



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE LAJES NERVURADAS DE
CONCRETO ARMADO COM VIGA FAIXA DE ALTURA
VARIÁVEL**

ENGº CIVIL PAULO VICTOR PRAZERES SACRAMENTO

2014



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE LAJES NERVURADAS DE
CONCRETO ARMADO COM VIGA FAIXA DE ALTURA
VARIÁVEL**

ENGº CIVIL PAULO VICTOR PRAZERES SACRAMENTO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Dênio Ramam Carvalho de Oliveira

**Belém /PA
24 de novembro de 2014**

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO COM VIGA FAIXA DE ALTURA VARIÁVEL

ENG° CIVIL PAULO VICTOR PRAZERES SACRAMENTO

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, área de concentração Estruturas e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

Belém (PA), 24 de novembro de 2014

Prof. José Cláudio Cavalcante Blanco, Dr.
COORDENADOR PPGEC, FEC/ITEC/UFPA

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira, Dr.
ORIENTADOR, FEC/ITEC/UFPA

Prof. Bernardo Nunes de Moraes Neto, Dr.
EXAMINADOR INTERNO, FEC/ITEC/UFPA

Prof. José Neres da Silva Filho, Dr.
EXAMINADOR EXTERNO, ENC/UFRN

**“Porque foi do agrado de Deus que nEle (Cristo)
habitasse toda a plenitude”.**

(Cl 1.19)

Ao Senhor, meu Deus, que me salvou, através de Cristo, pela sua graça, mesmo não havendo nenhum mérito em mim! Louvado seja o nome do Senhor!

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de agradecer aos meus pais João Walter e Waldirene. A minha eterna gratidão pelo amor, carinho e incansável luta em proporcionar aos seus filhos uma condição melhor. No fim das contas, somos produto da influência de pessoas das quais convivemos. Desta forma, sinto-me honrado pelos pais que me influenciaram a trilhar por um caminho de vida honesto, sem a necessidade de transpor a barreira da integridade para obter qualquer mérito. Agradeço também às minhas irmãs Raquel Camile e Carla Letícia (Lia) pelo companheirismo e afetividade. “Um abraço entre irmãos despedaça os portais do inferno”.

Agradeço à minha mãe (vó) Maria Joana, pelo seu cuidado e amor demonstrado todos os anos da minha vida. À minha família em geral sempre muito presente em minha história. Agradeço à minha noiva e grande amiga, Lara, que tem sido fiel companheira em todos os momentos. Paciência e compreensão são marcas inquestionáveis do seu caráter. Deveras tenho aprendido muito com sua companhia. À sua família que com carinho e respeito me recebeu, devo meus agradecimentos.

Ao professor Dênio Ramam, agradeço pela oportunidade proporcionada em ingressar no grupo de pesquisa sob sua liderança. Por depositar votos de confiança em mim, mesmo com a perspicácia de enxergar as minhas dificuldades e saber, de forma sábia, conduzir os trabalhos desenvolvidos. Muito obrigado, professor.

Aos companheiros de grupo de pesquisa que fizeram parte desta caminhada. Aarão Ferreira, Iana Damasceno, Renan Ribeiro, Orivaldo Junior, Helder Rodrigues, Manoel Mangabeira, Rafael Magalhães, Hamilton Costa, Luamim Tapajós, Maurílio Pimentel, Paulo Sérgio Mota, André Gonçalves, Antônio Carlos e, em especial, ao Fernando Victor e Valdemir Colares, parceiros que me ajudaram em um dos momentos mais difíceis durante os ensaios, os quais se tornariam praticamente impossíveis de realizar sem que tivessem me ajudado. Aos técnicos Emanuel Garcez e Arnaldo pelo apoio. Um agradecimento especial ao professor Maurício Pina, que me auxiliou com seus sábios conselhos e preciosas contribuições profissionais tanto no período da graduação como no mestrado.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPA (PPGEC). À CAPES, pelo auxílio financeiro, através da bolsa de mestrado.

Em último, e não por isso menos importante, na verdade o agradecimento mais importante, agradeço de coração estilhado ao meu Deus, o grande mentor e arquiteto de toda essa história. Sem Ele nada valeria a pena. Ele é minha maior motivação, minha inspiração, meu fôlego, minha vida. “Hoje eu sei que estavas ali. Eu vivi entre as fortes muralhas, que Tua graça ergueu sobre mim antes mesmo do tempo existir.”

SUMÁRIO

RESUMO	2
ABSTRACT	3
1. INTRODUÇÃO	4
1.1. Considerações Iniciais	4
1.2. Justificativa	8
1.3. Objetivos	9
1.3.1. Objetivo Geral	9
1.3.2. Objetivos Específicos	10
1.4. Apresentação do Trabalho	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. Trabalhos Realizados	12
2.1.1. Soares (2004)	12
2.1.2. Lau e Clark (2007)	14
2.1.3. Souza (2007)	17
2.1.4. Albuquerque (2009)	20
2.2. Recomendações Normativas	23
2.2.1. ACI 318 (2008)	24
2.2.1.1. Recomendações sobre Lajes Nervuradas	24
2.2.1.2. Resistência ao Cisalhamento	24
2.2.1.3. Resistência à Punção	25
2.2.2. EUROCODE 2 (2004)	27
2.2.2.1. Recomendações sobre Lajes Nervuradas	27
2.2.2.2. Resistência ao Cisalhamento	27
2.2.2.3. Resistência à Punção	29
2.2.3. NBR 6118 (ABNT, 2014)	30
2.2.3.1. Recomendações sobre Lajes Nervuradas	30
2.2.3.2. Resistência ao Cisalhamento	31
2.2.3.3. Resistência à Punção	32

2.3. Resistência à Flexão	33
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	37
3.1. Considerações Iniciais	37
3.2. Características das Lajes	38
3.3. Fôrmas	40
3.4. Armadura de Flexão	41
3.5. Armadura de Cisalhamento	43
3.6. Instrumentação	44
3.7. Sistema de Ensaio	48
3.8. Materiais	51
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	55
4.1. Deslocamentos Verticais	55
4.2. Deformações no Concreto	61
4.3. Deformações nas Armaduras de Flexão	64
4.4. Deformações nas Armaduras de Cisalhamento	67
4.5. Mapa de Fissuração	70
4.6. Modo de Ruptura das Lajes	76
5. ANÁLISE COMPUTACIONAL	81
5.1. Descrição dos Modelos	81
5.2. Resultados da Análise	84
5.3. Considerações da Análise	90
6. ANÁLISES DAS ESTIMATIVAS	91
6.1. Resistência ao Cisalhamento	91
6.2. Resistência à Punção	93
6.3. Resistência à Flexão	96
7. CONCLUSÕES	97
7.1. Considerações Finais	97
7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	99
REFERÊNCIAS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conceito de lajes nervuradas proposto por MacGregor (2009)	5
Figura 2 – Edificações executadas com lajes nervuradas (Fonte: ATEX Brasil)	6
Figura 3 – Alternativas para o enrijecimento da ligação laje-pilar	7
Figura 4 – Enrijecimento através de viga faixa	8
Figura 5 – Dimensões das lajes ensaiadas por Soares (2004)	13
Figura 6 – Lajes nervuradas ensaiadas por Lau e Clark (2007)	15
Figura 7 – Superfície de ruptura perdida por Lau e Clark (2007)	17
Figura 8 – Dimensões das lajes ensaiadas por Souza (2007)	18
Figura 9 – Dimensões das lajes L1 e L2 ensaiadas por Souza (2007)	20
Figura 10 – Dimensões das lajes L3, L4, L5 e L6 ensaiadas por Albuquerque (2009)	21
Figura 11 – Disposições construtivas de acordo com a norma americana ACI 318 (2008)	24
Figura 12 – Perímetros críticos segundo a ACI 318 (2008)	26
Figura 13 – Disposições construtivas segundo o EC2 (2004)	27
Figura 14 – Perímetro crítico segundo o EC2 (2004)	29
Figura 15 – Mecanismo de ruptura segundo a Teoria das Linhas de Ruptura (lajes unidirecionais)	35
Figura 16 – Mecanismo de ruptura segundo a Teoria das Linhas de Ruptura (lajes bidirecionais)	36
Figura 17 – Região de momento fletor negativo em um pavimento	38
Figura 18 – Planta baixa das lajes	39
Figura 19 – Cortes das lajes	40
Figura 20 – Forma utilizada para fabricação das lajes	41
Figura 21 – Disposição da armadura de flexão das lajes	42
Figura 22 – Armação das lajes estudadas	42
Figura 23 – Armadura de cisalhamento TR8644 utilizada nas nervuras das lajes	43
Figura 24 – Armadura de cisalhamento na viga faixa	44
Figura 25 – Posicionamento dos defletômetros digitais nas lajes	45
Figura 26 – Arranjo dos defletômetros nas lajes unidirecionais	45
Figura 27 – Arranjo dos defletômetros nas lajes bidirecionais	46
Figura 28 – Posição dos extensômetros na armadura de flexão das lajes	47

Figura 29 – Posicionamento dos extensômetros do concreto na superfície inferior da laje	48
Figura 30 – Sistema de ensaio das lajes unidirecionais (L1 e L2)	49
Figura 31 – Sistema de ensaio das lajes bidirecionais (L3 e L4)	50
Figura 32 – Acionadores de carga e indicadores utilizados nas lajes L3 e L4	51
Figura 33 – Ensaio para determinação das propriedades do concreto	52
Figura 34 – Processo de fabricação das lajes e cura do concreto	53
Figura 35 – Demonstração gráfica do comportamento da barra de aço de 12,5 mm	53
Figura 36 – Demonstração gráfica do comportamento da barra de aço de 5,0 mm	54
Figura 37 – Deslocamentos das lajes L1 e L2	56
Figura 38 – Deslocamentos das lajes L3 e L4	57
Figura 39 – Deslocamentos ao longo do comprimento das lajes L1 e L2	59
Figura 40 – Deslocamentos ao longo do comprimento das lajes L3 e L4	60
Figura 41 – Deformações na superfície do concreto das lajes L1 e L2	62
Figura 42 – Deformações na superfície do concreto das lajes L3 e L4	63
Figura 43 – Deformações nas armaduras de flexão das lajes L1 e L2	65
Figura 44 – Deformações nas armaduras de flexão das lajes L3 e L4	66
Figura 45 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da viga faixa das lajes L1 e L2	68
Figura 46 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da viga faixa das lajes L3 e L4	69
Figura 47 – Mapa de fissuração da laje L1	71
Figura 48 – Mapa de fissuração da laje L2	72
Figura 49 – Mapa de fissuração da laje L3	73
Figura 50 – Mapa de fissuração da laje L4	74
Figura 51 – Padrão de fissuração das lajes ensaiadas por Ajdukiewicz, A. B. and Kliszczewicz, A. T (1986)	76
Figura 52 – Modo de ruptura observado das lajes L1 e L2	78
Figura 53 – Modo de ruptura observado das lajes L3 e L4	79
Figura 54 – Modelo da laje com viga faixa igual a 150 mm	82
Figura 55 – Modelo da laje com viga faixa igual a 200 mm	83
Figura 56 – Modelo da laje com viga faixa igual a 250 mm	84
Figura 57 – Distribuição dos esforços nas lajes unidirecionais L1 e L2 com viga faixa de altura igual a 150 mm	85

Figura 58 – Distribuição dos esforços na laje bidirecional L3 com viga faixa de altura igual a 200 mm	86
Figura 59 – Distribuição dos esforços na laje bidirecional L4 com viga faixa de altura igual a 250 mm	87
Figura 60 – Fluxo de cargas na ligação viga faixa-nervuras	89
Figura 61 – Perímetro de controle das lajes segundo o ACI 318 (2008)	94
Figura 62 – Perímetro de controle das lajes segundo o EC 2 (2004) e NBR 6118 (ABNT, 2014)	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das lajes ensaiadas por Soares (2004) _____	13
Tabela 2 - Características gerais das lajes ensaiadas por Soares (2004) _____	14
Tabela 3 - Características gerais das lajes ensaiadas por Lau e Clark (2007) _____	16
Tabela 4 - Características gerais das lajes ensaiadas por Souza (2007) _____	18
Tabela 5 - Características da região maciça das lajes ensaiadas por Albuquerque (2009) _____	21
Tabela 6 - Cargas últimas e modo de ruptura das lajes ensaiadas por Albuquerque (2009) _____	22
Tabela 7 - Características das lajes _____	39
Tabela 8 - Armaduras longitudinais nas duas direções das lajes _____	42
Tabela 9 - Características do concreto das lajes _____	52
Tabela 10 - Propriedades mecânicas das armaduras utilizadas nas lajes _____	54
Tabela 11 - Modo de ruptura das lajes _____	77
Tabela 12 - Relação entre as cargas experimentais e as estimativas de resistência ao cisalhamento das nervuras _____	91
Tabela 13 - Relação entre as cargas últimas e as estimativas de resistência ao cisalhamento considerando os critérios de laje maciça, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) _____	93
Tabela 14 - Relação entre as cargas últimas e as estimativas de resistência à punção de acordo com as estimativas de projeto _____	95
Tabela 15 - Relação entre as cargas últimas e a resistência à flexão pela Teoria das Linhas de Ruptura _____	96

RESUMO

SACRAMENTO, P. V. P. (2014). Lajes Nervuradas de Concreto Armado com Viga Faixa de Altura Variável. Belém, 114p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará.

As lajes nervuradas têm sido largamente utilizadas nas edificações por apresentar diversas vantagens em sua execução e desempenho. A fim de se obter um bom dimensionamento deste tipo de laje é necessário garantir que os esforços sejam devidamente suportados, principalmente aqueles considerados críticos, os quais podem levar a estrutura ao colapso de forma brusca, como é o caso da punção que geralmente ocorre na ligação laje-pilar e do cisalhamento na região das nervuras. Com o objetivo de avaliar o comportamento das lajes nervuradas em função da variação da altura da viga faixa foram fabricadas quatro lajes nervuradas de concreto armado, sendo duas unidirecionais e duas bidirecionais. A taxa de armadura de flexão foi constante em todas as lajes. Todas as lajes foram quadradas de lado 2200 mm e espessura constante igual a 150 mm. A principal variável neste trabalho foi a variação na altura da viga faixa. Esta variação teve o objetivo de avaliar como tal variação pode influenciar o comportamento das nervuras, mesmo quando o limite de espaçamento entre estas últimas for assegurado. Além disso, verificar se a punção é uma possibilidade de ruptura para este caso.

As estimativas na etapa de dimensionamento foram baseadas em três diferentes normas. Estas foram ACI 318 (2008), Eurocode 2 (2004) e NBR 6118 (ABNT, 2014). Estudos realizados com lajes nervuradas têm mostrado que as estimativas das normas de projeto são conservadoras. Além disso, as previsões normativas de dimensionamento podem induzir a resultados imprecisos quanto à resistência das lajes. Os resultados experimentais desta série de ensaios foram comparados com as recomendações normativas a fim de avaliar a precisão destas três normas, no que se referem às lajes nervuradas. Foram, ainda, construídos modelos computacionais a fim de verificar qual o comportamento das lajes quanto à distribuição das tensões tanto na ligação da viga faixa-pilar como na ligação viga faixa-nervuras. Os resultados das lajes mostraram que a ligação viga faixa-nervuras deve ser tratada de forma criteriosa por conta da diferença de rigidez que existe entre a região maciça e as nervuras.

Palavras chave: Laje nervurada, concreto armado, nervuras, viga faixa.

ABSTRACT

SACRAMENTO, P. V. P. (2014). Reinforced Concrete Ribbed Slabs with Wide Beam of Variable Height. Belém, 114p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará.

The ribbed slabs have been widely used in the buildings it has several advantages in its execution and performance. In order to get a good design of this type of slab is necessary ensure that the stresses are properly supported, mainly those considered critical, which can lead the structure to the collapse suddenly, as is the case of punching in connection wide beam-column or of the shear in the region of the ribbed. In order to evaluate the punching strength of the slab-column connection and the shear strength of the ribs were manufactured four reinforced concrete ribbed slabs, two slabs one-way and two slabs two-way. The flexural reinforcement rate was constant in all slabs. All slabs were square of side 2200 mm and thickness equal to 150 mm. The main variable in this study was the change in height of the wide beam. This variation has to evaluate the performance of the ribs, even when the limit of spacing between them is ensured. Also, check if the punching is a possibility of rupture in this case.

The estimates in this step design were based on three different standards. These were ACI 318 (2008), Eurocode 2 (2004) and NBR 6118 (ABNT, 2014). Studies with ribbed slabs have shown that the estimates of design standards are conservative. In addition, this predictions may lead to inadequate results for resistance slabs. The experimental results of this series of tests were compared to the standard recommendations in order to assess the accuracy of these three standards, which refer to the ribbed slabs. Were also built computational models in order to verify that the behavior of slabs as the stress distribution both in connection wide beam-column range as the beam connection wide beam-ribbed. The results showed that the slabs connection wide beam-ribs must be treated in a careful manner due to the difference in stiffness between the solid area and the ribs.

Keyword: Ribbed slab, reinforced concrete, ribs, wide beam.

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A celeridade do crescimento no setor da construção civil tem sido um fator determinante na etapa de concepção dos projetos estruturais. Isso, muitas vezes, tem sobrepujado a qualidade dos projetos, os quais, naturalmente, estão mais vulneráveis a erros. Neste contexto, as decisões além de serem “rápidas” devem também atender ao aspecto econômico (custo/benefício), facilidade na montagem e execução dos elementos estruturais a fim de representar agilidade no resultado da obra. Nesta relação de tempo e custo otimizados é imprescindível, porém, que os projetos estruturais satisfaçam os requisitos básicos de qualidade como segurança e durabilidade, estabelecidos pelas normas de projeto.

Uma das definições importantes na fase de projeto é o tipo de laje a ser utilizado na construção. Essa definição depende de vários fatores, como a finalidade da edificação, condições de execução, imposições arquitetônicas, dimensões dos vãos, entre outros. Existem vários tipos de lajes disponíveis que podem se enquadrar na escolha de acordo com a finalidade. Dentre os tipos mais frequentes podem-se citar as lajes maciças com vigas, as lajes lisas, as lajes nervuradas, entre outras.

As lajes, em geral, possuem um alto consumo de concreto em relação ao total utilizado em uma obra de vários pavimentos. Segundo Dias (2003), as lajes maciças, por exemplo, representam do volume total de concreto da estrutura uma parcela equivalente a dois terços. Deste ponto de vista, surge a necessidade de avaliar diferentes tipos de lajes que satisfaçam as exigências construtivas e financeiras. Neste contexto, as lajes nervuradas têm se firmado cada vez mais por apresentarem condições favoráveis ao setor construtivo, pois, segundo Schwetz *et al* (2013), eliminam uma parcela significativa de concreto abaixo da linha neutra.

A justificativa para o uso de lajes nervuradas pode ser entendida através da análise de MacGregor (2009), em que, para vãos pequenos e médios, afirma, as lajes planas são uma boa opção. Porém, para grandes vãos, a espessura de uma laje plana (Figura 1a) necessária para transferir os esforços de cisalhamento da laje aos pilares excede a espessura necessária para a resistência à flexão. Neste caso, o concreto utilizado no meio do vão torna-se ineficiente. Para MacGregor (2009), a fim de reduzir o consumo de material e diminuir os momentos na laje por conta do peso próprio, o concreto do meio do vão pode ser substituído por nervuras (Figura 1b) e a

espessura na região dos apoios deve ser mantida por causa da transferência dos esforços de cisalhamento da laje ao pilar. Este tipo de laje, portanto, pode ser definido como laje nervurada.

