximo realizado nos ensaios. É possível observar que as armaduras de flexão foram pouco solicitadas de modo que é possível afirmar que as lajes não sofreram ruína por flexão em função do esgotamento da capacidade resistente da armadura.



**Fig. 4.5 – Deformações nas armaduras de flexão**  
**Fonte: Autor (2021)**

### 4.3 Superfície do concreto

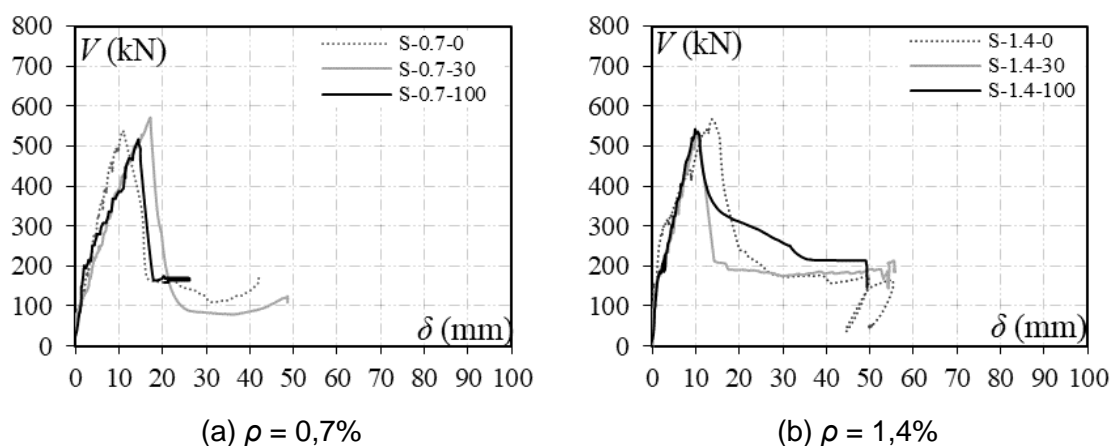
As deformações na superfície do concreto, vide Figuras 4.6 a) e b), também apresentaram valores baixos com as deformações mais evidentes próximas aos pilares, ainda assim valores que afastam a possibilidade de esmagamento do concreto em peças submetidas à flexão.



**Fig. 4.6 – Deformações na superfície do concreto**  
**Fonte: Autor (2021)**

## 4.4 Deslocamentos verticais

As Figura 4.7 a) e b) apresentam o comportamento carga-deslocamento das lajes testadas, servindo como referência para avaliar a rigidez das lajes e a influência do ARCO-G no comportamento delas.



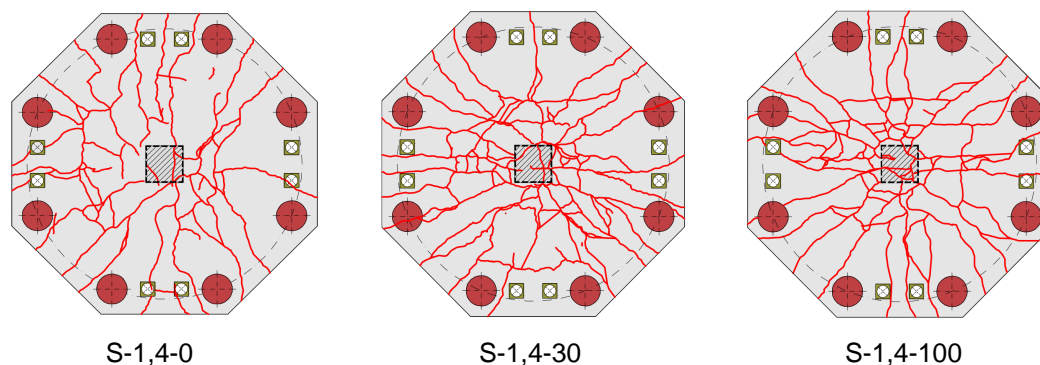
**Fig. 4.7 – Resposta carga-deslocamento**  
Fonte: Autor (2021)

A laje S-1,4-0 manteve a rigidez inicial até um carregamento mais elevado em função de ter maior resistência à tração, resultando em fissuração tardia. Na etapa pós-fissuração, de modo geral, a incorporação do ARCO-G não interferiu no comportamento à flexão das lajes. No entanto, a laje S-0,7-0 apresentou comportamento mais rígido que as demais em pós-pico em função do módulo de elasticidade mais elevado. O comportamento pós-pico se manteve frágil para todas as lajes, independente da taxa de substituição de agregado natural por ARCO-G.