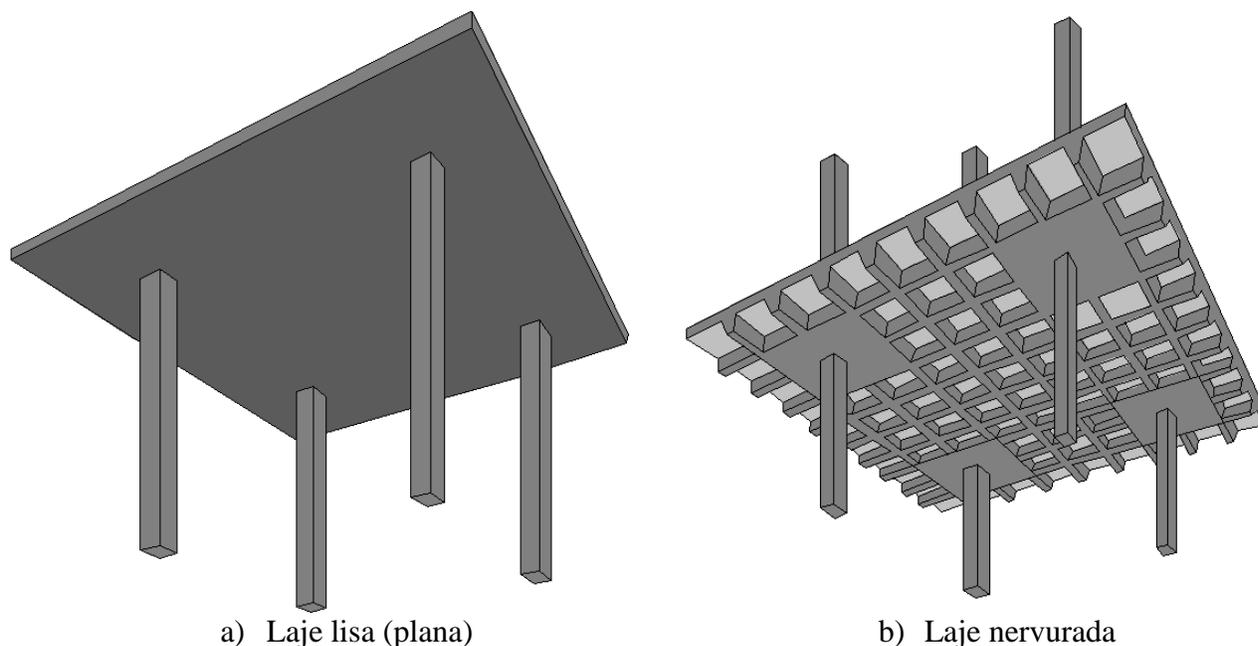


Figura 1 – Conceito de lajes nervuradas proposto por MacGregor (2009)

Por definição da NBR 6118 (ABNT, 2014), as lajes nervuradas são constituídas por nervuras, região de atuação dos momentos positivos. Estas nervuras são interligadas por uma capa de concreto também chamada de mesa de compressão. A aplicação deste conceito é satisfatória na prática quando se considera apenas as regiões de momento positivo em um pavimento, pois as nervuras trabalham como vigas, solidarizadas por pequenas placas de concreto. Elas apresentam diversas vantagens tanto econômicas quanto construtivas. A Figura 2 mostra alguns pavimentos construídos utilizando lajes nervuradas.

As principais vantagens deste tipo de laje são a eliminação de uma parte do concreto, considerada desprezível, na região tracionada, menor volume de concreto, embora apresente maior altura total que a laje maciça, diminuição do peso próprio da laje e o aprimoramento do sistema de fôrmas e escoramento para moldagem das lajes, representando maior facilidade na montagem e aceleram o tempo da obra.

Este sistema apresenta também importantes desvantagens, principalmente no que se refere à sua baixa rigidez e ductilidade quando usadas em áreas sísmicas, como mencionam Climent, A. B. e

Ávila, J. D. (2014) e redução da estabilidade global em relação aos esforços horizontais, diminuindo o efeito de diafragma rígido.



Figura 2 – Edificações executadas com lajes nervuradas (Fonte: ATEX Brasil)

A mesa de compressão que solidariza as nervuras funciona como abas de uma viga T - por isso chamada de mesa colaborante – enrijecendo as nervuras. Esse fato foi também observado por Branco (2011), quando estudou o comportamento de vigas T sujeitas ao cisalhamento. Porém, na região de momentos negativos, normalmente na região dos apoios, onde a capa de concreto estaria tracionada, torna-se inviável o uso de uma região nervurada do ponto de vista da segurança da ligação, sendo recomendável enrijecê-la. Este enrijecimento pode ser realizado através de alternativas como ábacos, capitéis ou a inserção de vigas faixas de concreto armado que interligam os pilares, conforme mostra a Figura 3.

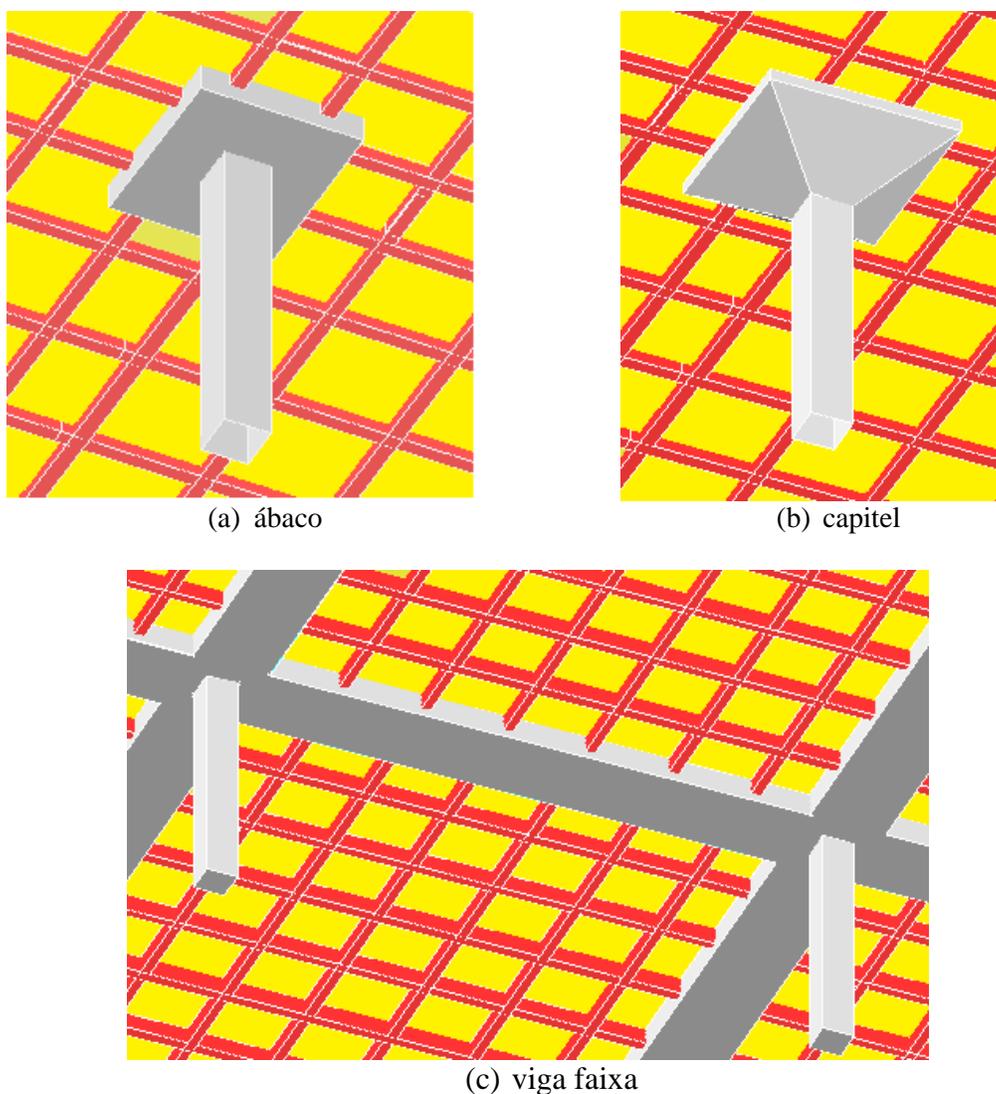
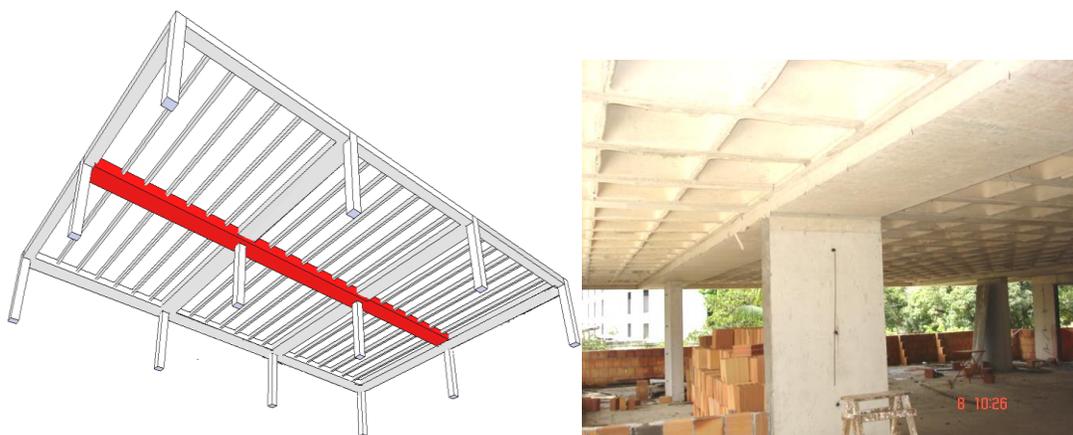


Figura 3 – Alternativas para o enrijecimento da ligação laje-pilar

O uso de vigas faixas tem se mostrado bem aceitável pelos projetistas, pois proporcionam um único horizonte de fôrmas e escoramento, sem contar a facilidade do embutimento de tubulações horizontais na parte inferior da laje. Em alguns casos de projeto é necessário aumentar a altura da viga faixa com o objetivo de evitar flechas excessivas no vão, evitar a verificação à punção e combater momentos fletores elevados na ligação laje-pilar. Esta situação que considera a variação da altura da viga faixa ainda é pouco abordada na literatura. A Figura 4 mostra um exemplo do engrossamento da viga faixa.



(a) Exemplo de engrossamento da viga faixa

(b) Pavimento com viga faixa mais espessa que altura da laje

Figura 4 – Enrijecimento através de viga faixa

Além do que já foi mencionado acima, o dimensionamento e verificação de lajes nervuradas dependem também do arranjo estrutural, ou melhor, das condições de contorno. Neste sistema estrutural, como nos outros, as lajes podem ser uni ou bidirecionais, dependendo de fatores como as dimensões em planta e solicitações. As lajes unidirecionais são recomendadas quando os esforços solicitantes predominam em uma direção. Neste caso, normalmente os pilares formam linhas contínuas, podendo ser interligados por uma viga faixa de largura, em geral, maior que a largura do pilar. Já as lajes bidirecionais são mais utilizadas em situações que os esforços precisam ser distribuídos nas duas direções da laje, como é o caso de pavimentos residenciais e garagens.

Portanto, este trabalho avaliou o desempenho de lajes nervuradas uni e bidirecionais com vigas faixa, verificando tanto o comportamento estrutural da ligação viga faixa-pilar como o comportamento da ligação viga faixa-nervuras quando ocorre esta variação na altura da viga faixa. Por fim, foram apresentadas conclusões a respeito deste tipo de laje de forma a cooperar com o meio técnico-científico, visto que as vigas faixas têm sido empregadas com frequência na composição do sistema estrutural com lajes nervuradas.

1.2. JUSTIFICATIVA

Apesar do sistema convencional ainda ser largamente utilizado, o emprego de sistemas estruturais com lajes nervuradas apoiadas em vigas faixas tem sido intenso no Brasil, principalmente nos casos de edificações onde é necessário vencer grandes vãos. Isso torna evidente a realização de

pesquisas nesta área, buscando-se avaliar a influência de parâmetros como o enrijecimento da viga faixa e o espaçamento entre as nervuras, que usualmente geram dúvidas na fase de projeto. Além disso, no que diz respeito à verificação aos estados limites, as proposições dos códigos normativos apontam para as recomendações de lajes do tipo maciça. Isto, todavia, tem gerado dúvidas e imprecisões quanto à quantificação de esforços deste tipo de laje.

A norma brasileira, por exemplo, propõe que as verificações das lajes nervuradas sejam feitas ora admitindo as considerações de lajes maciças ora admitindo as considerações de viga, baseando-se nos limites de espaçamento entre as nervuras. Todavia, pesquisas realizadas por Lau e Clark (2007), por exemplo, têm demonstrado que as verificações sugeridas para este sistema, baseadas nos conceitos de uma laje maciça, não são totalmente aplicáveis, pois as dimensões da viga faixa implicam diretamente no tipo de ruptura da laje, podendo, em alguns casos, ocorrer uma ruptura por punção na ligação viga faixa-pilar, o que seria um delimitador de projeto para lajes nervuradas, já que essas faixas são dimensionadas apenas para resistir ao momento fletor e esforço cortante.

Uma das formas utilizadas pelos projetistas para evitar a verificação à punção é o aumento da altura da viga faixa. Por outro lado, este aumento pode alterar o fluxo das tensões na ligação viga faixa-pilar de forma que as nervuras passem a ser mais solicitadas do que o previsto, principalmente no estado fissurado. No entanto, essas considerações são dispensadas pela norma brasileira quando se admite disposições construtivas que satisfaçam a capacidade resistente da laje. Até mesmo os programas de dimensionamento estrutural são configurados baseados nas considerações das normas de projeto, podendo se tornar um risco para os projetistas estruturais, uma vez que este tipo de laje tem sido empregado com mais frequência atualmente. Isso tem levado pesquisadores ao desenvolvimento de métodos de cálculo e modelos matemáticos para dar subsídios mais confiáveis a respeito do tratamento adequado de lajes nervuradas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste é verificar o comportamento de lajes nervuradas de concreto armado de concreto armado, uma vez que elas têm sido muito utilizadas na construção civil como boa opção pelas diversas vantagens proporcionadas. Além do mais, pelas diversas formas de enrijecimento na

região do apoio das lajes nervuradas, buscou-se verificar a influência do aumento da rigidez do elemento enrijecedor no comportamento mecânico deste tipo de laje, através da realização de ensaios experimentais em quatro lajes nervuradas unidirecionais e bidirecionais de concreto armado com viga faixa de altura variável, sob carregamento simétrico.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Avaliar a influência do aumento da altura da viga faixa na resistência e no modo de ruptura de quatro lajes nervuradas de concreto armado, através da realização de ensaios experimentais;
- ✓ Verificar o comportamento da ligação viga faixa-pilar no que diz respeito à resistência à punção;
- ✓ Verificar o comportamento da ligação viga faixa-nervuras à medida que ocorre o aumento da altura da viga faixa;
- ✓ Avaliação do comportamento e da resistência das nervuras quando a altura da viga faixa for aumentada;
- ✓ Realização de uma análise computacional com o auxílio do programa *SAP 2000 v.14.0.0 Advanced* a fim de verificar a distribuição das tensões na laje e o fluxo de cargas;
- ✓ Comparação das cargas últimas observadas experimentalmente com as estimativas dos códigos de projeto;
- ✓ Obter conclusões que cooperem para um melhor entendimento do comportamento mecânico de lajes nervuradas.

1.4. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é composto por sete capítulos, buscando-se avaliar os pontos fundamentais em cada um deles. Eles estão organizados da seguinte forma.

No *Capítulo 2* apresentam-se tanto os trabalhos realizados com lajes nervuradas que serviram como referência como as recomendações normativas referente ao projeto de lajes

nervuradas. Apresenta-se ainda a Teoria das Linhas de Ruptura, utilizada para a determinação da resistência à flexão das lajes.

No *Capítulo 3* é apresentado o programa experimental, contendo a metodologia e os materiais utilizados neste trabalho.

No *Capítulo 4* estão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios dos espécimes. Neste capítulo estão contidos os resultados dos deslocamentos das lajes, das deformações dos materiais instrumentados, da evolução da fissuração das lajes e das cargas últimas observadas.

No *Capítulo 5* é apresentada uma análise computacional através de modelos baseados no método dos elementos finitos.

No *Capítulo 6* são apresentadas as análises referentes aos códigos de projeto ACI 318 (2008), EUROCODE 2 (2004) e NBR 6118 (ABNT, 2014). Além disso, são apresentadas as análises referente à Teoria das Linhas de Ruptura.

No *Capítulo 7* são apresentadas as conclusões dos trabalhos, ressaltando os principais pontos e expondo as contribuições a respeito do tema pesquisado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. TRABALHOS REALIZADOS

Na busca de trabalhos compatíveis com o tema idealizado notou-se certa escassez tanto na literatura nacional como internacional, provando que apesar de ser um sistema estrutural largamente empregado na construção civil, ainda há a necessidade de ser investigado através de pesquisas. Os trabalhos que apresentaram maior afinidade com o tema proposto estão descritos a seguir.

2.1.1. SOARES (2004)

Soares (2004) realizou um estudo em oito lajes cogumelo nervuradas de concreto armado, submetidas a carregamento simétrico através de um pilar retangular metálico, posicionado no centro da laje. As lajes eram quadradas com lado igual a 1850 mm, altura útil variando entre 89 e 104 mm, e o espaçamento entre as nervuras igual a 300 mm. Quatro das oito lajes não possuíam armadura de cisalhamento, dentre as quais duas tinham fibras de aço misturadas com concreto. As demais lajes possuíam armadura de cisalhamento do tipo pino com cabeça para cima e do tipo cabeça para baixo, estribo aberto a 45° e fechado retangular na vertical. A Figura 5 mostra um esquema das lajes ensaiadas e a Tabela 1 apresenta as características gerais das lajes.

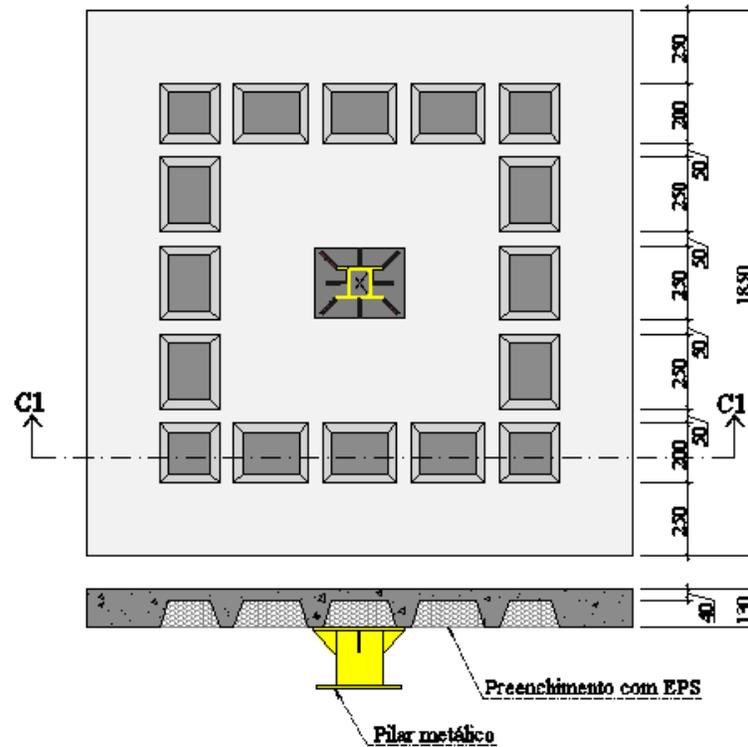


Figura 5 – Dimensões das lajes ensaiadas por Soares (2004)

Tabela 1 - Características das lajes ensaiadas por Soares (2004)

Laje	d (mm)	ρ_{flex} (%)	Armadura de Cisalhamento nas Nervuras				Fibra de aço DRAMIX
			Tipo de Armadura	Nº de camadas	ϕ (mm)	Inclinação	
LR-1	96	0,40	-	-	-	-	-
LR-2	98	0,39	-	-	-	-	-
LD-1	99	0,38	-	-	-	-	SIM
LD-2	89	0,46	-	-	-	-	SIM
LAC-1	103	0,36	Pino (para cima)	4	6,3	Vertical	-
LAC-2	103	0,36	Pino (para baixo)	4	6,3	Vertical	-
LAC-3	103	0,36	Estribo aberto	3	5,0	45°	-
LAC-4	104	0,35	Estribo fechado	3	5,0	Vertical	-

Neste trabalho, Soares (2004) analisou a resistência ao cisalhamento das nervuras, utilizando três tipos de armadura de cisalhamento. O autor menciona que a ruptura nas nervuras das lajes ocorre próximo à região maciça. Logo, isso explica o porquê da moldagem de um pequeno trecho de nervura aproximando-se do apoio. O autor também investigou a resistência à punção da região maciça.

No que diz respeito às cargas de ruptura, Soares (2004) observou que as armaduras de cisalhamento nas nervuras pouco contribuíram na resistência última da laje. Neste caso, ocorreu que a armadura de flexão deformou excessivamente antes da ruína por cisalhamento nas nervuras ou por punção na região maciça. Apesar disso, a laje que apresentou maior resistência foi a LAC-3, a qual possuía estribo aberto a 45°, demonstrando que estribos inclinados têm maior eficiência na resistência ao cisalhamento. Deve-se considerar também que a altura útil desta laje e a resistência à compressão apresentaram valores altos, como pode ser visto na Tabela 2.

Apesar das armaduras de cisalhamento não apresentarem ganhos significativos na resistência última, elas podem alterar o modo de ruptura da laje, conforme observou Soares (2004). Nas lajes em que as nervuras eram compostas por armadura transversal, as lajes tiveram seus modos de ruptura modificados quando comparado, por exemplo, com as lajes de referência LR-1 e LR-2, as quais apresentaram um comportamento de ruptura por flexão, porém o modo de ruína ocorreu por cisalhamento nas nervuras. As cargas últimas e os modos de ruptura são apresentados na Tabela 2.

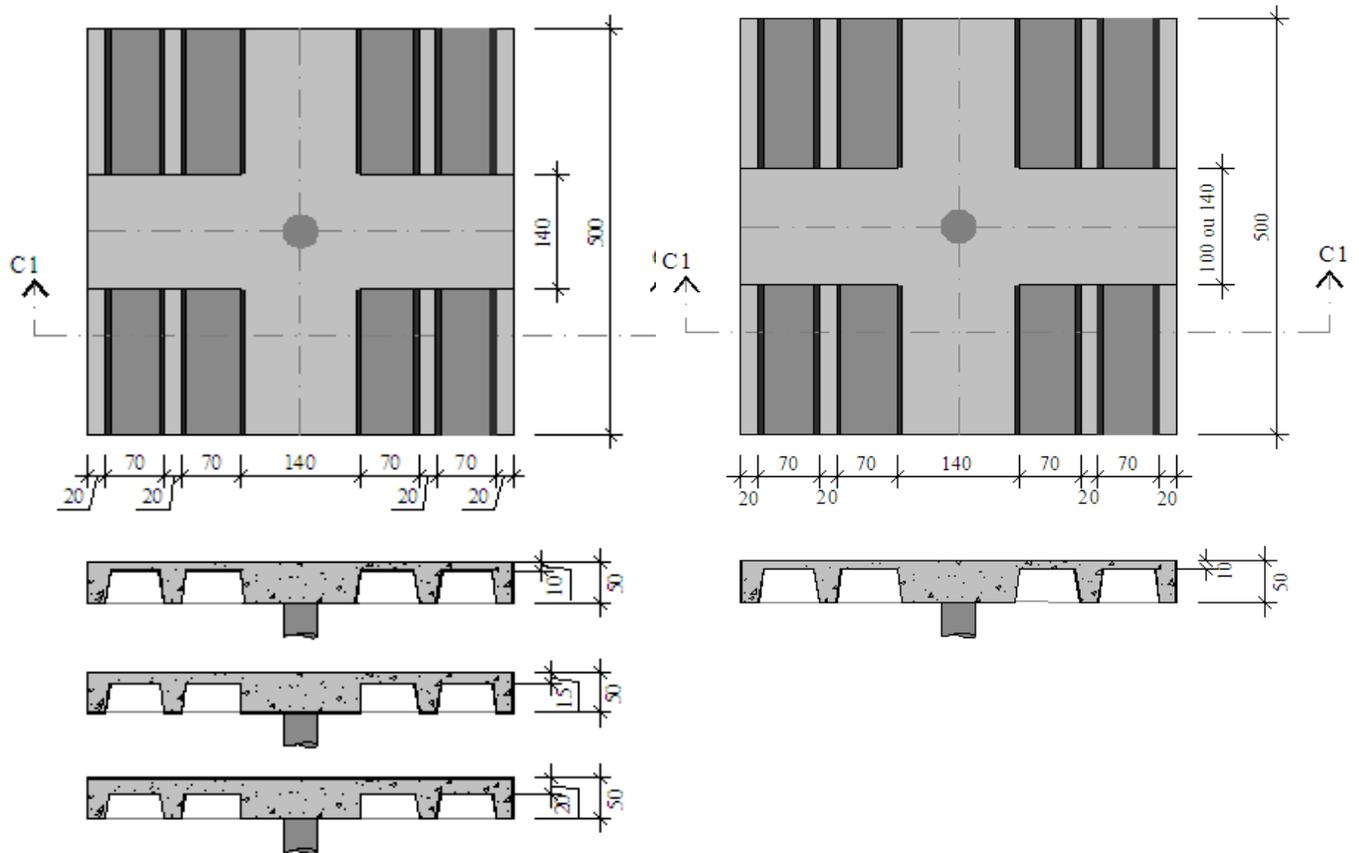
Tabela 2 - Características gerais das lajes ensaiadas por Soares (2004)

Laje	d (mm)	ρ_{flex} (%)	f_c (MPa)	Armadura de Cisalhamento nas Nervuras		P_u (kN)	Modo de ruptura observado
				Tipo de Armadura	f_{ysw} (MPa)		
LR-1	96	0,40	24	-	-	239	Flexão ¹ -cisalhamento nervura
LR-2	98	0,39	30	-	-	238	Flexão ¹ -cisalhamento nervura
LD-1	99	0,38	34	-	-	278	Flexão ¹ -cisalhamento nervura
LD-2	89	0,46	32	-	-	267	Flexão (DPE)-simétrico
LAC-1	103	0,36	35	Pino (para cima)	551	268	Flexão (DPE)-assimétrico
LAC-2	103	0,36	36	Pino (para baixo)	551	275	Flexão ¹ -punção
LAC-3	103	0,36	36	Estribo-aberto	578	286	Flexão ¹ -punção
LAC-4	104	0,35	37	Estribo-fechado	578	276	Flexão ¹ -punção
Flexão ¹ - escoamento da armadura de flexão							
Flexão (DPE) - "ruptura" por deformação plástica excessiva							

2.1.2. LAU E CLARK (2007)

Lau e Clark (2007) ensaiaram 20 lajes lisas nervuradas de micro-concreto com viga faixa nas duas direções, apoiadas em pilares internos. As lajes possuíam dimensões 500x500x50 mm, divididas em duas séries de ensaio: IRS e ISS. As lajes da série IRS possuíam largura da viga faixa

constante igual a 140 mm. A variável desta série foi a espessura da mesa de concreto, a forma e as dimensões do pilar e a resistência à compressão do concreto. Nas lajes da série ISS, foi mantida constante a espessura da mesa e a largura da viga faixa paralela às nervuras, variando-se a largura da viga faixa transversal às nervuras, a forma e as dimensões do pilar. Todas as lajes das duas séries eram apoiadas em pilares centrais. A Figura 6 mostra as plantas e os cortes das lajes da série IRS e da série ISS. A Tabela 3 apresenta as características gerais das lajes. O objetivo dos autores era propor um método de projeto ao cisalhamento de lajes nervuradas com vigas faixa, levando em consideração a analogia de ruptura entre uma laje nervurada e uma laje maciça.



a) Série IRS

b) Série ISS

Figura 6 – Lajes nervuradas ensaiadas por Lau e Clark (2007)

Tabela 3 - Características gerais das lajes ensaiadas por Lau e Clark (2007)

Série	Laje	Tamanho do pilar (mm)	Forma do pilar	Espessura da mesa (mm)	Largura da Viga faixa (mm)	f_{ck} (MPa)	P_u (kN)
IRS	IRS 1ª	40	Circular	10	140	43,3	48
	IRS 2ª	60		10		49,1	64
	IRS 3ª	40	Quadrada	10		46,5	52
	IRS 4ª	60		10		42,0	64
	IRS 5ª	40		10		65,6	56
	IRS 6ª	60		10		60,7	72
	IRS 7ª	30		10		44,6	44
	IRS 8ª	50		10		47,9	58
	IRS 1B	40		15		65,9	62
	IRS 2B	60		15		65,9	74
	IRS 1C	40		20		68,6	64
	IRS 2C	60		20		69,0	76
ISS	ISS 1	40	Circular	10	140/140	38,3	15
	ISS 2	40			140/140	46,5	16
	ISS 3	40			140/100	41,3	12
	ISS 4	40			140/140	37,5	14,5
	ISS 5	40			140/100	45,1	15
	ISS 6	40			140/100	54,3	14,5
	ISS 7	60			140/100	43,0	15
	ISS 8	60	Quadrada		140/140	47,6	19

Os autores observaram que a ruptura por cisalhamento pode ocorrer por punção na região do pilar ou cisalhamento na viga faixa. Eles concluíram que, embora a ruptura em uma laje nervurada com viga faixa seja semelhante ao de uma laje maciça, há uma perda na resistência ao cisalhamento por conta de uma superfície de ruptura que é perdida quando as fissuras atingem a região das nervuras, como mostra a Figura 7. Além disso, foi possível notar que as dimensões da viga faixa em lajes nervuradas influenciam diretamente na resistência e no modo de ruptura da laje. Os espécimes ensaiados por Lau e Clark (2007), embora não apresentassem dimensões expressivas, permitem a compreensão, através dos resultados obtidos, de noções do comportamento de lajes nervuradas com viga faixa.

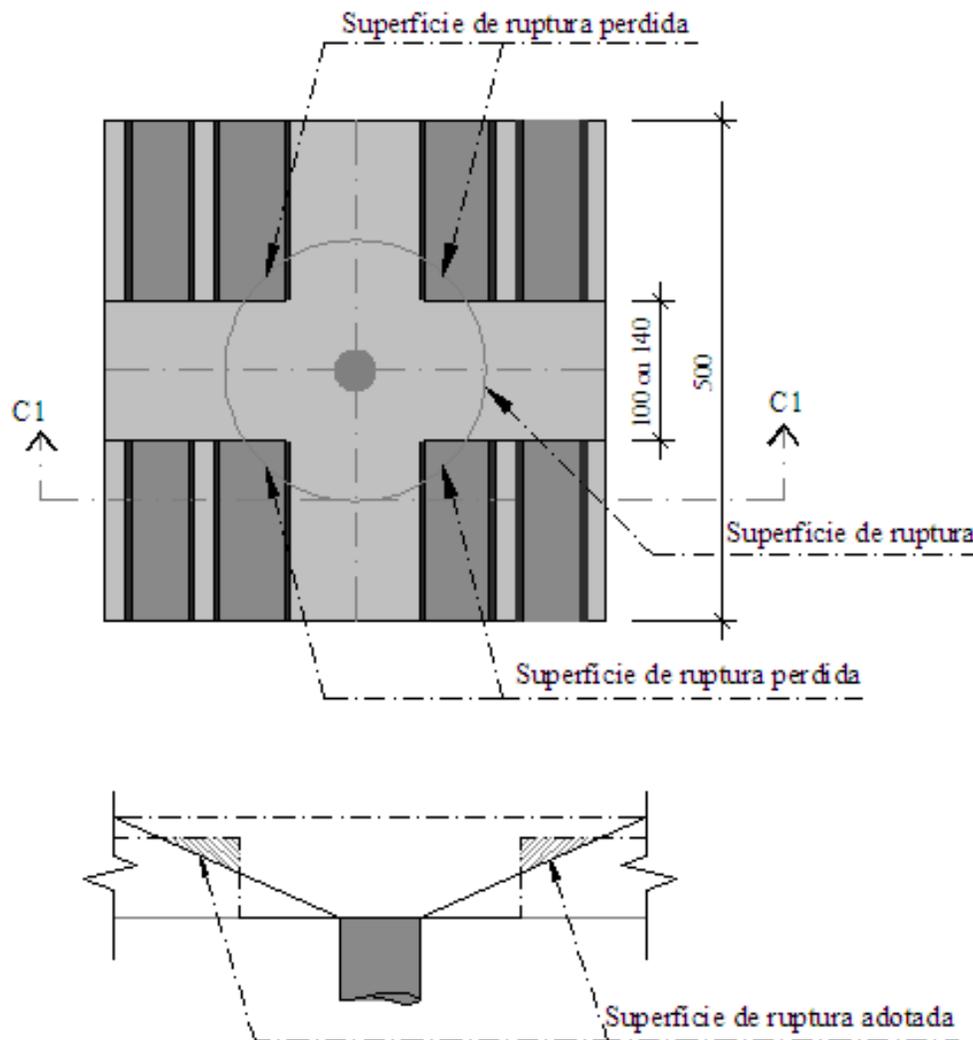


Figura 7 – Superfície de ruptura perdida por Lau e Clark (2007)

2.1.3. SOUZA (2007)

Souza (2007) ensaiou oito lajes lisas nervuradas bidirecionais de concreto armado submetidas ao punção. As lajes eram quadradas com lado igual a 1800 mm, altura total de 140 mm com a espessura da mesa igual a 60 mm. A Figura 8 mostra um desenho das lajes ensaiadas. As principais variáveis estudadas neste trabalho foram o tipo de armadura de cisalhamento que compunham as nervuras, do tipo treliça, estribo vertical fechado e estribo inclinado a 45° e o uso de armadura de combate à punção na região maciça, utilizando estribo inclinado a 45°. No sistema de ensaio adotado, as lajes eram apoiadas nas quatro bordas, com o carregamento aplicado no centro, orientado de baixo para cima. A Tabela 4 apresenta as características das lajes ensaiadas.

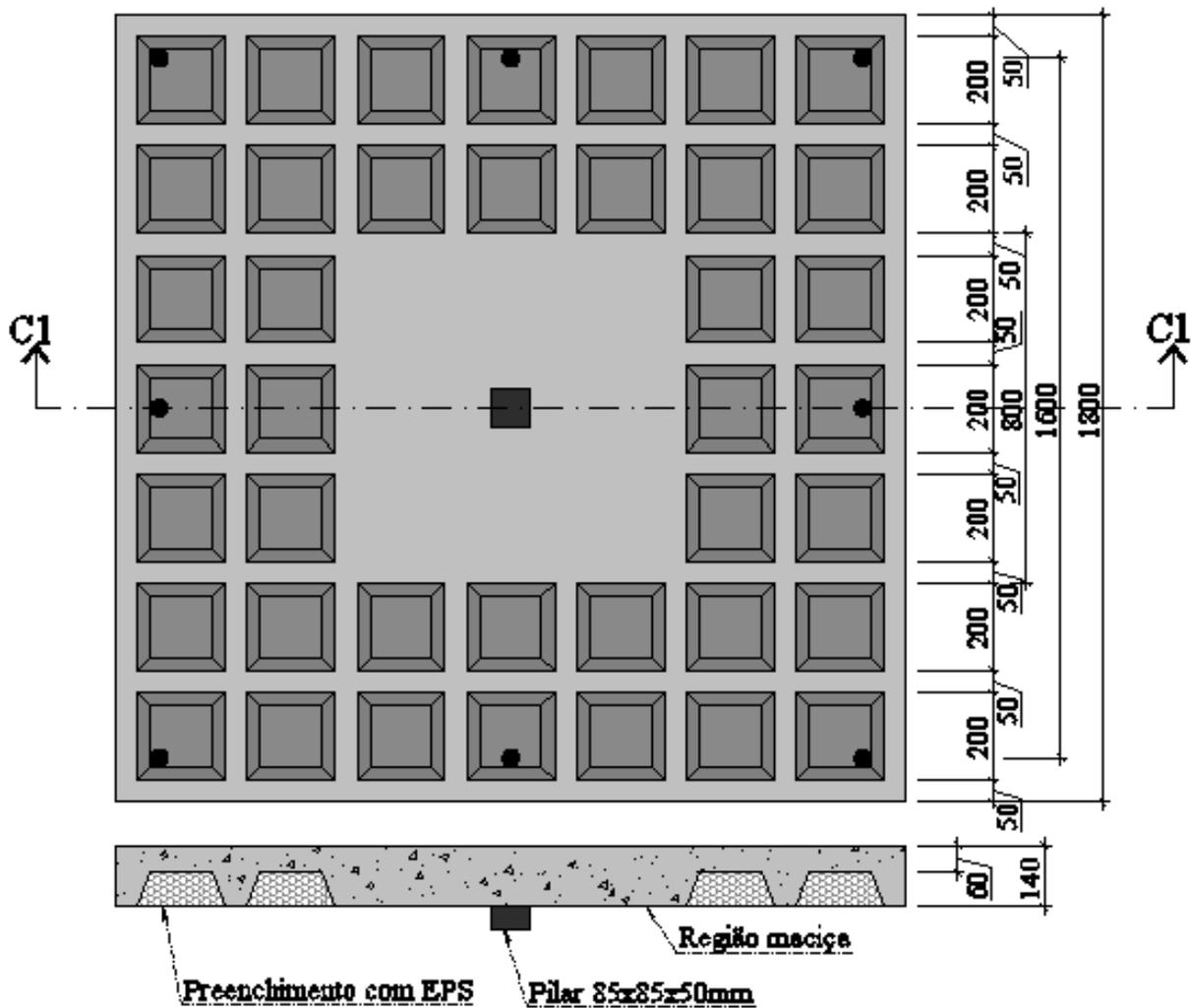


Figura 8 – Dimensões das lajes ensaiadas por Souza (2007)

Tabela 4 - Características gerais das lajes ensaiadas por Souza (2007)

Laje	d (mm)	ρ_{flex} (%)	f_c (MPa)	Armadura de Cisalhamento	
				Nervuras	Região Maciça
L1	120	1,27	36,6	-	-
L2	106	1,44	37,8	Treliça	-
L3	111	1,37	41,4	Treliça	-
L4	118	1,29	39,2	Treliça	-
L5	115	1,33	37,9	Estribo vertical fechado	-
L6	104	1,47	39,8	Treliça	Estribo aberto inclinado
L7	112	1,36	40,9	Estribo vertical fechado	Estribo aberto inclinado
L8	108	1,41	39,0	Estribo aberto inclinado	Estribo aberto inclinado

Um dos objetivos de Souza (2007) ao utilizar estribo do tipo treliça nas nervuras foi avaliar a contribuição das diagonais na resistência ao cisalhamento. A eficiência desta armadura de cisalhamento é um assunto bastante divergente no meio científico no que se refere à sua inclinação α .

Segundo os resultados obtidos, Souza (2007) observou que as normas apresentaram divergências quanto às cargas últimas experimentais e as previsões, em geral, subestimando a capacidade resistente das lajes quando se considerou a ruptura ocorrendo nas nervuras, representando, em média, a metade da carga obtida nos ensaios. Souza (2007) também verificou que o uso de armadura de cisalhamento nas nervuras não representou ganhos significativos na resistência última. Este comportamento pode ser explicado porque as lajes romperam ou por punção na região maciça ou por flexão com deformação excessiva da armadura de flexão, ou seja, maior parte das tensões foi absorvida pela região maciça e pela armadura de flexão, diminuindo a solicitação nas nervuras. Isto ficou comprovado pelas baixas deformações na armadura de cisalhamento das nervuras verificadas durante os ensaios.

Uma das justificativas para o comportamento das lajes de Souza (2007) é que as condições de contorno adotadas reduziram a solicitação nas nervuras, concentrando os esforços na região central. Isto mostra também que o arranjo estrutural (uni ou bidirecional) de uma laje influencia diretamente no seu comportamento, podendo alterar a resistência e o modo de ruptura das lajes nervuradas.

Quanto às normas de projeto, notou-se que estas são conservadoras quando se trata de lajes lisas nervuradas. Uma vez que a ruptura não ocorreu nas nervuras, pode-se concluir que as lajes resistiriam mais que o observado durante os ensaios, caso as nervuras fossem solicitadas. Quanto à resistência à punção as normas foram divergentes em relação às estimativas. A norma americana ACI 318 (2005), por exemplo, subestimou a capacidade resistente à punção tanto para as lajes com e sem armadura transversal na região maciça. Já a NBR 6118 (ABNT, 2003) previu resultados mais próximos dos obtidos experimentalmente. A resistência para as lajes sem armadura de punção foi levemente superestimada por esta norma. Já para as lajes com armadura de punção, a norma subestimou os resultados, porém não de forma significativa. Nos dois casos, portanto, a NBR 6118 (ABNT, 2003) apresentou resultados satisfatórios no que diz respeito à resistência à punção.

2.1.4. ALBUQUERQUE (2009)

Albuquerque (2009) modelou seis lajes lisas nervuradas de concreto armado, apoiadas nas quatro bordas e submetidas a um carregamento centrado, o qual foi simulado por uma placa metálica maciça com dimensões de 120x120x50 mm. As lajes eram quadradas de lado igual a 1800 mm e espessura de 150 mm. Todas as nervuras tinham largura igual a 50 mm espaçadas, por eixo, 250 mm uma das outras, não possuíam armadura de cisalhamento e os vazios entre elas foram preenchidos com EPS. A taxa de armadura de flexão, a qual era composta por barras de 8,0 mm, não variou em nenhuma das lajes, com percentual de 0,47%. A principal variável desta pesquisa foi o formato da região maciça, apresentando diferentes configurações na ligação com o pilar. De acordo com a mudança do maciço, o número de nervuras que convergia a ele também mudava, conforme pode ser visto nas Figuras 9 e 10 que mostram as diferentes configurações do maciço e na Tabela 5 que apresenta os dados gerais deste parâmetro.