## 4.5 Mapa de fissuração

As Figuras 4.8 a) e b) apresentam o comportamento quanto a fissuração das lajes ensaiadas, gráfico carga *versus* abertura de fissuras e o mapa de fissuração das lajes ensaiadas. As primeiras fissuras visíveis foram radiais, referentes à flexão próximas aos pilares, causadas por tensões tangenciais. E conforme o aumento de carga, surgiram as fissuras tangenciais, causadas por tensões radiais.





**(b) Mapa de fissuração das lajes com  $\rho = 1.4\%$**

**Fig. 4.9 – Mapa de fissuração**  
**Fonte: Autor (2021)**

Foi possível observar que nas lajes S-0,7-0, 30 e 100, as fissuras surgiram primeiro e o concreto teve maior relevância no controle da abertura das fissuras do que nas S-1,4-0, 30 e 100. Esse fato é explicado devido às últimas lajes possuírem o dobro da taxa de armadura de combate à flexão, que pode contribuir na redução das fissurações. Uma vez que as armaduras de flexão fazem com que surjam menos fissuras quando aplicada uma mesma carga, então as superfícies ficam mais próximas e mantém o engrenamento dos agregados por mais tempo.

A laje S-0,7-100 foi a última a ser ensaiada e pode-se observar que houve menor fissuração quando comparada às S-0,7-0 e S-0,7-30, o que não deveria ocorrer. O fato é justificado por uma falha no motor hidráulico, que cessou o funcionamento imediatamente à ruptura da laje. Não foi possível realizar o corte das lajes por limitações técnicas na região onde foram realizados os ensaios, porém utilizou-se das análises dos resultados experimentais e do cálculo teórico da resistência à flexão para classificar os modos de ruptura, indicando que todas as lajes romperam por punção.

## 4.5 Classificação dos modos de ruptura das lajes

Usualmente utiliza-se o comportamento de carga por deslocamento para diferenciar rupturas por flexão das de cisalhamento, pois em lajes lisas sem armadura de cisalhamento, por ter menor ductilidade, a ruptura por punção ocorre de maneira brusca. Portanto, o critério adotado para determinar o modo de ruptura

das lajes deste trabalho baseia-se nas observações experimentais dos materiais isoladamente e em conjunto. Os meios experimentais adotados para essa classificação são: análises das deformações nas armaduras de flexão, deformações na superfície do concreto e o comportamento das fissuras.

Além de evidências experimentais a razão entre a carga de ruptura dos elementos e a resistência teórica à flexão ( $V_u/V_{flex}$ ) também é levada em consideração. Para relações maiores que 1, o modo de ruptura seria classificado como flexão; para relações próximas de 1 a ruptura ocorreria por flexão e punção simultaneamente; e para menores que 1, ocorreria por punção. As lajes de S-0,7-0, S-0,7-30 e S-0,7-100 tiveram seu modo de ruptura classificado como punção, pois é nítido, no mapa de fissuração, a formação do cone de punção, apresentando um comportamento frágil no gráfico carga – deslocamento, nenhuma armadura de flexão chegando ao patamar de escoamento e os extensômetros superficiais do concreto longe de uma ruptura por esmagamento, além da relação  $V_u/V_{flex}$  ficar a uma média de 0,74. O mesmo ocorreu com as lajes S-1,4-0, S-1,4-30 e S-1,4-100, que ficaram mais distantes ainda de romperem por flexão, devido possuírem o dobro de taxa de armadura de combate à flexão, seus valores  $V_u/V_{flex}$  ficaram próximos a 0,4.