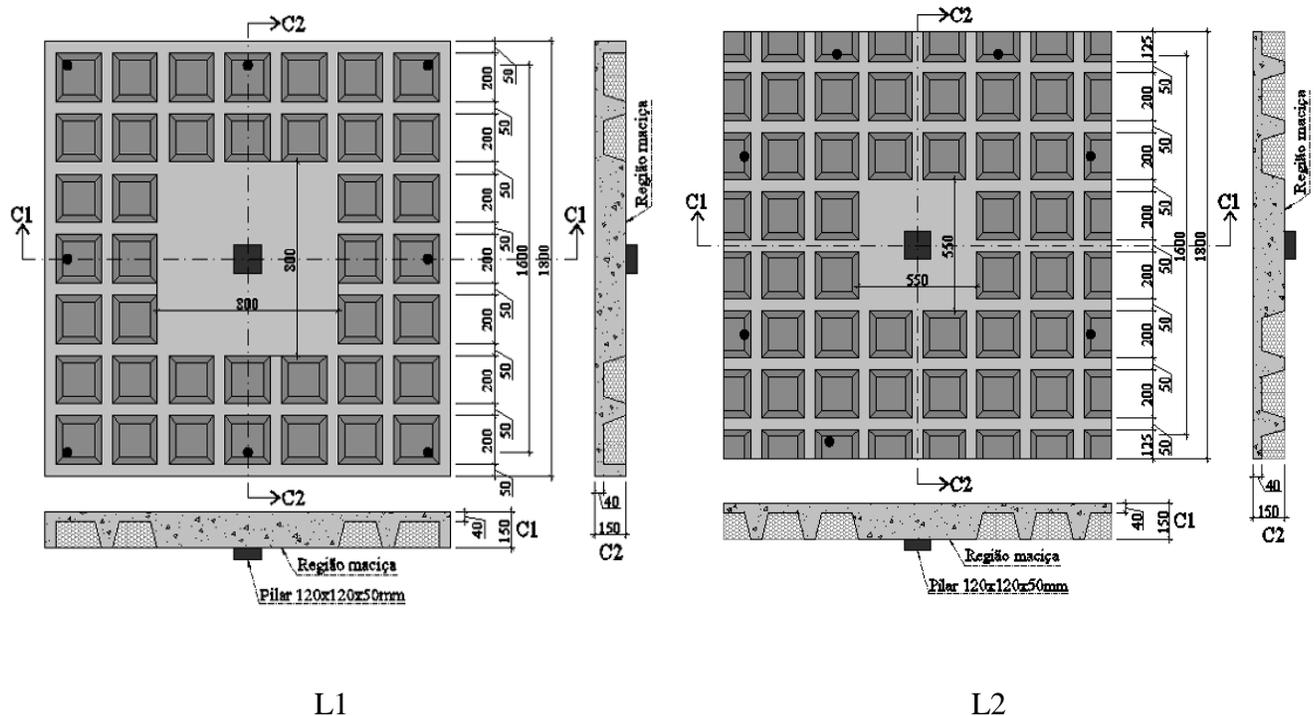


Figura 9 – Dimensões das lajes L1 e L2 ensaiadas por Souza (2007)

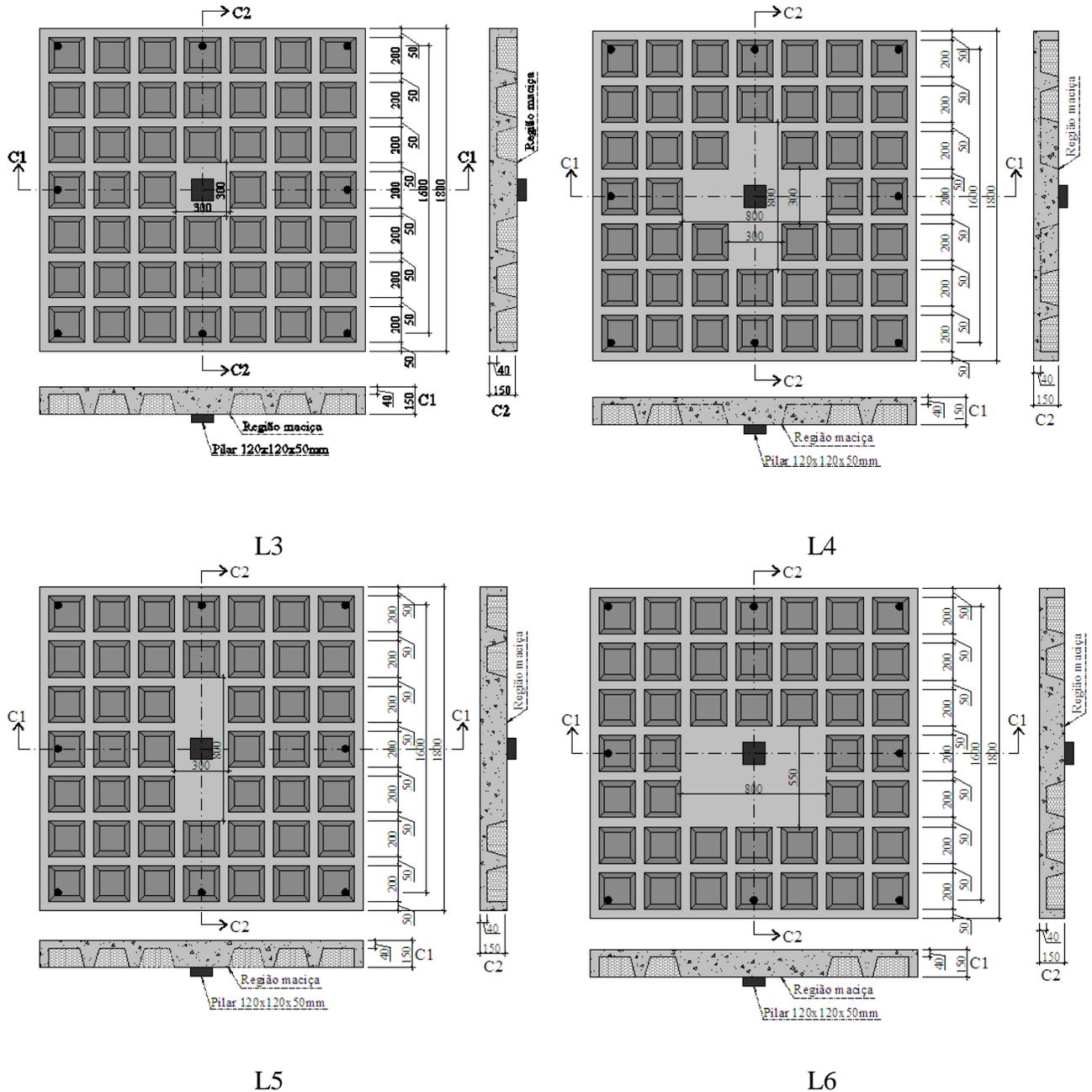


Figura 10 – Dimensões das lajes L3, L4, L5 e L6 ensaiadas por Albuquerque (2009)

Tabela 5 - Características da região maciça das lajes ensaiadas por Albuquerque (2009)

Laje	d (mm)	ρ_{flex} (%)	f_c (MPa)	Região Maciça		
				Nº de nervuras convergentes	Nº de vazios preenchidos	Perímetro (mm)
L1	128	0,47	55,9	16	9	3200
L2	130			12	4	2200
L3	128			8	1	1200
L4	128			8	5	3200
L5	127			14	6	2700
L6	126			12	3	2200

O objetivo de Albuquerque (2009) ao confeccionar os modelos foi avaliar a influência da variação da forma da região maciça na resistência das lajes lisas nervuradas. De uma forma mais específica, ela buscava avaliar como a variação deste parâmetro alterava o comportamento estrutural das nervuras, nas quais, como mencionado anteriormente, não foi utilizada armadura de cisalhamento, induzindo-as a um modo de ruptura por cisalhamento. Além da ausência de armadura de cisalhamento, as lajes possuíam baixa taxa de armadura de flexão, caracterizando uma seção sub-armada. Isto poderia ser prejudicial, pois poderia levar os espécimes a apresentarem um comportamento dúctil por causa das deformações excessivas nas barras de aço, desfavorecendo o objetivo de conduzir as nervuras a uma ruptura por cisalhamento. No entanto, Albuquerque (2009) explica que a ruptura por cisalhamento seria favorecida pela elevada rotação da laje, causando uma antecipação na ruptura por tração diagonal.

De acordo com os resultados dos ensaios apresentados por Albuquerque (2009), conforme mostrados na Tabela 6, é possível perceber que a configuração da região maciça adotada para cada laje foi bastante influente na resistência última da laje, mostrando que com o aumento do maciço as lajes resistiram mais, com acréscimo de carga de ruptura de até 80% (comparação feita entre as lajes L1 e L3). Em relação ao desempenho das lajes quanto aos deslocamentos verticais, notou-se que eles eram maiores à medida que o maciço reduzia de tamanho, comprovando a eficiência da rigidez do concreto na redução das flechas. As lajes, de uma forma geral, apresentaram altos deslocamentos, ultrapassando o limite estabelecido ($l/250$) pela NBR 6118 (ABNT, 2007) em um nível de carregamento, em média, de 50% da carga de ruptura. Portanto, nota-se que as dimensões do maciço em lajes nervuradas também são importantes a fim de atender não somente ao estado limite último como também ao estado limite de serviço.

Tabela 6 - Cargas últimas e modo de ruptura das lajes ensaiadas por Albuquerque (2009)

Laje	d (mm)	ρ_{flex} (%)	f_c (MPa)	P_{ys} (kN)	P_u (kN)	Modo de ruptura	Modo de ruína
L1	128	0,47	55,9	105,0	270,5	Flexão	Punção
L2	130			125,0	260,0	Flexão	Punção
L3	128			100,0	150,5	Flexo-Punção	Punção
L4	128			115,0	249,0	Flexão	Punção
L5	127			95,0	231,0	Flexão	Punção
L6	126			80,0	190,0	Flexão	Punção

Embora todas as lajes tenham apresentado um modo de ruína por punção, elas demonstraram um comportamento bem dúctil, caracterizado pelo escoamento da armadura de flexão em todas as lajes. Na Tabela 6 é possível visualizar que o escoamento das barras ocorreu no intervalo de 40 a 65% da carga de ruptura. Além disso, o nível de fissuração se estendeu bastante até o modelo atingir a ruína, caracterizando um comportamento típico de uma seção sub-armada. A laje L3 foi a que apresentou menor resistência dentre todas, a qual, por sua vez, apresentava menor área de concreto das regiões maciças. Por outro lado, as lajes com maciços maiores mostraram-se mais resistentes.

No que diz respeito às comparações dos resultados experimentais com os previstos pelas normas, foram observadas algumas divergências. A resistência das lajes ao cisalhamento foi, em todos os casos, subestimada pelos códigos normativos ACI 318R (2008), CEB-FIP MC90 (1993) e NBR 6118 (ABNT, 2003), os quais previam um modo de ruptura por cisalhamento nas nervuras. No caso da resistência à punção as normas foram levemente conservadoras, apresentando resultados satisfatórios, com exceção da norma americana, com um percentual de 47% maior em relação aos resultados experimentais, mostrando-se a favor da segurança, porém antieconômica do ponto de vista construtivo. No mais, como em nenhuma laje ocorreu a ruptura por cisalhamento nas nervuras, o qual estava previsto pelas normas, considera-se que a capacidade máxima resistente era ainda maior, fato já comprovado por Souza (2007). Portanto, de uma forma mais ampla, notou-se que o comportamento do sistema estrutural com lajes nervuradas difere-se do sistema com lajes maciças, em que são baseadas as normas de projeto.

2.2. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

As recomendações sobre lajes nervuradas apresentadas neste item são baseadas em três códigos normativos para projeto e verificação de estruturas de concreto, a saber: norma americana ACI 318 (2008), norma europeia EC2 (2004) e norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014). É comum às três normas não haver nenhuma verificação específica para lajes nervuradas. Elas recomendam, todavia, que o projeto e verificação sejam realizados atribuindo as condições de uma laje maciça, desde que obedecidos alguns critérios, os quais serão descritos a seguir. Ressalta-se que a verificação ao cisalhamento para vigas de concreto armado das normas ACI 318 (2008) e EC2 (2004) também se aplicam para lajes de concreto armado, tendo como diferença apenas a largura crítica (b_w).

2.2.1. ACI 318 (2008)

2.2.1.1. RECOMENDAÇÕES SOBRE LAJES NERVURADAS

A norma americana define alguns parâmetros básicos sobre disposições construtivas acerca de lajes nervuradas. Esta norma recomenda que as nervuras devam ter largura (b_w) não maior que 100 mm, altura de, no máximo, 3,5 vezes a largura mínima da nervura e espaçamento entre as faces das nervuras (s) não maior que 750 mm. A espessura da mesa deve ter no mínimo 37,5 mm e no máximo obedecer a relação ($s/12$), ou seja, poderá ter valor máximo de 62,5 mm de espessura. A Figura 11 exemplifica as recomendações sugeridas por esta norma.

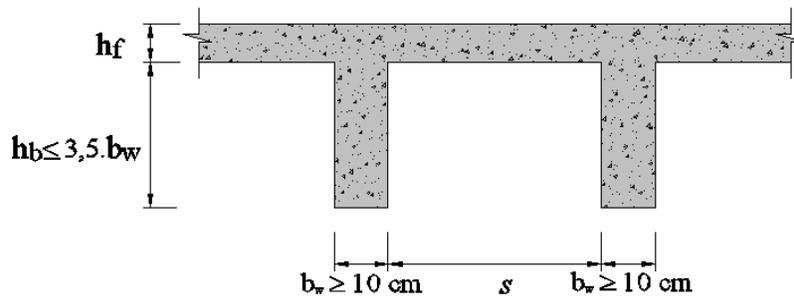


Figura 11 – Disposições construtivas de acordo com a norma americana ACI 318 (2008)

2.2.1.2. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Esta norma sugere que a resistência ao cisalhamento seja considerada como a média das tensões cisalhantes que atuam através da seção transversal $b_w \cdot d$. Para elementos sem armadura de cisalhamento a resistência da peça é governada apenas pela resistência à compressão do concreto na seção considerada. No caso de elementos com armadura de cisalhamento, a resistência da peça é dada pela parcela da resistência do concreto acrescida da resistência da armadura transversal. Logo, a resistência ao cisalhamento de uma peça de concreto armado constituída de armadura transversal é calculada conforme a Equação 2.1.

$$\phi V_n \leq V_c + V_s \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde,

V_n é a resistência nominal ao cisalhamento reduzida pelo fator ϕ .

V_c é a resistência ao cisalhamento fornecida pelo concreto, calculado conforme a Equação 2.2, de forma simplificada, válida para membros submetidos à combinação de momento fletor e cisalhamento apenas.

V_s é a resistência proveniente da armadura transversal de cisalhamento, calculada conforme a Equação 2.3 (estribos dispostos verticalmente) e 2.4 (estribos inclinados).

$$V_c = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad \text{(Equação 2.2)}$$

Em que,

f'_c é a resistência à compressão do concreto limitada em 70 MPa;

b_w é a largura da seção considerada e

d é a altura útil da seção.

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_{yt} \cdot d}{s} \quad \text{(Equação 2.3)}$$

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_{yt} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot d}{s} \quad \text{(Equação 2.4)}$$

Em que,

A_v é a área da armadura transversal;

f_{yt} é a tensão de escoamento da armadura transversal;

α é o ângulo de inclinação da armadura transversal e

s é o espaçamento entre os estribos.

2.2.1.3. RESISTÊNCIA À PUNÇÃO

Esta norma assume que as tensões de cisalhamento atuantes nas duas direções da seção de uma laje é função da resistência à compressão do concreto e da relação das dimensões do pilar com a altura útil da laje. Essa verificação das tensões cisalhantes deve ser realizada em uma região

distanciada $d/2$ das faces do pilar, considerado como o perímetro crítico b_0 em que as tensões atuam, conforme mostra a Figura 12. A resistência à punção V_c pode ser calculada de acordo com as Equações 2.5, 2.6 e 2.7, sendo adotado o menor valor.

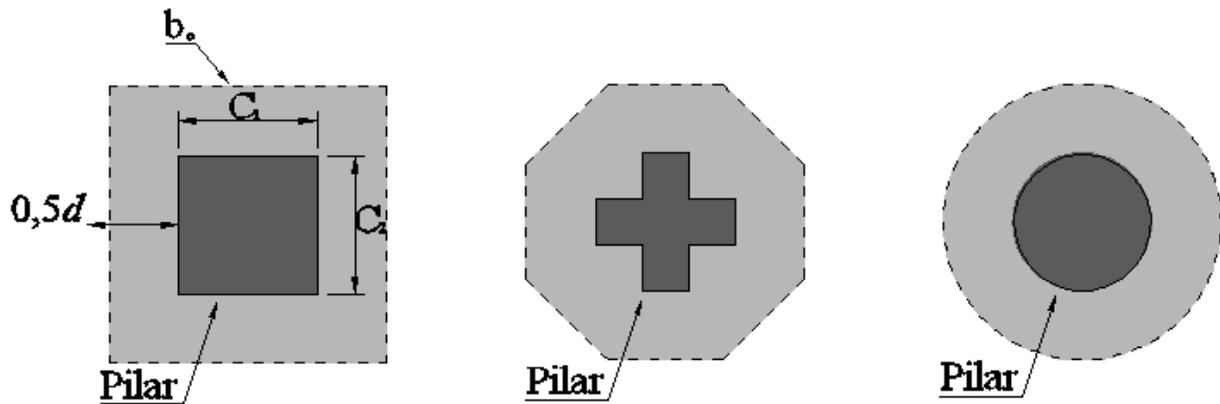


Figura 12 – Perímetros críticos segundo a ACI 318 (2008)

$$V_c = 0,17 \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \quad \text{(Equação 2.5)}$$

$$V_c = 0,083 \cdot \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{b_0} + 2\right) \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \quad \text{(Equação 2.6)}$$

$$V_c = 0,33 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \quad \text{(Equação 2.7)}$$

Onde,

β_c é a razão entre o maior e o menor lado do pilar;

f'_c é a resistência à compressão do concreto ≤ 70 MPa;

d é a altura útil da laje;

b_0 é o perímetro crítico em torno do pilar;

α_s é uma constante que varia de acordo com o número de lados inseridos na seção crítica da laje (40 para pilares internos, 30 para pilares de borda e 20 para pilares de canto).

2.2.2. EUROCODE 2 (2004)

2.2.2.1. RECOMENDAÇÕES SOBRE LAJES NERVURADAS

As recomendações acerca das lajes nervuradas propostas pela EC2 (2004) incluem alguns critérios que dizem respeito ao tratamento das lajes. Quando as nervuras e a mesa da laje nervurada tiverem rigidez suficiente à torção, não será necessário que estes elementos sejam verificados separadamente. No entanto, as recomendações de verificação para lajes maciças poderão ser aplicadas, considerando que os dois tipos de laje terão comportamento similar. Esta afirmação será válida quando as seguintes condições, conforme mostradas na Figura 13, forem obedecidas:

- O espaçamento das nervuras (s) não deve exceder 1500 mm;
- A altura da nervura (h), considerada da superfície inferior até à mesa, não deve ultrapassar quatro vezes sua largura;
- A altura da mesa (h_f) deve ter, no mínimo, $1/10.s$ ou 50 mm, sendo escolhido sempre o maior valor entre eles.

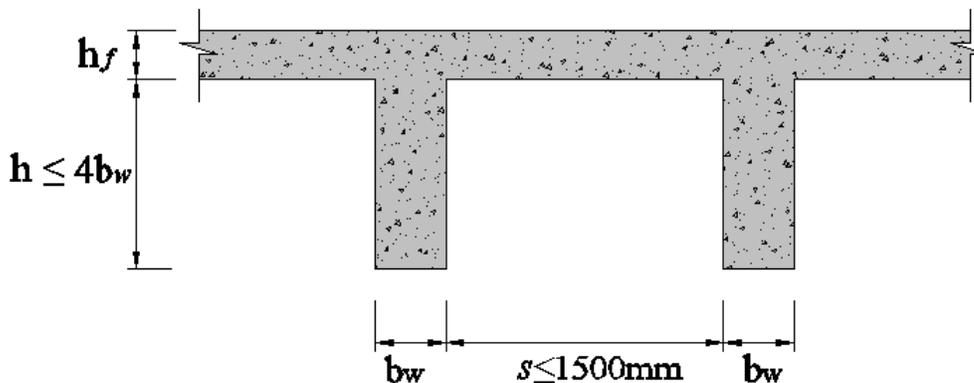


Figura 133 – Disposições construtivas segundo o EC2 (2004)

2.2.2.2. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Esta norma recomenda que em regiões onde a verificação atenda a condição demonstrada na Equação 2.8, a parcela resistente da armadura de cisalhamento pode ser desprezada, sendo

necessário, contudo, prever uma armadura mínima transversal. Logo a resistência ao cisalhamento de uma peça de concreto sem armadura de cisalhamento pode ser calculada de acordo com a Equação 2.9.

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c} \quad \text{(Equação 2.8)}$$

$$V_{Rd,c} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad \text{(Equação 2.9)}$$

Onde,

V_{Ed} é a força de cisalhamento provocada pelo carregamento externo;

$$\xi = \left(1 + \sqrt{200/d} \right) \leq 2,0, \text{ com o valor de } d \text{ em mm;}$$

ρ_l é a taxa de armadura longitudinal, não maior que 0,02;

f_{ck} é resistência à compressão do concreto em MPa;

b_w é a largura da seção considerada em mm e

d é a altura útil da seção.

Quando a condição imposta na Equação 2.9 não for satisfeita, ou seja, quando a parcela resistente $V_{Rd,c}$ não for suficiente para suportar os esforços de cisalhamento externos, uma armadura de cisalhamento deve ser adicionada. Neste caso, a parcela resistente da armadura de cisalhamento pode ser calculada de acordo com a Equação 2.10 ou 2.11, para estribos verticais ou inclinados, respectivamente.

$$V_s = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad \text{(Equação 2.10)}$$

$$V_s = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad \text{(Equação 2.11)}$$

2.2.2.3. RESISTÊNCIA À PUNÇÃO

A norma europeia propõe um modelo para a verificação da punção no estado limite último, correspondente ao esforço resultante de uma carga concentrada em uma área relativamente pequena. Essa área ao redor da carga é delimitada por um perímetro, chamado de perímetro de controle u_1 . A norma recomenda que ele pode ser tomado a uma distância $2d$ da face da área carregada, conforme mostra a Figura 14.

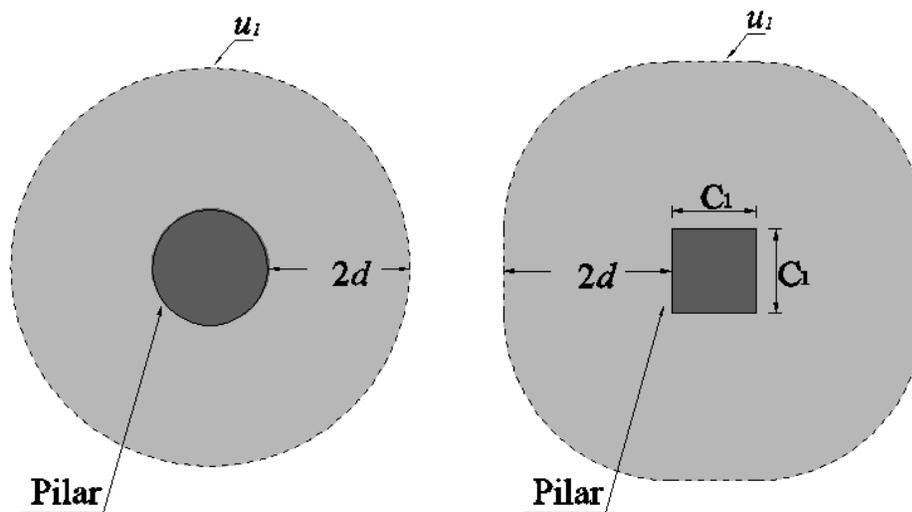


Figura 144 – Perímetro crítico segundo o EC2 (2004)

A verificação da resistência à punção de uma laje de concreto armado sem armadura de punção deve ser realizada, segundo esta norma, em uma seção de controle e pode ser calculada de acordo com a Equação 2.8. Nesta equação, os valores de ξ e ρ_l são limitados a fim de evitar resultados que possam comprometer a segurança da seção crítica de cálculo.

$$V_{Rd,c} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{(Equação 2.8)}$$

Onde,

$$\xi = \left(1 + \sqrt{200/d} \right) \leq 2,0, \text{ com o valor de } d \text{ em mm;}$$

ρ_l é a taxa de armadura longitudinal, não maior que 0,02;

f_{ck} é resistência à compressão do concreto em MPa;

u_1 é o perímetro de controle, calculado a partir de $2d$ da face do pilar e

d é a altura útil da laje.

2.2.3. NBR 6118 (ABNT, 2014)

2.2.3.1. RECOMENDAÇÕES SOBRE LAJES NERVURADAS

As recomendações da norma brasileira são bem sucintas em relação às lajes nervuradas. Quanto às disposições construtivas, ela padroniza os seguintes critérios:

- A espessura da mesa (h_f) deve ser maior ou igual a 1/15 da distância entre as faces das nervuras (l_0) e não menor que 40 mm, nos casos em que não houver tubulações horizontais embutidas;
- A espessura da mesa deve ter valor mínimo absoluto de 50 mm, quando existirem tubulações embutidas de diâmetro igual a 10 mm.
- Para casos em que existirem tubulações com diâmetro \emptyset maior que 10mm, a espessura da mesa deve ser de no mínimo 40 mm mais o diâmetro \emptyset da tubulação. Ou 40 mm mais $2\emptyset$ quando houver cruzamento de tubulações.
- A espessura das nervuras não deve ser inferior a 50 mm
- As nervuras não devem dispor de armadura de compressão quando sua largura (b_w) for menor ou igual a 80 mm.

Quanto às recomendações de projeto, a norma estabelece algumas condições, conforme descritas a seguir:

- No caso em que o espaçamento entre os eixos das nervuras (l) for menor ou igual a 650 mm, a verificação da flexão na mesa pode ser dispensada, podendo-se adotar os critérios de laje na verificação do cisalhamento na região das nervuras;

- Quando o espaçamento entre os eixos das nervuras (l) estiver compreendido entre 650 e 1100 mm, a flexão na mesa deve ser verificada e as nervuras devem ser dimensionadas como vigas. A verificação como laje pode ser ainda realizada caso o espaçamento entre as nervuras for até 900 mm e a largura média das nervuras for maior que 120 mm e
- Quando o espaçamento entre eixos de nervuras (l) for maior que 1100 mm, a mesa deve ser verificada como laje maciça, apoiada sobre vigas, obedecendo os limites mínimos de espaçamento.

2.2.3.2. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Para a verificação de lajes maciças ou nervuradas sem armadura de cisalhamento, a resistência ao cisalhamento pode ser calculada de acordo com a Equação 2.12.

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k (1,2 + 40 \cdot \rho_1)] \cdot b_w \cdot d \quad \text{(Equação 2.12)}$$

Onde,

$$\tau_{Rd} = 0,25 f_{ctd};$$

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c;$$

$f_{ctk,inf}$ é a resistência característica à tração do concreto com o valor inferior;

$k = 1,6 - d$, com o valor de d em metros;

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} \leq 0,02, \text{ onde } A_{s1} \text{ é a área da armadura de tração;}$$

b_w é a largura mínima da seção ao longo da altura útil d .

É necessário que a diagonal comprimida do concreto (biela) também seja verificada. Para isto, a norma recomenda que a resistência da biela seja calculada de acordo com a Equação 2.13.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{v1} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad \text{(Equação 2.13)}$$

α_{v1} : é igual a $(1 - \frac{f_{ck}}{250})$

Quanto à ruptura por tração diagonal do concreto a norma recomenda que a parcela resistente para absorver a força cortante em elementos sem armadura de cisalhamento seja calculada de acordo com a Equação 2.14. Neste caso, a parcela resistente refere-se à seção na flexão simples ou flexo-tração, com a linha neutra cortando a seção.

$$V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctk} \cdot b_w \cdot d \quad \text{(Equação 2.14)}$$

Quando se fizer necessário a utilização de armadura de cisalhamento, a parcela resistente desta armadura transversal pode ser calculada de acordo com a Equação 2.15.

$$V_{sw} = \left(\frac{A_s}{s}\right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad \text{(Equação 2.15)}$$

2.2.3.3. RESISTÊNCIA À PUNÇÃO

A norma brasileira de projetos para estruturas de concreto armado recomenda que as tensões de cisalhamento sejam verificadas em torno de carregamentos concentrados. Esta região de verificação é definida como superfície crítica. No caso de lajes sem armadura de cisalhamento, a verificação das tensões deve ser feita em duas superfícies. A primeira superfície crítica C é delimitada pelo contorno do pilar, onde as tensões da diagonal comprimida do concreto devem ser conferidas. A segunda superfície crítica C' é demarcada pelo contorno distanciado $2d$ da face do pilar, local onde as tensões da diagonal tracionada do concreto estão associadas à resistência à punção da ligação. Estas superfícies críticas são basicamente as mesmas utilizadas pelo EC2 (2004). Portanto, a capacidade resistente à punção de lajes sem armadura de cisalhamento pode ser obtida de acordo com a Equação 2.16.

$$V_{Rd,c} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{(Equação 2.16)}$$

Onde,

$$\xi = \left(1 + \sqrt{200/d}\right), \text{ com o valor de } d \text{ em mm;}$$

$\rho_l = \sqrt{\rho_x + \rho_y}$, onde ρ_x e ρ_y são as taxas de armadura nas duas direções ortogonais;

f_{ck} é resistência à compressão do concreto em MPa;

u_1 é o perímetro de controle, distanciado $2d$ da face do pilar e

d é a altura útil da laje.

Conforme visto nesta equação, a norma brasileira não limita o valor do *size effect* (ξ) tal como a EC 2 (2004), considerando, para valores maiores que 2,0, o acréscimo na capacidade resistente à punção. Além disso, o valor da taxa de armadura longitudinal (ρ_l) que favorece a resistência à punção também não é limitado em 0,02 conforme a norma europeia o faz.

2.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

A obtenção das cargas últimas de flexão foi baseada na Teoria das Linhas de Ruptura. Esta teoria considera a fissuração da laje como parâmetro de definição, em que placas são formadas divididas por fissuras, onde atuam momentos de ruptura. A definição da linha de ruptura é baseada nas condições de apoio da laje, ou seja, dependendo do tipo de carregamento a laje pode assumir diferentes configurações de linhas. Segundo Oliveira (2003), quando o carregamento é aplicado em apenas duas bordas opostas, o que define uma laje unidirecional, o comprimento da linha de ruptura estende-se ao longo da largura total da laje, conforme mostra a Figura 15. Portanto, a resistência à flexão de uma laje unidirecional pode ser estimada de acordo com as Equações 2.17 e 2.18.

Quando a laje é apoiada nas quatro bordas, as linhas de ruptura assumem uma configuração diferente daquelas que caracterizam uma laje unidirecional. A definição dessas linhas, onde atuam os momentos de ruptura, normalmente são complexas em sua determinação. Oliveira (2003) desenvolveu um método para determinar a resistência à flexão de lajes apoiadas nas quatro bordas com pilares retangulares, porém, baseando-se em lajes bidirecionais com pilares quadrados. Essas linhas de ruptura são formadas radialmente, direcionadas aos cantos das lajes, conforme mostra a Figura 16. Logo, a resistência à flexão para uma laje bidirecional pode ser determinada através da Equação 2.19.

$$m_u = \rho \cdot f_{ys} \cdot d^2 \cdot \left(1 - 0,5 \cdot \rho \cdot \frac{f_{ys}}{f_c} \right) \quad \text{(Equação 2.17)}$$

$$P_{flex} = 4. m_u \cdot \left(\frac{l}{l - c} \right) \quad \text{(Equação 2.18)}$$

$$P_{flex} = 2. m_u \cdot \left\{ \frac{l_x}{a_y} + \frac{l_y}{a_x} - 2 * \left[\frac{a_y}{a_x} * f_x + \frac{a_x}{a_y} * f_y \right] \right\} \quad \text{(Equação 2.19)}$$

Onde,

ρ é a taxa de armadura de flexão

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

d é a altura útil

f_c é a resistência à compressão do concreto

$$f_x = \frac{e_y}{a_y} * \frac{\frac{e_x}{a_x} * \left[\frac{a_y}{e_y} - 1 \right]}{1 + \frac{e_x}{a_x} * \left[\frac{a_y}{e_y} - 1 \right]}$$

$$f_y = \frac{e_x}{a_x} * \frac{\frac{e_y}{a_y} * \left[\frac{a_x}{e_x} - 1 \right]}{1 + \frac{e_y}{a_y} * \left[\frac{a_x}{e_x} - 1 \right]}$$

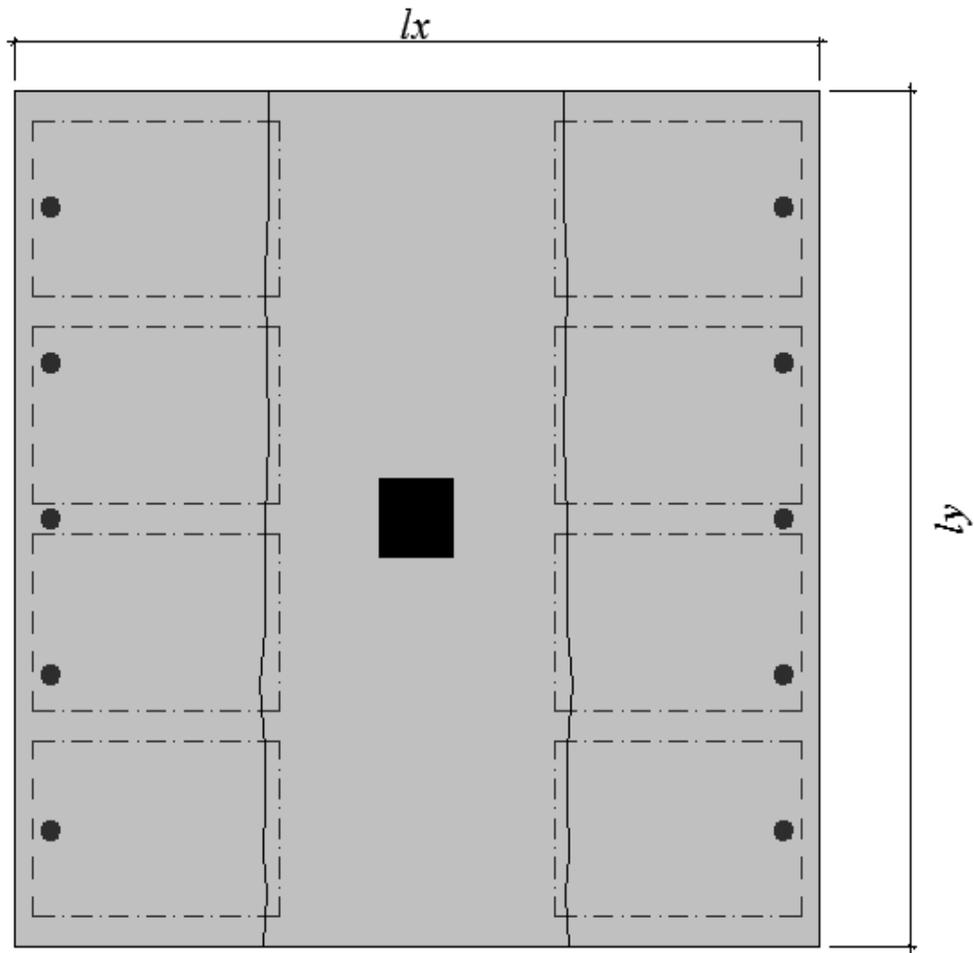


Figura 155 – Mecanismo de ruptura segundo a Teoria das Linhas de Ruptura (lajes unidirecionais)

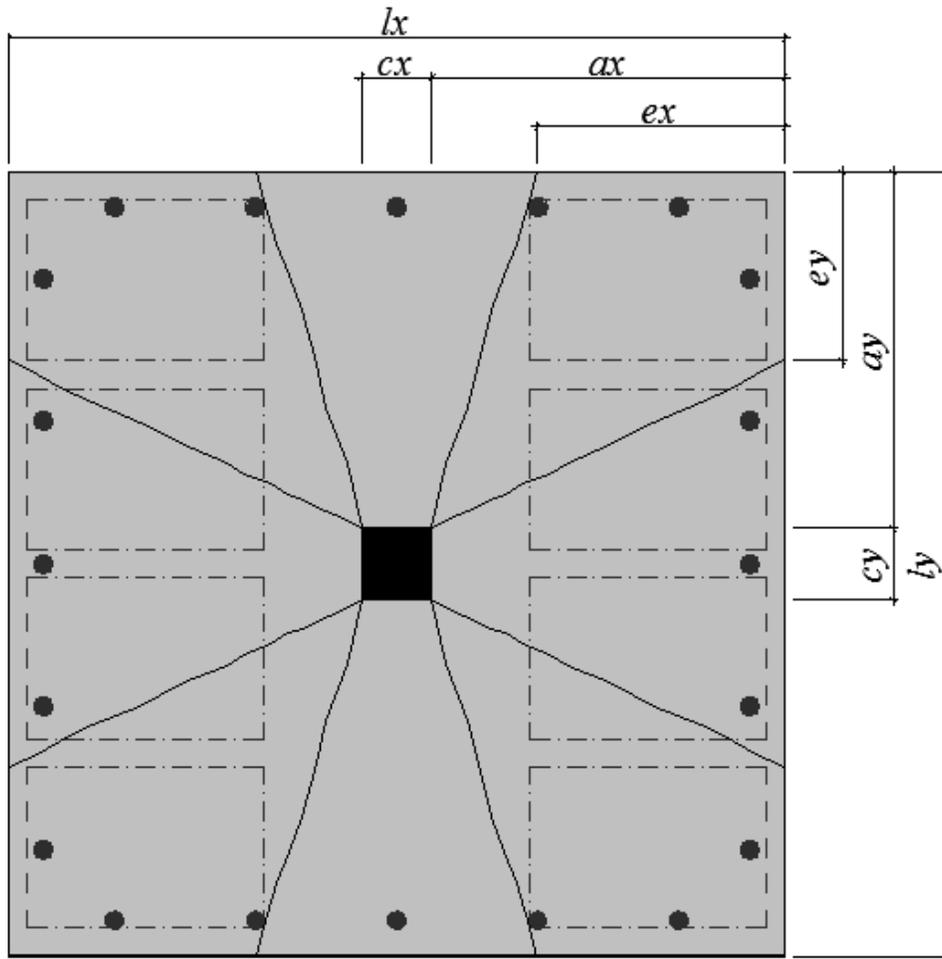


Figura 166 – Mecanismo de ruptura segundo a Teoria das Linhas de Ruptura (lajes bidirecionais)

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os estudos em estruturas de concreto armado através de ensaios experimentais têm a finalidade de representar as situações consideradas mais críticas que podem afetar a estrutura gerando danos e, até mesmo, o colapso. O estudo experimental é bastante relevante, pois uma boa compreensão do comportamento estrutural pode gerar cálculos mais precisos, satisfazendo tanto a economia como a segurança da estrutura. Em laboratório, normalmente as situações críticas são analisadas através de modelos locais de uma estrutura real. Isto porque conceber um pavimento de um edifício, por exemplo, em laboratório, requer não só uma extensa infraestrutura como alto investimento financeiro. Logo, representar por meio de modelos locais, tem sido uma boa alternativa para fins de estudos ao longo dos anos, muito embora eles não representem fielmente parâmetros como as condições de apoio.

No caso de lajes lisas ou lajes nervuradas, os modelos representados são baseados na idealização da distribuição do momento fletor. Muitos pesquisadores adotam essa configuração de uma região ao redor do pilar, onde ocorrem, geralmente, os momentos fletores máximos e as máximas tensões de cisalhamento. Ferreira (2010), por exemplo, afirma que, considerando uma análise elástica, esta região pode ser assumida como uma circunferência de raio igual a $0,21l$, sendo l o vão efetivo da laje, o que representa características semelhantes à distribuição dos momentos fletores negativos. A Figura 17 mostra um exemplo de um modelo local retirado de um pavimento.