A Tabela 4.2 apresenta a carga de ruptura das lajes ensaiadas nesse trabalho, as suas estimativas de resistência a flexão, o resumo da classificação dos modos de ruptura das lajes de acordo com a metodologia citada, e uma possível superfície de ruptura baseada nos resultados obtidos nesse trabalho, uma vez que não foram obtidos sinais de esmagamento do concreto na região do pilar descartando a possibilidade de esmagamento da biela comprimida. As estimativas teóricas de  $V_{flex}$  são superiores as cargas de ruptura dos elementos, reforçando que sua ruptura não ocorreu por flexão.

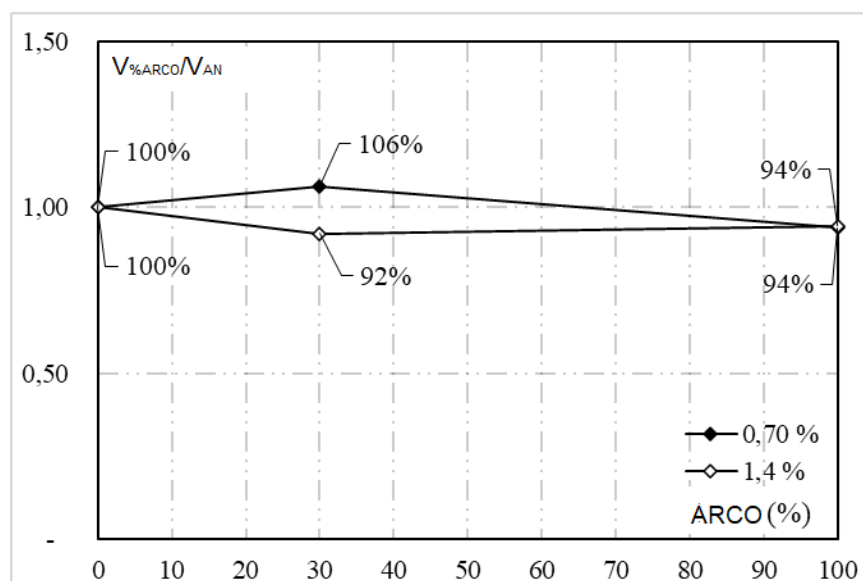
**Tabela 4.2 – Tabela de classificação dos modos de ruptura.**

Laje	$V_u$ (kN)	$V_{flex}$ (kN)	$V_u/V_{flex}$	Modo de ruptura
S-0,7%-0	526,75	696,23	0,76	Punção
S-0,7%-30	560,07	720,76	0,78	Punção
S-0,7%-100	493,92	723,26	0,68	Punção
S-1,4%-0	562,52	1346,42	0,42	Punção
S-1,4%-30	518,42	1331,37	0,39	Punção
S-1,4%-100	531,16	1363,09	0,39	Punção

**Fonte: Autor (2021)**

## 4.6 Estimativas normativas

A Figura 4.10 apresenta a capacidade resistente das lajes com ARCO comparadas as lajes de referência com agregados graúdos convencionais. Foi possível observar uma perda na capacidade resistente de 6% para lajes com 100 % de ARCO-G. No entanto para as lajes com 30% de ARCO-G esse comportamento não foi observado. A Tabela 4.3 apresenta os resultados experimentais.



**Fig. 4.10 – Comparativo de resistencia entre lajes de referencia e com ARCO-G**  
Fonte: Autor (2021)

**Tabela 4.3 – Resultados experimentais**

Laje	ARCO-G (%)	$d$ (mm)	$\rho$ (%)	$f_c$ (MPa)	$d_g$ (mm)	$f_{ys}$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$V_u$ (kN)	$V_u/NBR 6118$	$V_u/V_{ACI 318}$	$V_u/V_{EC 2}$
S-0,7-0	0	162,5		20,73				526,75	0,98	1,17	1,13
S-0,7-30	30	165	0,7	21,92		590,27	198,26	560,07	1,04	1,18	1,15
S-0,7-100	100	165		23,05	19			493,92	0,92	1,02	1,00
S-1,4-0	0	165		22,78				562,52	0,83	1,16	0,96
S-1,4-30	30	164,5	1,4	21,52		527,41	192,41	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: Autor (2021)

#### 4.6.1 Desempenho das normas para lajes sem armadura de cisalhamento

Para o estudo do desempenho e comparação entre equações normativas de dimensionamento à punção em lajes lisas de concreto armado, foi utilizado um estudo realizado por Collins (2001).

Esta metodologia classifica diferentes critérios normativos, considerando a segurança, precisão e economia dos resultados. O autor classifica os diferentes procedimentos de dimensionamento em termos de uma escala de demérito, atribuindo faixas de penalidade para cada relação  $V_{R.exp}/V_{R.teo}$ .

Essa penalidade tem como base a ideia de que uma relação  $V_{R.exp}/V_{R.teo}$  menor que 0,5 é bem pior em termos de segurança quando comparado a uma acima de 2,0. Contudo, valores extremamente conservadores são penalizados com 2,0 assim como a classificação de baixa segurança, por serem antieconômicos.

O valor de demérito de cada procedimento é calculado por meio da soma do  $V_{R.exp}/V_{R.teo}$ , existentes em cada intervalo, por sua penalidade correspondente. Quanto maior o valor da soma total, pior é considerado o processo normativo. A Tabela 4.4 demonstra a escala de penalidade segundo Collins (2001).

**Tabela 4.4 – Escala de penalidade segundo 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

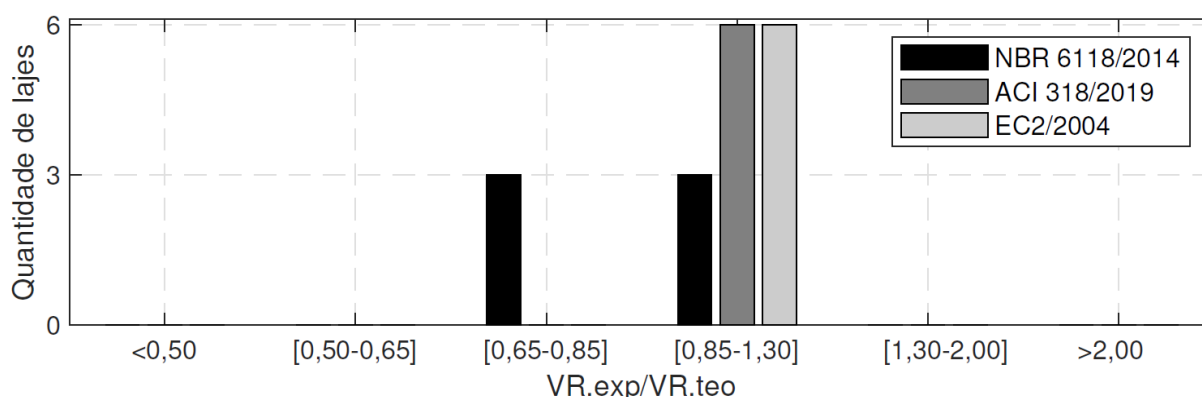
**Fonte: Autor (2021)**

A avaliação do desempenho dos métodos teóricos, ponderados segundo o critério de Collins (2001), chamado de *Demerit Points Classification* (DPC), é apresentado na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 – Classificação segundo o critério de Collins (2001)**

Vr.exp/Vr.teo		<0,5	[0,50-0,65]	[0,65-0,85]	[0,85-1,30]	[1,30-2,00]	>2,00	Total
NBR 6118/2014	Nº de Lajes	0	0	3	3	0	0	6
	Penalidade total	0	0	6	0	0	0	6
ACI 318/2019	Nº de Lajes	0	0	0	6	0	0	6
	Penalidade total	0	0	0	0	0	0	0
EC2/2004	Nº de Lajes	0	0	0	6	0	0	6
	Penalidade total	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autor (2021)

**Fig. 4.11 – Histograma conforme o critério de COLLINS (2001)**

Fonte: Autor (2021)

De acordo com a escala de demérito, as normas ACI 318 (2019) e Eurocode 2 (2004) se comportaram de forma similar, com todas as lajes enquadradas na faixa de segurança apropriada. Enquanto a NBR 6118 (2014) apresenta os piores resultados, onde 50% das lajes ficaram classificadas como baixa segurança e 50% com segurança apropriada.