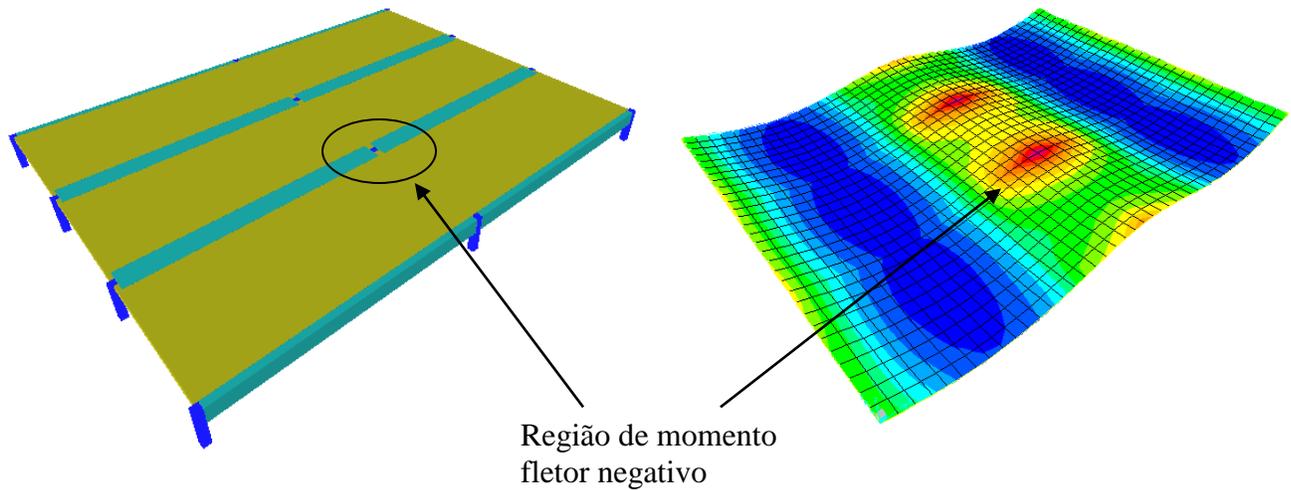


Figura 17 – Região de momento fletor negativo em um pavimento

3.2. CARACTERÍSTICAS DAS LAJES

A fim de avaliar o comportamento estrutural e a resistência última de lajes nervuradas com viga faixa foram moldadas quatro lajes, apoiadas sobre pilares com dimensões de 200x200x50 mm³ posicionados no centro das lajes. Estas lajes foram quadradas com lado igual a 2200 mm e espessura constante igual 150 mm. Duas lajes foram apoiadas nas duas bordas da direção x apenas, com aplicação de carga no centro (lajes unidirecionais). As outras duas lajes foram apoiadas no centro (pilar) e o carregamento foi aplicado nas quatro bordas (lajes bidirecionais). A principal variável neste trabalho foi a variação da altura da viga faixa, sendo sua largura constante igual a 750 mm. Inicialmente a viga faixa possuía 150 mm de altura variando até 250 mm.

As nervuras foram dispostas apenas em uma direção, com largura igual a 80 mm e altura igual a 100 mm cada, com espaçamento entre eixos de nervuras igual a 530 mm, conectadas por uma mesa com espessura igual a 50mm. Três lajes possuíram armadura de cisalhamento nas nervuras do tipo TR 8644 com inclinação α igual a 38,6°, a qual é comercializada pela empresa Belgo. A Tabela 7 apresenta os dados gerais das quatro lajes e as Figuras 18 e 19 mostram, respectivamente, a planta baixa e os cortes das lajes.

Tabela 7 - Características das lajes

LAJE	$l_x; l_y$ (mm)	C (mm)	f_{ck} (MPa)	h_{wb}^* (mm)	d_{wb} (mm)	d (mm)	ρ_x (%)	ρ_y (%)	Armadura de Cisalhamento nas nervuras
L1	2200	200	31	150	115	115	1,06	0,68	-
L2				150	115	115	1,06	0,68	TR 8644 - Belgo
L3				200	176	115	1,06	0,48	TR 8644 - Belgo
L4				250	226	115	1,06	0,38	TR 8644 - Belgo

*Altura da viga faixa

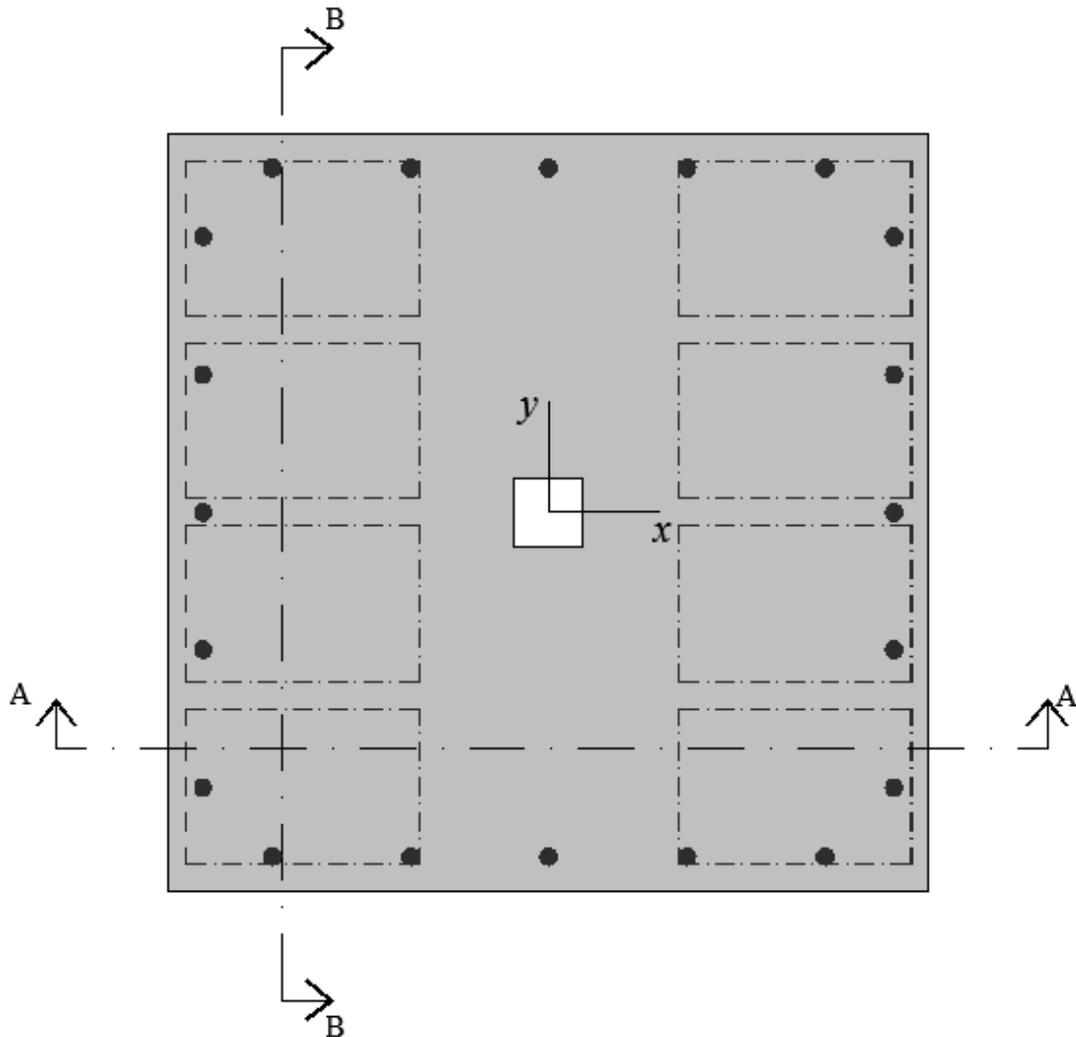


Figura 18 – Planta baixa das lajes

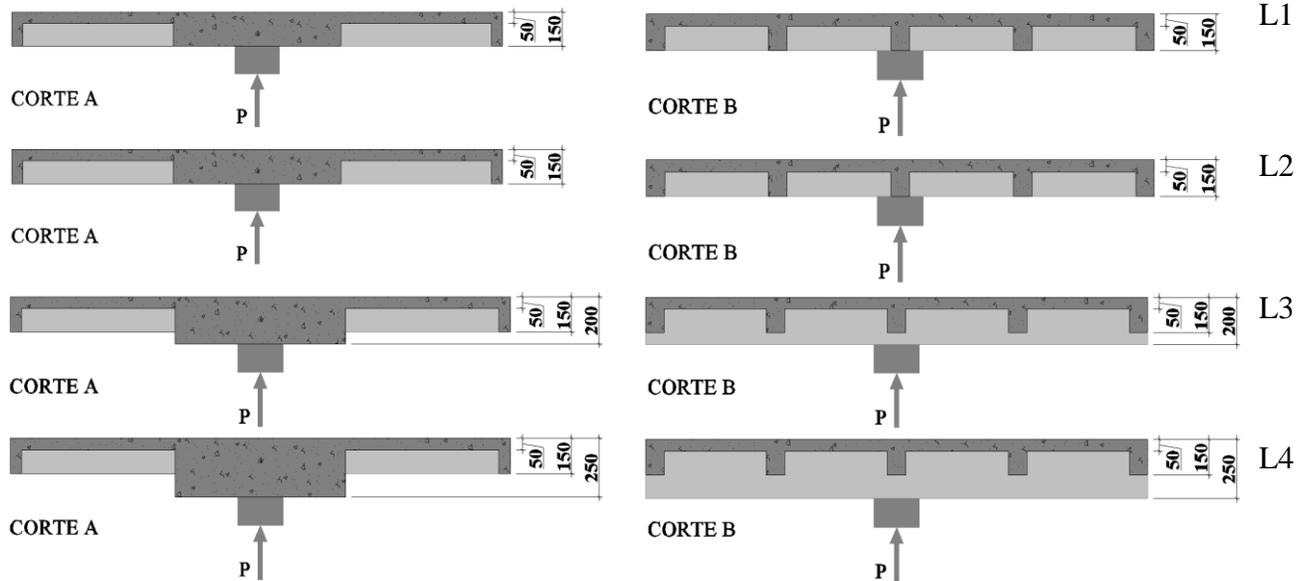


Figura 19 – Cortes das lajes

3.3. FÔRMAS

A produção das formas para confecção das lajes foi realizada no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará. Para isto, foram utilizadas chapas de madeirite, formando uma placa com dimensões em planta igual a 2200x2200 mm², com laterais igual a 150mm. Para as lajes em que a viga faixa possuía a altura maior, fora realizado um recorte na região central e moldado uma parcela da forma que correspondia exatamente à altura excedente da viga faixa em relação à altura restante da laje. Na região das nervuras foram moldados blocos separados, devidamente medidos, e em seguida adicionados à forma maior. A Figura 20 mostra uma das formas montadas para confecção das lajes.



Figura 20 – Forma utilizada para fabricação das lajes

3.4. ARMADURA DE FLEXÃO

A armadura de flexão das lajes foi composta por barras de aço do tipo CA-50 de diâmetro 12,5 mm e 20,0 mm, distribuídas na parte superior da laje. As barras de aço de 12,5 mm foram dispostas na direção das nervuras (direção x) da laje e as barras de aço de 20,0 mm dispostas na direção da viga faixa (direção y). A taxa de armadura foi constante para todas as lajes na direção x e na direção y foi variável por conta da altura útil variável da viga faixa. Normalmente, essa taxa de armadura de flexão para fins de pesquisas é alta, pois se busca evitar uma ruptura por flexão quando o objetivo é estudar outros tipos de ruptura como cisalhamento e punção. A Figura 21 mostra um esquema do posicionamento das barras nas lajes e a Figura 22 mostra uma das lajes com armação pronta. Na Tabela 8 são apresentadas as características da armadura de flexão das lajes. Como armadura de distribuição foram utilizadas barras do tipo CA-50 de diâmetro igual a 6,3 mm. Em cada lado paralelo à viga faixa foram posicionadas cinco barras de aço, totalizando dez barras de 6,3 mm em cada laje.

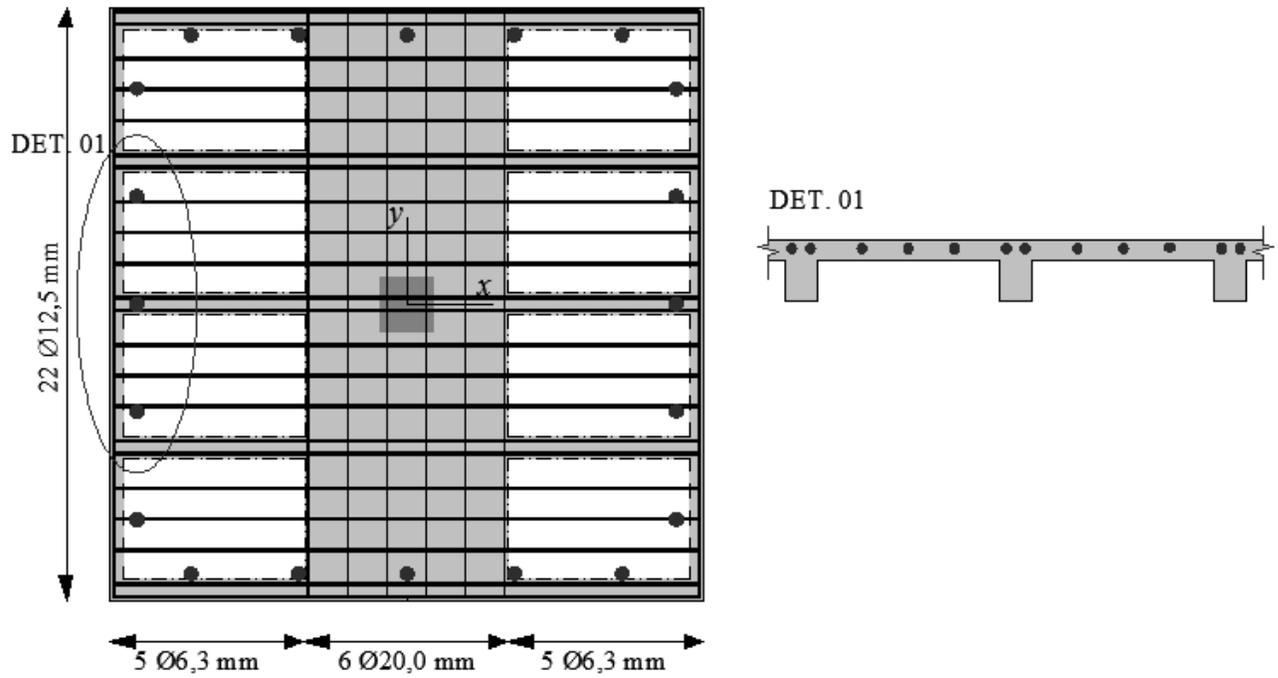


Figura 21 – Disposição da armadura de flexão das lajes



Figura 22 – Armação das lajes estudadas

Tabela 8 - Armaduras longitudinais nas duas direções das lajes

	Ø (principal)	Nº barras	Ø (secundária)	Nº barras
Direção x	12.5	22	--	--
Direção y	20.0	6	6.3	10

3.5. ARMADURA DE CISALHAMENTO

Apenas três das quatro lajes possuíam armadura de cisalhamento nas nervuras. Esta armadura foi do tipo treliçada, denominada TR8644-Belgo, comercializada pela empresa Arcelor Mittal. Esse tipo de armadura de cisalhamento é largamente utilizado em fabricação de vigotas treliçadas e pré-lajes treliçadas. As barras que a compõem são todas do tipo CA-60, sendo formadas por uma barra longitudinal superior ($\phi 6,3\text{mm}$), duas barras longitudinais inferiores ($\phi 6,3\text{mm}$), separadas por uma altura (h) de 80 mm, ligadas por estribos ($\phi 4,2\text{mm}$) em forma sinusoidal, apresentando um ângulo de inclinação de $38,6^\circ$. A Figura 23 mostra uma perspectiva da armadura de cisalhamento.

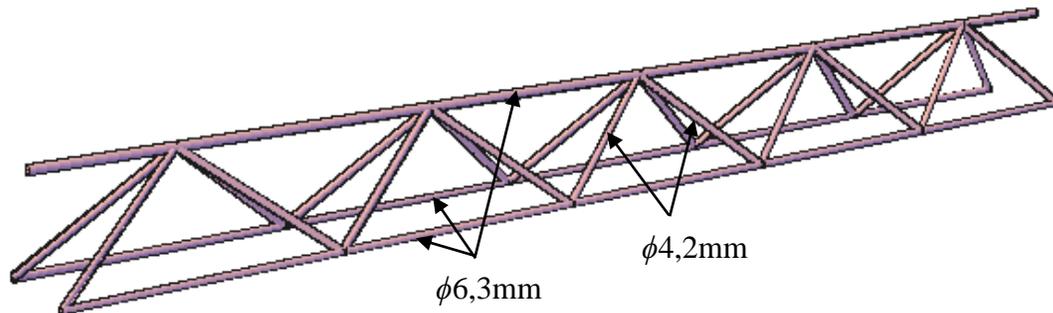


Figura 23 – Armadura de cisalhamento TR8644 utilizada nas nervuras das lajes

Foram também utilizadas armaduras de cisalhamento na viga faixa. Essa armadura foi composta por barras de aço do tipo CA-60, com diâmetro igual a 5,0 mm. Elas foram posicionadas ao longo da viga faixa, com espaçamento de 150 mm entre si. Essa armadura foi utilizada a fim de simular com mais precisão o comportamento da estrutura real, visto que, em uma situação de projeto, essa armadura normalmente é dimensionada para absorver os esforços de cisalhamento. A colocação dessa armadura sem dúvidas contribuiu para aumentar a resistência à punção da ligação viga faixa-pilar e transmitindo ainda mais a responsabilidade para as nervuras. A Figura 24 mostra um esquema do posicionamento dessa armadura na viga faixa.