## 5. CONCLUSÕES

Os ensaios de caracterização das propriedades no estado fresco e endurecido do concreto demonstram a viabilidade da utilização de ARCO-G em estruturas de concreto armado. Com o ajuste da relação a/c foi observado uma melhora na trabalhabilidade do concreto para as lajes com agregado reciclado, no

entanto, não foi observado aumento na resistência à compressão com a redução da relação a/c.

A resistência à tração sofreu uma ligeira redução com a incorporação do ARCO-G. O módulo de elasticidade das lajes com ARCO-G sofreu redução quanto comparadas as lajes com agregado convencional. Contudo esse comportamento já era esperado, uma vez que a porosidade elevada da pasta friável aderida ao ARCO-G aumenta a deformabilidade, diminuindo a rigidez.

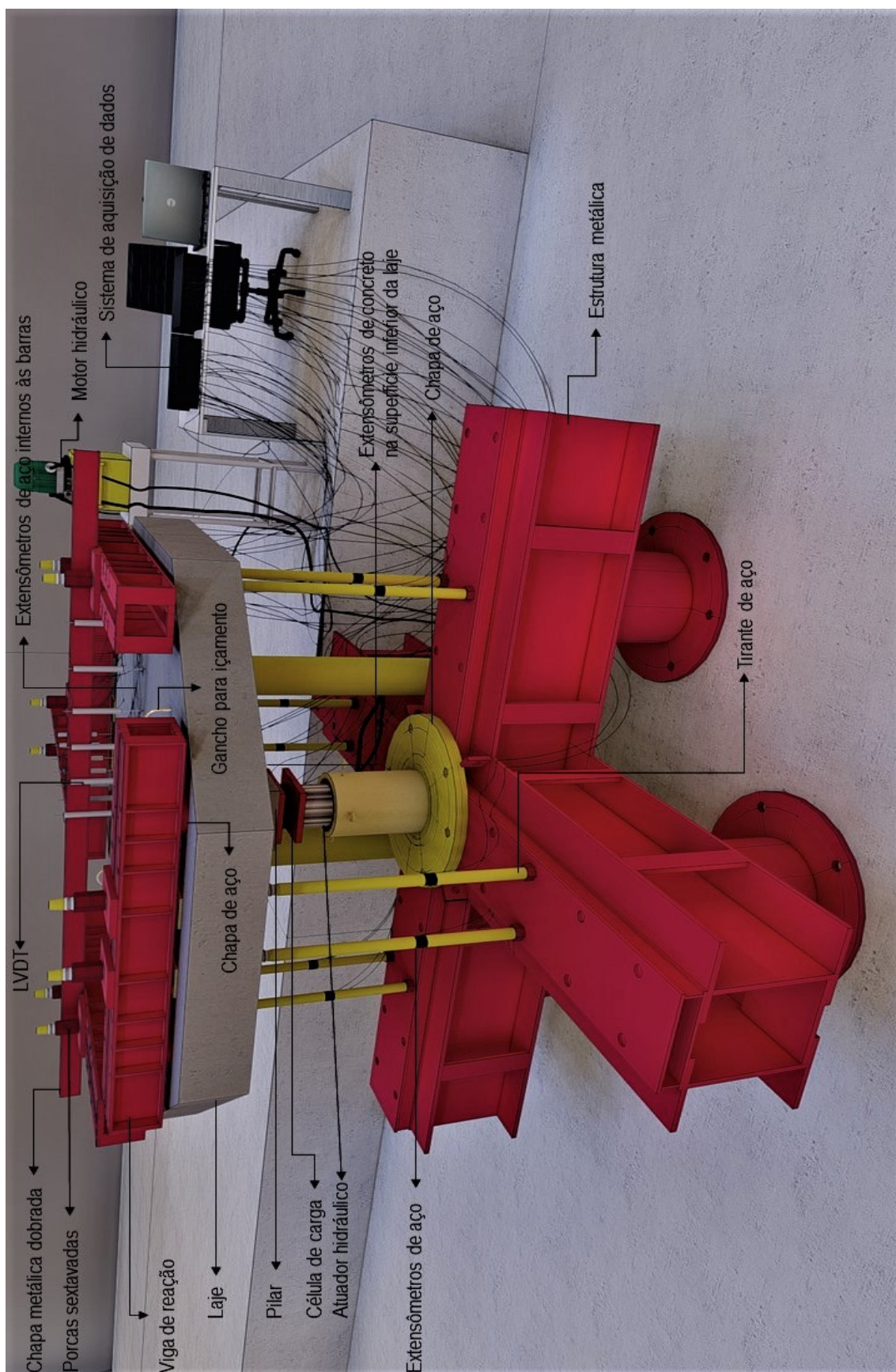
A incorporação de ARCO-G não interferiu significativamente na rigidez na fase pré-fissuração, nem no padrão de fissuração ou carregamento em que a laje ultrapassou o estado limite de serviço de abertura de fissuras para as duas taxas de armadura de flexão ensaiadas (0,7% e 1,4%). A abertura de fissuras se diferenciou próximo ao estado limite último para as lajes com taxa de armadura de flexão de 0,7%, o que não foi observado nas lajes com 1,4%.