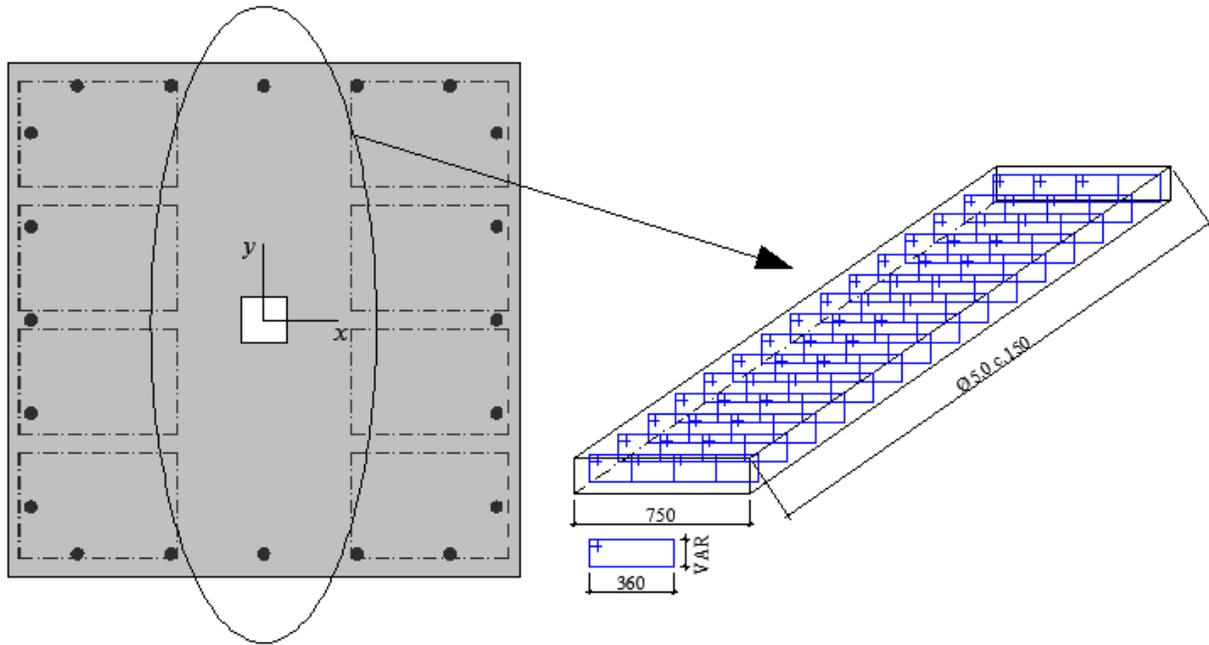
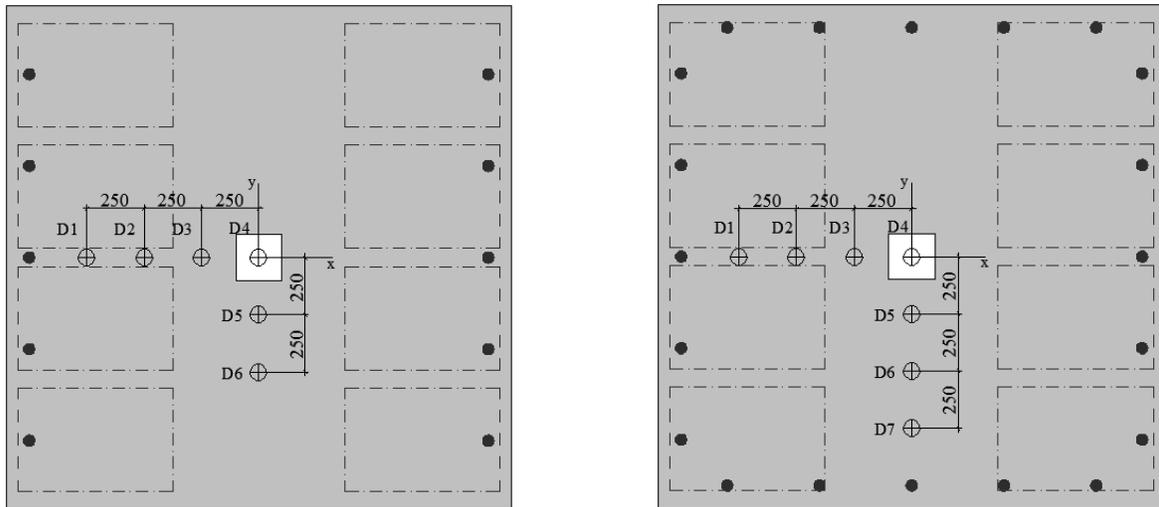


Figura 24 – Armadura de cisalhamento na viga faixa

3.6. INSTRUMENTAÇÃO

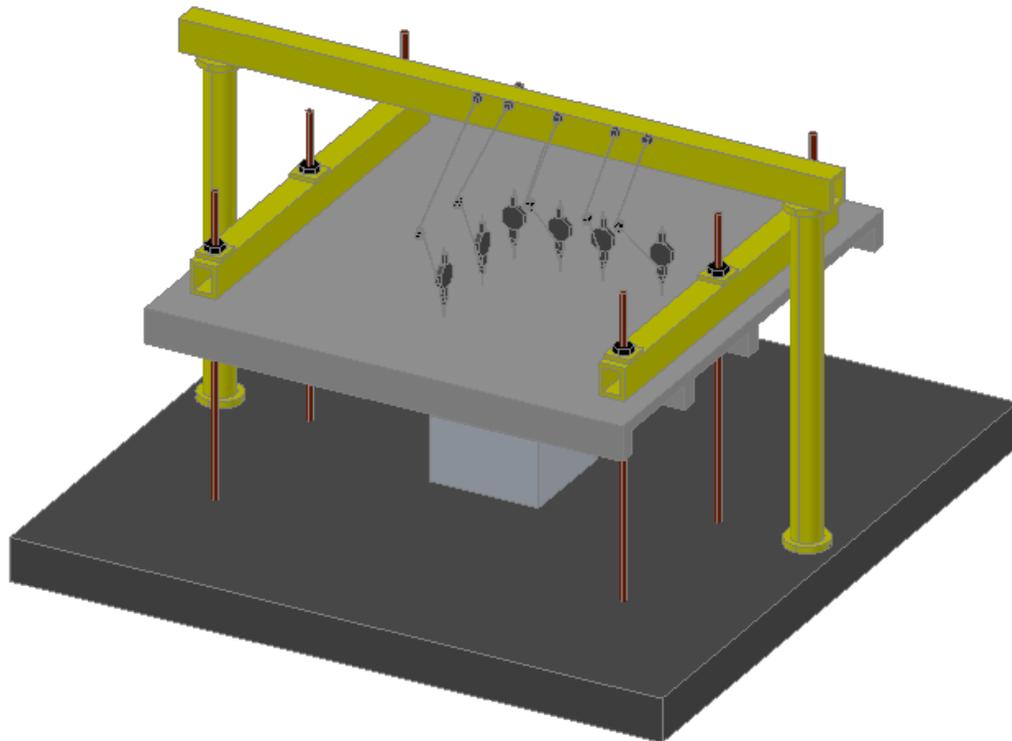
3.6.1. Deslocamentos Verticais

A obtenção dos deslocamentos nas lajes no momento do ensaio foi realizada através de medidores de deslocamentos do tipo defletômetros digitais, posicionados na parte superior das lajes. Foram utilizados no total seis defletômetros nas lajes unidirecionais e sete nas lajes bidirecionais. Nas lajes unidirecionais foram dispostos quatro na direção x e dois na direção y . Nas lajes bidirecionais foram utilizados quatro na direção x e três na direção y . Eles foram espaçados a 250 mm entre si. A diferença na investigação dos pontos foi apenas a utilização de mais um defletômetro nas lajes bidirecionais. A Figura 25 mostra a configuração em planta que foi adotada para a disposição dos defletômetros tanto para as lajes unidirecionais como para as lajes bidirecionais. A Figura 26 e 27 mostram uma perspectiva do arranjo dos defletômetros nas lajes unidirecionais e bidirecionais.



a) Lajes unidirecionais (L1 e L2)

b) Lajes bidirecionais (L3 e L4)

Figura 25 – Posicionamento dos defletômetros digitais nas lajes**Figura 26** – Arranjo dos defletômetros nas lajes unidirecionais

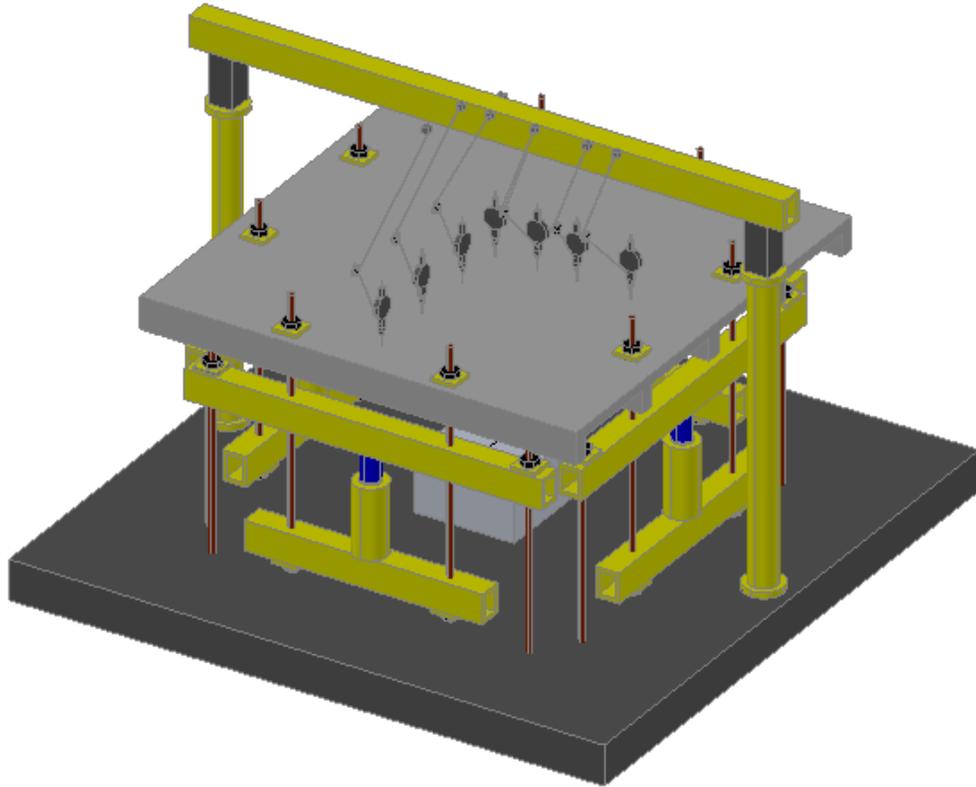


Figura 27 – Arranjo dos defletômetros nas lajes bidirecionais

3.6.2. Deformações na Armadura e no Concreto

As deformações tanto nas armaduras quanto no concreto foram monitoradas através de extensômetros elétricos de resistência. Nas armaduras de flexão foram utilizados extensômetros do tipo PA-06-125AA-120L, F.S fabricados pela EXCEL Sensores Ind. Com. Exp. Ltda. Eles foram posicionados na parte lateral da barra, orientados paralelamente ao eixo longitudinal, a fim de minimizar resultados provenientes dos efeitos de flexão localizada nas barras de aço. A Figura 28 mostra a posição dos defletômetros posicionados nas barras de aço da armadura de flexão.

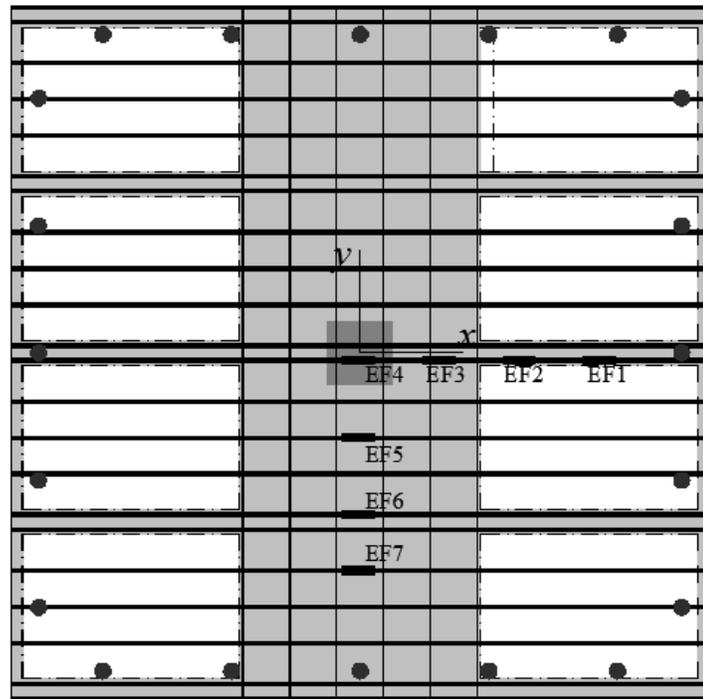


Figura 28 – Posição dos extensômetros na armadura de flexão das lajes

Os extensômetros do concreto foram do tipo PA-06-201BA-120L, F.S, fabricados pela EXCEL Sensores Ind. Com. Exp. Ltda. Estes foram posicionados na superfície comprimida da laje, neste caso, na superfície inferior. Segundo Ferreira (2010), não se sabe ao certo a posição da deformação máxima na superfície comprimida do concreto da região próxima ao pilar. Todavia, normalmente é adotado o valor $d/2$ da face do pilar, valor considerado dentro da região crítica segundo a norma ACI 318 (2008). Os extensômetros do concreto foram fixados tangencialmente ao pilar, sendo um na direção x e outro na direção y , conforme mostra a Figura 29.

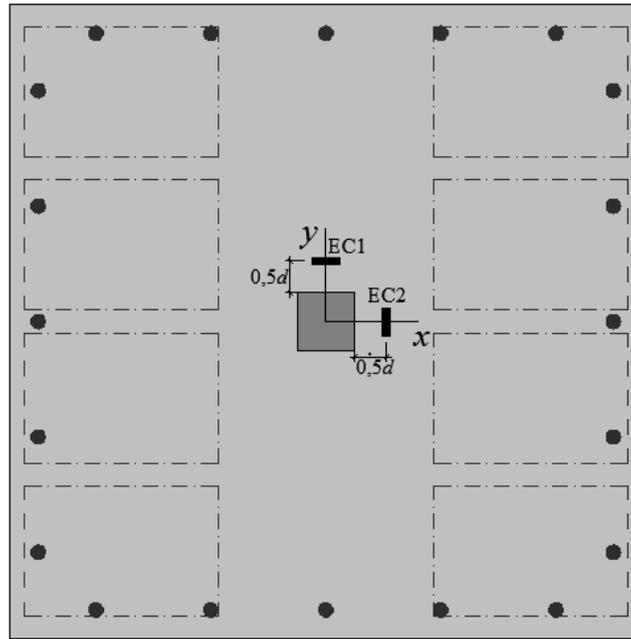


Figura 29 – Posicionamento dos extensômetros do concreto na superfície inferior da laje

3.7. SISTEMA DE ENSAIO

Para a fase de testes das lajes foi adotado um sistema de ensaio com a finalidade de representar de forma mais próxima possível uma situação real. Este sistema foi composto de elementos utilizados em pesquisas no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA. Abaixo estão descritos estes elementos e na Figura 30 é mostrado o esquema do ensaio utilizado nesta pesquisa para as lajes unidirecionais L1 e L2.

- Tirantes – são responsáveis pela transmissão das reações para a laje de reação do Laboratório. Estes tiveram uma das extremidades fixadas na laje de reação e a outra na viga de reação;
- Vigas metálicas de reação – representam as condições de contorno das lajes. Foram posicionadas na borda superior das lajes, fixadas pelos tirantes, no caso das lajes unidirecionais e, para as lajes bidirecionais, foram posicionadas na parte inferior das bordas das lajes;
- Cilindro hidráulico (capacidade de carga de 1000 kN) – responsável pela aplicação do carregamento. Foi posicionado no centro das lajes unidirecionais e nas quatro bordas das lajes bidirecionais;

- Célula de carga (capacidade de carga de 1000 kN) – responsável pela medição do carregamento aplicado, visualizado através de um indicador digital;
- Rótula – posicionada entre a célula e o pilar é responsável por absorver os efeitos de qualquer excentricidade que houver, causada por imperfeição na montagem, os quais tendem a transferir momentos para o pilar;
- Chapa metálica – com dimensões de 200x200x50 mm, representa o pilar na superfície inferior da laje;
- Bomba hidráulica – responsável pelo acionamento do cilindro hidráulico.

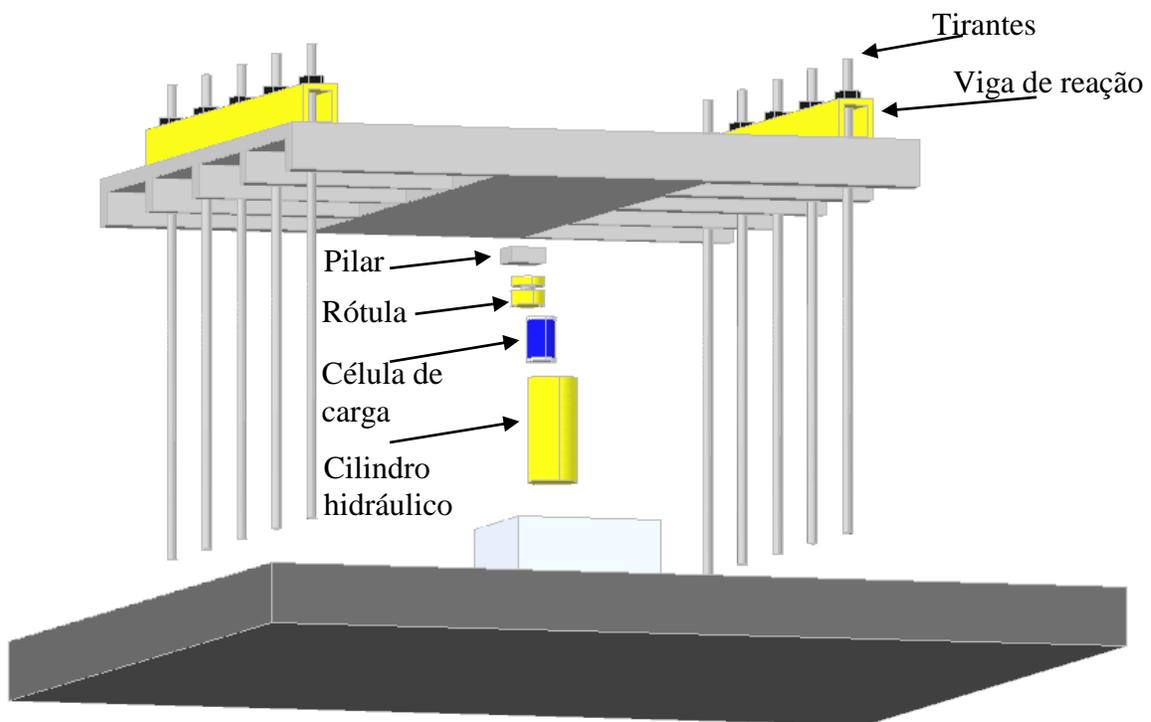


Figura 30 – Sistema de ensaio das lajes unidirecionais (L1 e L2)

Para ensaiar as lajes bidirecionais foi utilizado um sistema de ensaio com maior grau de complexidade. O objetivo da montagem deste ensaio era controlar o carregamento nas duas bordas opostas, aplicando-se o dobro do carregamento na direção da viga faixa (y) em relação à direção das nervuras (x), visto que o momento fletor na direção y correspondia ao dobro do momento na direção x . A Figura 31 mostra uma perspectiva do sistema de ensaio para as lajes bidirecionais L3 e L4. Neste ensaio, foram utilizados quatro cilindros hidráulicos e quatro células de carga posicionados

nas bordas das lajes e, na parte central, foi utilizado um bloco metálico com dimensões em planta de 200x200 mm², simulando o pilar.

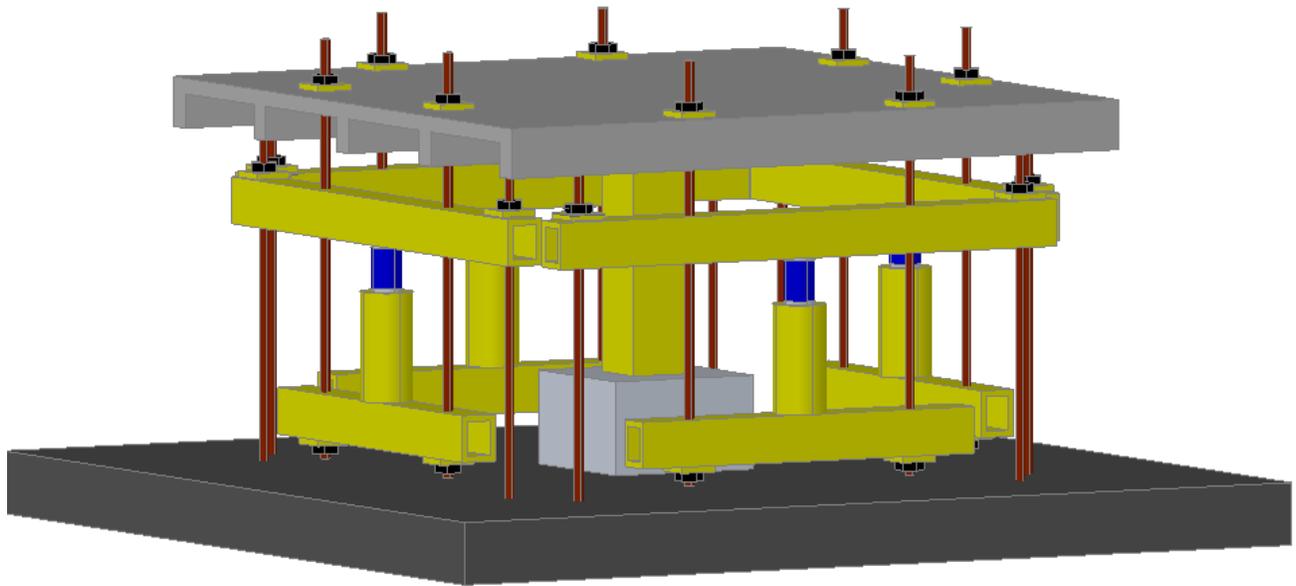


Figura 31 – Sistema de ensaio das lajes bidirecionais (L3 e L4)

A aplicação do carregamento foi realizada em passos de carga definidos em função da carga de ruptura estimada. Foi adotado o valor do passo de carga referente a 10% do valor da carga última teórica. O carregamento era aplicado através dos cilindros hidráulicos, acionados por bombas manuais. A leitura das cargas era observada através dos indicadores digitais das células de carga. A Figura 32 apresenta as bombas de acionamento dos cilindros (a) e os indicadores (b) utilizados para a realização dos ensaios das lajes bidirecionais. Em uma das bombas foi utilizada uma bifurcação, que permitia acionar dois cilindros hidráulicos simultaneamente. Por fim, foi utilizado um equipamento de aquisição de dados, ALMEMO, para armazenar os dados medidos pelos extensômetros, os quais foram ligados ao equipamento por meio de fios conectores.



a) Acionadores manuais de carga



b) Indicadores digitais das células de carga

Figura 32 – Acionadores de carga e indicadores utilizados nas lajes L3 e L4

3.8. MATERIAIS

3.8.1. Concreto

O concreto para a moldagem das quatro lajes foi adquirido em uma central de fornecimento de concreto em Belém. O volume de concreto para o enchimento das lajes e dos corpos de prova foi de aproximadamente $2,5 \text{ m}^3$. Foram moldados 12 corpos de prova de cilíndricos, os quais foram testados nos respectivos dias de ensaio das lajes, ou seja, três corpos de prova para cada laje. Também foram moldados mais 12 corpos de prova para avaliar a resistência à tração do concreto, ensaiados no mesmo período dos citados anteriormente. Além disso, 12 corpos de prova cilíndricos com dimensões $150 \times 300 \text{ mm}$ foram moldados para avaliar o módulo de elasticidade do concreto no dia do ensaio das lajes.