As lajes com ARCO-G apresentaram redução máxima de 6 % na capacidade resistente a punção quando comparadas as lajes com agregados graúdos convencionais. A taxa de armadura foi capaz de aumentar a carga de fissuração no estado limite de serviço (ELS). O ARCO-G pouco influenciou na abertura de fissuras nas lajes com maior taxa de armadura de combate à flexão.

A comparação entre as normas deixa evidente que os critérios normativos 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  $V_u / V_{teórico}$  ficaram próximas de 1.

A pequena redução na resistência à punção e a segurança das previsões normativas indicam a viabilidade do uso de ARCO-G em ligações laje-pilar e as interferências negativas não foram significantes no comportamento à flexão e resistência à punção. No entanto, pesquisas experimentais mais extensivas são necessárias para avaliar a segurança da utilização.

## ANEXO A – Sistema de ensaio



## REFERÊNCIAS

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

ARAÚJO, Daniel Lima *et al.* Influência de agregados reciclados de resíduos de construção em propriedades mecânicas do concreto. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 16-34, 8 fev. 2016. Universidade Federal de Goiás. <http://dx.doi.org/10.5216/reec.v11i1.35467>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45** – Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52** – Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53** – Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739:2007**. Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6892:2013**. Materiais metálicos – ensaio de tração parte 1: método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211:2019** – Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222:2011**. Concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953:2015**. Concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522:2008**. Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116:2021**. Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021. 16 p.

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

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.

BARRA, M. **Estúdio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado em su aplicación como hormigón armado**. Tese de doutorado, Universidade Politécnica de Catalunya, Barcelona, 1996.

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

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.

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

BRITISH STANDARDS INSTITUTION [BSI]. **BS EN 12620:2013**: Aggregates For Concrete (British Standard). 2013. Disponível em: <https://webstore.ansi.org/standards/bsi/bsen126202013>. Acesso em: 20 abr. 2021.

BUCK, A. D. Recycled concrete as a source of aggregate. **ACI Journal**, 74, 212–219. Disponível em: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=11004>. Acesso em: 04 mar. 2020, 1977.

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.

BUTLER L, WEST JS, TIGHE SL. Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength. **Construction and Building Materials**, 47:1292–301, 2013.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 254 f. Tese (Doutorado em Ciências

da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

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.

COLLINS, M.P. (2001). **Evaluation of shear design procedures for concrete structures**. A Report prepared for the CSA technical committee on reinforced concrete design.

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

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 348 de 16 de agosto de 2004**. Brasília, 2004.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 431 de 24 de maio de 2011**. Brasília, 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 448 de 18 de janeiro de 2012**. Brasília, 2012.

CONSTRUCTION STANDARD. **CS-3:2013**: Aggregates for concrete. Hong Kong: The Government Of The Hong Kong Special Administrative Region, 2013. 141 p. Disponível em: [https://www.cedd.gov.hk/filemanager/eng/content\\_78/cs3\\_2013\\_original.pdf](https://www.cedd.gov.hk/filemanager/eng/content_78/cs3_2013_original.pdf). Acesso em: 24 abr. 2021.

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. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/96512/000915919.pdf;jsessionid=ED95282D2C44669A66284A05AE86C501?sequence=1>. Acesso em: 04 mar. 2020.

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 Building Materials**, 24:1616–20, 2010.

CREA - PI. **Relatório técnico sobre o desabamento da obra do Shopping Rio Poty**. Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Piauí. Teresina, Piauí. 2013.

DAMASCENO, Iana Ingrid Rocha. **Análise experimental da resistência à punção de lajes lisas de concreto armado com agregados graúdos reciclados de concreto**. 2022. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON. **DAFSTB 2010-4**: DAfStb Massige Bauteile aus Beton:2010-04. Alemanha, 2010. 24 p. Disponível em: <https://www.beuth.de/de/technische-regel/dafstb-massige-bauteile-aus-beton/129196577>. Acesso em: 18 abr. 2021.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG.. **DIN EN 12620**: European Standard EN 12620 : 2002 has the status of a DIN Standard.. Alemanha, 2017. 47 p. Disponível em: [https://kupdf.net/download/din-en-12620-pdf\\_59f2ddd8e2b6f51027d617e4\\_pdf](https://kupdf.net/download/din-en-12620-pdf_59f2ddd8e2b6f51027d617e4_pdf). Acesso em: 18 abr. 2021.

DUALIBE, G. J. **Avaliação de propriedades hidrodinâmicas em materiais granulares e argamassas com cinza pesada e agregado reciclado**. 2008. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

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

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

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

FERREIRA, L. M. M. **Betões estruturais com incorporação de agregados grossos reciclados de betão, influência pré-saturação**. Dissertação de mestrado em engenharia civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 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, Maurício P. *et al.* Experimental resistance of slab-column connections with prefabricated truss bars as punching shear reinforcement. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 233, p. 111903, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111903>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029621000535?via%3Di> hub. Acesso em: 18 abr. 2021.

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

FREITAS, Marcus Vinícius Pereira de. **Análise Experimental dos Limites Superiores de Resistência à Punção de Lajes Lisas de Concreto Armado com Armaduras de Cisalhamento**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará. Tucuruí, 2018. 120 p.

GERMAN INSTITUTE FOR STANDARDISATION (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG). **DIN 4226-100:2002-02: AGGREGATES FOR CONCRETE AND MORTAR - PART 100: RECYCLED AGGREGATES**. Alemanha, 2002. Disponível em: [https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/DIN-4226-100-2002-389829\\_SAIG\\_DIN\\_DIN\\_885154/](https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/DIN-4226-100-2002-389829_SAIG_DIN_DIN_885154/). Acesso em: 20 abr. 2021.

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

HKBD, 2004, Code of practice for demolition of buildings. Hong Kong Buildings Department, China.

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](https://www.techstreet.com/standards/jis-a-5021-2018?product_id=2035817#jumps). Acesso em: 23 abr. 2021.

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: 23 abr. 2021.

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: 22 abr. 2021.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Influence of recycled aggregate quality on concrete properties. Use of Recycled Materials in Buildings and Structures. **RILEM Publications**, RILEM, Barcelona, pp. 545-553, 2004.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, 23, 2009.

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

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

Kisku N.; Joshi, H.; Ansari, M. ; Panda, S.K.; Nayak S. e Dutta, S. C.. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. **Construction and Building Materials** 131 (2017) 721–740.

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.

LIMA, A. W. **Estudo experimental e analítico de punção em lajes lisas de concreto armado utilizando polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) como armadura de cisalhamento**. 2012. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2012.

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=S1983-41952012000200004&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952012000200004&lng=en&nrm=iso)>. acesso em: 25 Ago.2021. p. 166-181.

LÓPEZ-GAYARRE, F.; SERNA, P.; DOMINGO-CABO, A.; SERRANO-LÓPEZ, M. A.; LÓPEZ-COLINA, C. **Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties**. Waste Management, v. 29, p. 3022-3028, 2009.

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: 04 abr. 2020.

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.

MARTÍN-MORALES, M.; ZAMORANO, M.; RUIZ-MOYANO, A.; VALVERDE ESPINOSA, I. **Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08**. Construction and Building Materials, v. 25, n.2, p. 742-748, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181000379X>>. Acesso em: Jun. 2020.

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

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.

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

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

MOREIRA, L. H. H. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

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

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

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

MUTTONI, A. Punching shear Shear Strength of Reinforced Concrete Flat Slabs Without Transverse Reinforcement. **ACI Structural Journal**, Vol. 105, Nº 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. (2013). **Punção em Lajes Lisas com Armaduras de Cisalhamento Submetidas a Carregamento Excêntrico e Apoiadas sobre Pilares Retangulares**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília.

ORGANISME IMPARTIAL DE CONTRÔLE DE PRODUITS POUR LA CONSTRUCTION. **PTV 406 9.0/2020: GRANULATS DE DEBRIS DE DEMOLITION ET DE CONSTRUCTION RECYCLES**. Bélgica: Organisme Impartial de Contrôle de Produits Pour La Construction, 2020. Disponível em: <https://www.copro.eu/en/document/ptv-406-90-prescriptions-techniques-pour-granulats-recycles>. Acesso em: 21 abr. 2021.

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.

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. Disponível em: [http://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/11139/1/Dissertacao\\_Avaliacaometodo\\_snormativos.pdf](http://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/11139/1/Dissertacao_Avaliacaometodo_snormativos.pdf). Acesso em: 04 mar. 2020.

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

PINTO, V. C. **Punção em Lajes Lisas Bidirecionais de Concreto Armado com Furos e Pilares com Secção Transversal em “L”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2015.

POON, C.S; SHUI, Z.H.; LAM, L. H. FOK; KOU, S.C. **Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete**. Cement and Concrete Research, v. 34, p. 31-36, 2004.

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

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

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 shear behaviour of recycled coarse aggregate concrete slabs**. Int J Mod Eng Res; 2(4):2815–20. 2012.

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

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

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

REGAN, P. E. **Comments on Tucuruí Research**. Correspondência com o autor Pereira Filho (2021). 2015.

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.

SAHOO, Saumyaranjan; SINGH, Bhupinder. Recycled aggregate concrete slab punching shear capacity. **Structures**, [S.L.], v. 24, p. 426-443, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2019.11.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012419302073?via%3Di> hub. Acesso em: 16 mar. 2021.

SANCHEZ, M. **Estudio de la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural**. Tese de doutorado em Construção, Universidade Politécnica de Madrid, Madrid, 2004.

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

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

SANTOS, A. A. M. **Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto: dosagem e produção**. 2016. 135 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Feira de Santana, BA. 2016.

SHEHATA. Simplified Model for Estimate the Punching shear Resistance of Concrete Slabs. **Materials and Structures**. França. Vol. 33. Pp. 364-371. 1990.

SESSA, Thiago da Cruz. **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.

SPANISH STRUCTURAL CONCRETE. **EHE 08**: Code on Structural Concrete: Articles and Annexes. Espanha: Editorial Bellisco, 2008. 500 p. Disponível em: <http://asidac.es/asidac-en/wp-content/uploads/2016/07/EHE-ENG.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

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

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

TECHSTREET. **AS 1141.6.2-1996 (R2016)**: Methods for sampling and testing of aggregates - Particle density and water absorption of coarse aggregate - Pycnometer method. Austrália, 2016. Disponível em: <https://www.standard.no/nettbutikk/produktkatalogen/produktpresentasjon/?ProductID=828915>. Acesso em: 25 abr. 2021.

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

VALENÇA, M. Z.; MELO, I. V.; WANDERLEY, L. O. A degradação de corpos d'água e a deposição irregular de resíduos da construção civil na cidade do Recife, pernambuco, brasil. **Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade**. 1(1): 45-58. 2008.

WERLE, A. P. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação**. 2010. 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

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.

XIAO, Jianzhuang; WANG, Wan; ZHOU, Zhengjiu; TAWANA, Mathews 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. <http://dx.doi.org/10.1007/s11709-018-0510-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11709-018-0510-6>. Acesso em: 15 mar. 2021.