A resistência à compressão do concreto aos 28 dias foi igual a 31 MPa. Na Tabela 9 estão apresentadas as principais características do concreto utilizado neste trabalho. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil, conforme mostra a Figura 33, elaborados de acordo com as normas brasileiras correspondentes aos ensaios de compressão, tração e módulo de elasticidade do concreto.



a) Compressão axial



b) Compressão axial



c) Compressão axial

Figura 33 – Ensaio para determinação das propriedades do concreto**Tabela 9** - Características do concreto das lajes

LAJES	f_{ck} (MPa)	f_{ct} (MPa)	E_c (GPa)
L1	31,0	2,9	31,2
L2			
L3			
L4			

A concretagem das lajes foi realizada atentando para características do concreto no estado fresco como a consistência, trabalhabilidade, adensamento e cura. Aproximadamente 4 horas após o término da concretagem, iniciou-se o processo de cura das lajes. Esse procedimento foi realizado cuidadosamente até o sétimo dia, a fim de não comprometer a qualidade do concreto. A Figura 34 mostra alguns detalhes da concretagem e cura das lajes.



a) Concretagem das lajes

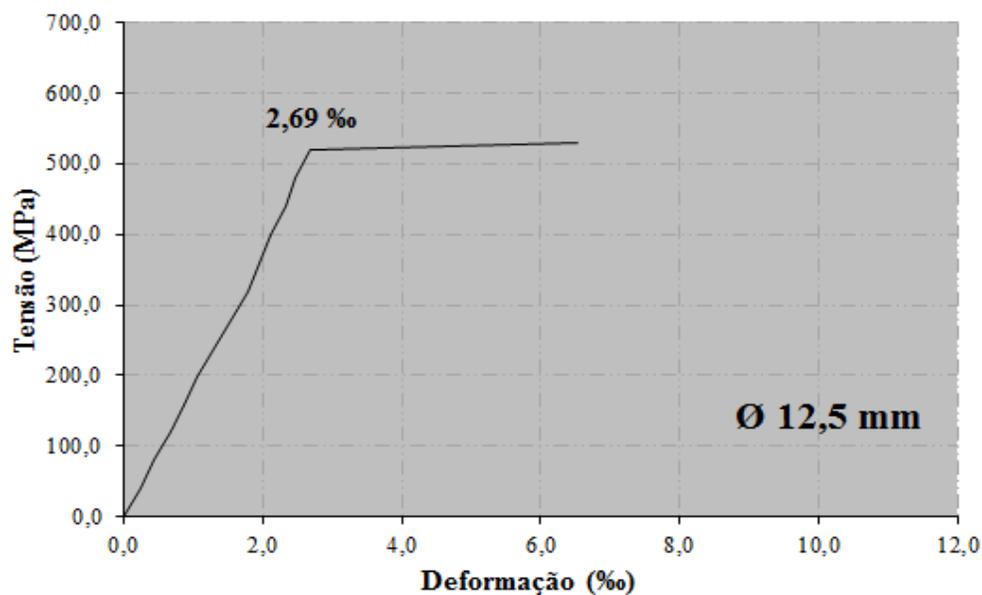


b) Processo de cura das lajes

Figura 34 – Processo de fabricação das lajes e cura do concreto

3.8.2. Aço

As armaduras das lajes foram barras de aço do tipo CA-50 e CA-60, isto é, barra de 12,5 mm de diâmetro para a armadura principal, barra de 6,3 mm de diâmetro para a armadura de distribuição e para os estribos da viga faixa foram utilizadas barras de 5,0mm. Amostras de comprimento correspondente a dez vezes o diâmetro de cada barra foram retiradas, a fim de se obter a tensão de escoamento da armadura utilizada nas lajes. Foi realizado o ensaio de tração nas barras de acordo com a NBR 6152 (ABNT, 1992). Os resultados dos testes estão apresentados tanto nas Figuras 35 e 36 como na Tabela 10.

**Figura 35** – Demonstração gráfica do comportamento da barra de aço de 12,5 mm

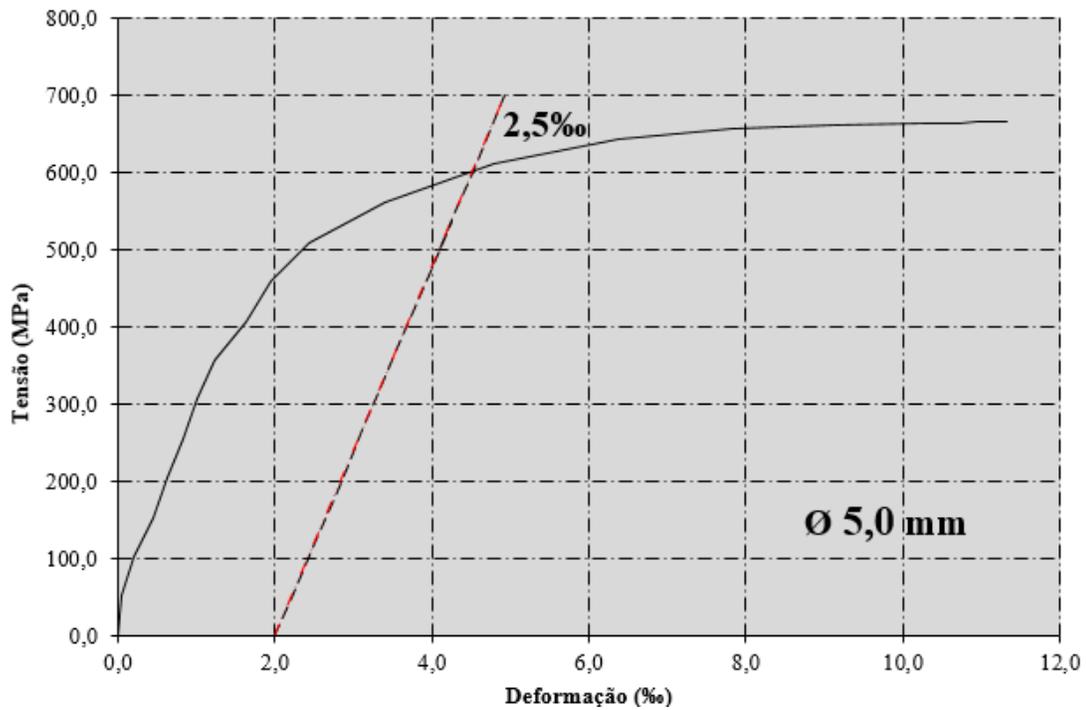


Figura 36 – Demonstração gráfica do comportamento da barra de aço de 5,0 mm

Tabela 10 - Propriedades mecânicas das armaduras utilizadas nas lajes

\varnothing (mm)	f_{ys} (MPa)	ϵ_s (‰)	E_s (GPa)
5,0	600,0	2,5	237,0
12,5	515,3	2,7	191,6

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados obtidos através dos ensaios foram analisados de forma a obter as conclusões mais precisas do comportamento da laje tanto no que diz respeito à segurança estrutural quanto às condições de serviço, ou seja, observando os estados limites último e de serviço, recomendados pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Em seguida, estão apresentados os resultados das lajes seguido de comentários conclusivos, através dos deslocamentos da laje, deformações dos materiais, configuração da fissuração e classificação dos modos de ruptura.

4.1. DESLOCAMENTOS VERTICAIS

Os deslocamentos verticais foram medidos através de defletômetros digitais, posicionados na superfície superior das lajes. A cada passo de carga aplicado na laje, os valores de deslocamentos eram anotados. Eles foram monitorados nas duas direções das lajes, a fim de verificar o comportamento da placa, considerando a influência das variações que foram analisadas neste trabalho. Quando o espécime apresentava sinais de ruptura iminente, os defletômetros eram retirados das lajes, para não os danificar nem atrapalhar na observação visual do modo de ruptura. Em função dos valores anotados, foi possível traçar gráficos *carga x deslocamento*, os quais são mostrados nas Figuras 37 e 38.

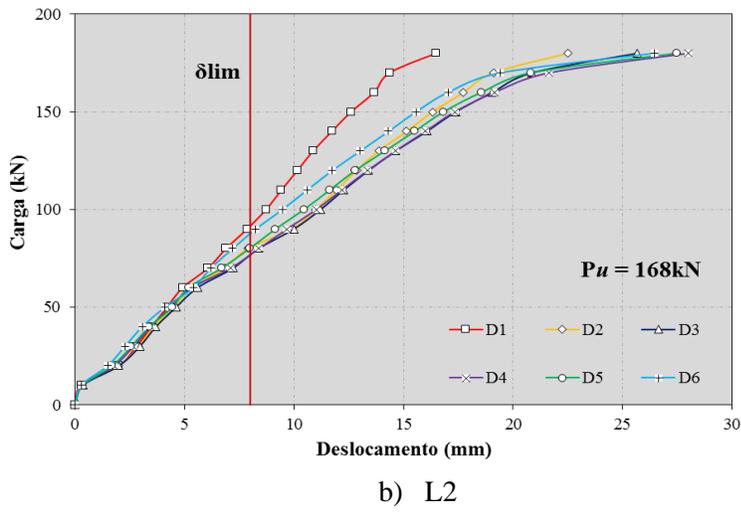
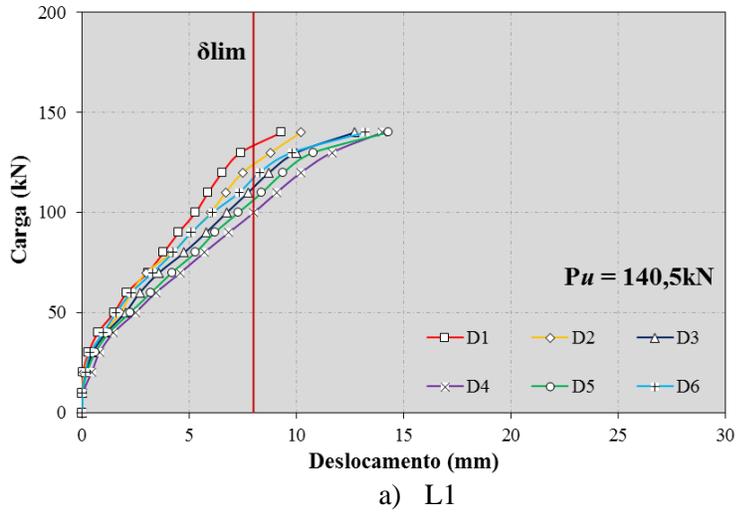


Figura 37 – Deslocamentos das lajes L1 e L2

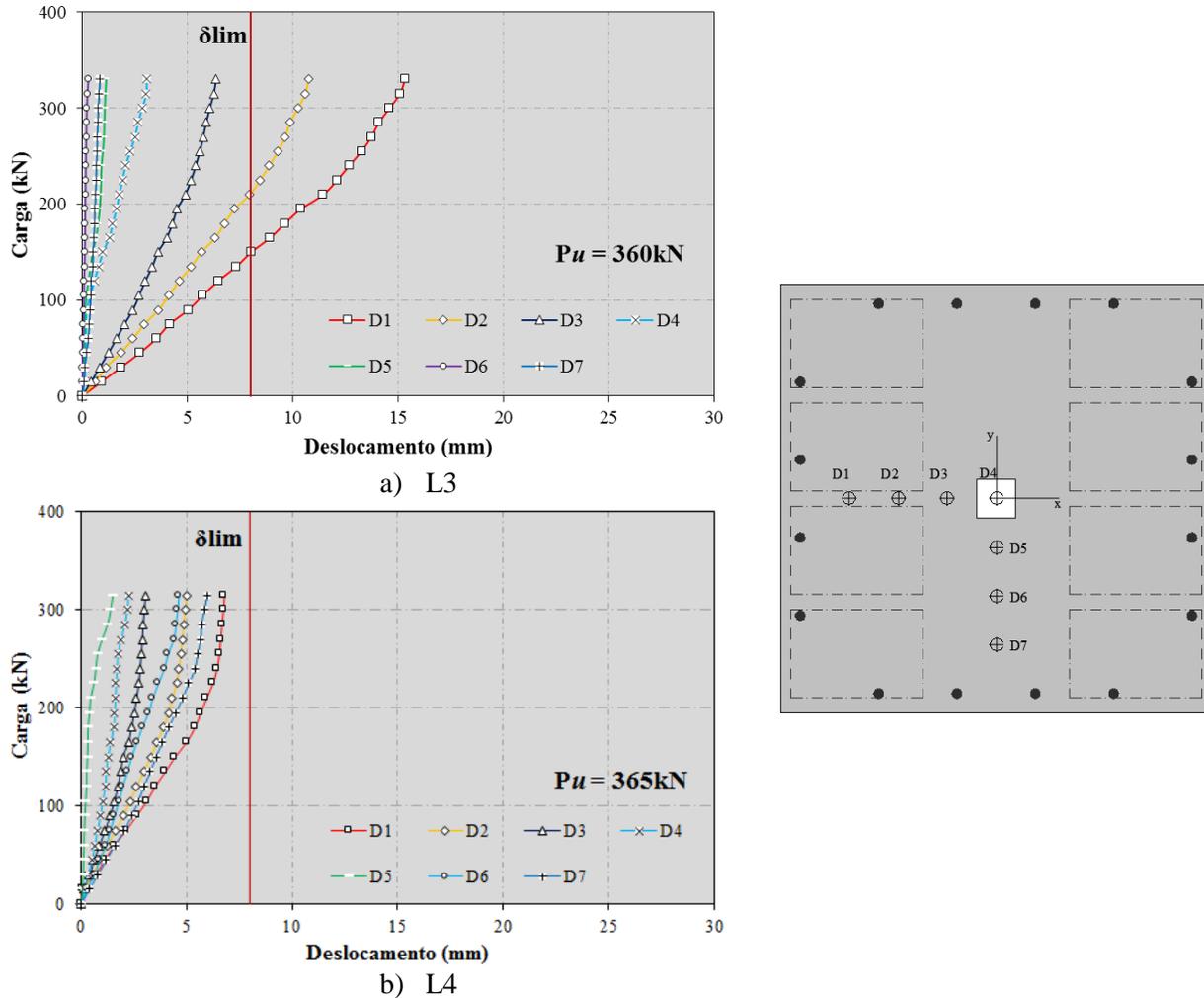


Figura 38 – Deslocamentos das lajes L3 e L4

As lajes nervuradas unidirecionais, apoiadas na direção das nervuras (x), foram monitoradas através de seis medidores de deslocamentos digitais. Esta leitura foi realizada gradualmente à medida que a carga era aplicada na laje, em passos de carga. A diferença entre as lajes L1 e L2 quanto à composição era apenas a presença de armadura de cisalhamento treliçada nas nervuras da laje L2 do tipo TR 8644, enquanto que as nervuras da laje L1 não possuíam armadura de cisalhamento. De acordo com a observação das Figuras 37 e 38, é possível notar que a laje L1 apresentou deslocamentos menores para um mesmo nível de carregamento. Esse comportamento da laje L1 em relação à laje L2 pode ser associado à presença de armadura de cisalhamento nas nervuras da laje L2, o que permitiu um nível maior de deslocamentos antes da ruptura.

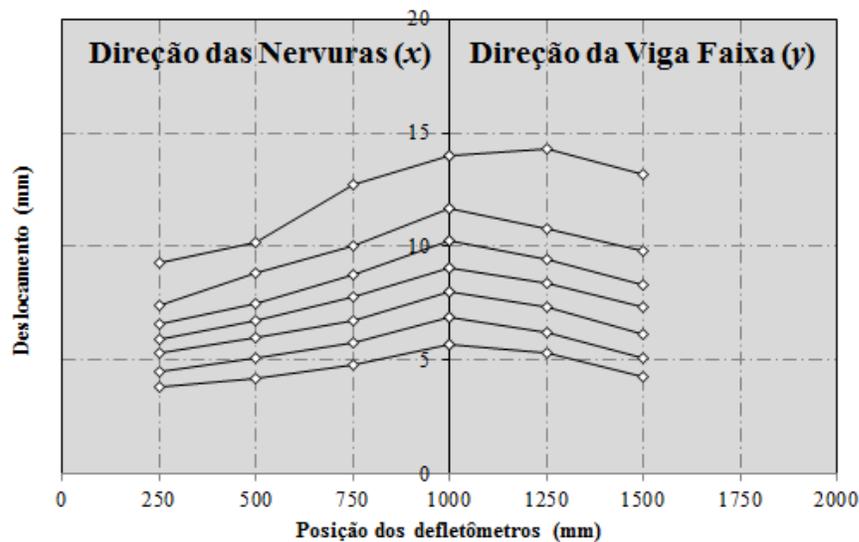
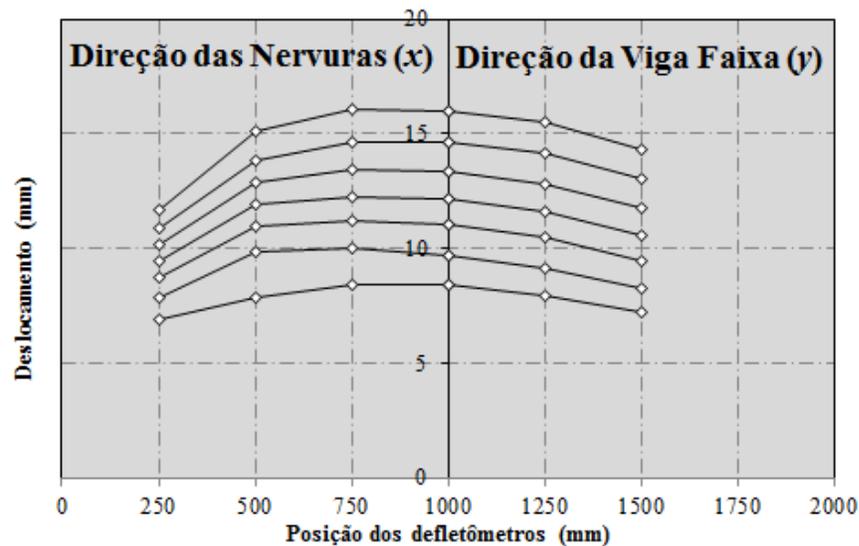
Do ponto de vista do comportamento dos materiais, é possível observar maior ductilidade da laje L2 após a fissuração. No caso da laje L1, os deslocamentos foram menores, pois o concreto das

nervuras, após a fissuração, era responsável pela deformação da laje nessa região e, por ser um material frágil, apresentava pequenas deformações antes da ruptura. A avaliação mais significativa dos deslocamentos entre as lajes unidirecionais está relacionada à presença de armadura de cisalhamento nas nervuras da laje L2. Além da contribuição na resistência última da laje, a armadura de cisalhamento contribuiu para um comportamento mais dúctil da laje L2, sendo extremamente importante a utilização deste tipo de armadura. A treliça TR 8644 também colaborou para um nível de fissuração visualmente mais notável.

Em relação aos deslocamentos das lajes bidirecionais, foi possível notar que a laje com viga faixa de altura menor, neste caso a laje L3, apresentou deslocamentos maiores em relação à laje L4, a qual possuía uma viga faixa com altura 50 mm maior que a L3. Isto é coerente, pois a laje com maior área de concreto da seção transversal apresenta um momento de inércia maior e, conseqüentemente, uma rigidez maior aos deslocamentos. É interessante ressaltar que, no caso das lajes bidirecionais, o carregamento era aplicado nas bordas e não no centro. Portanto, isto explica os maiores deslocamentos registrados pelos defletômetros mais afastados do centro da laje.

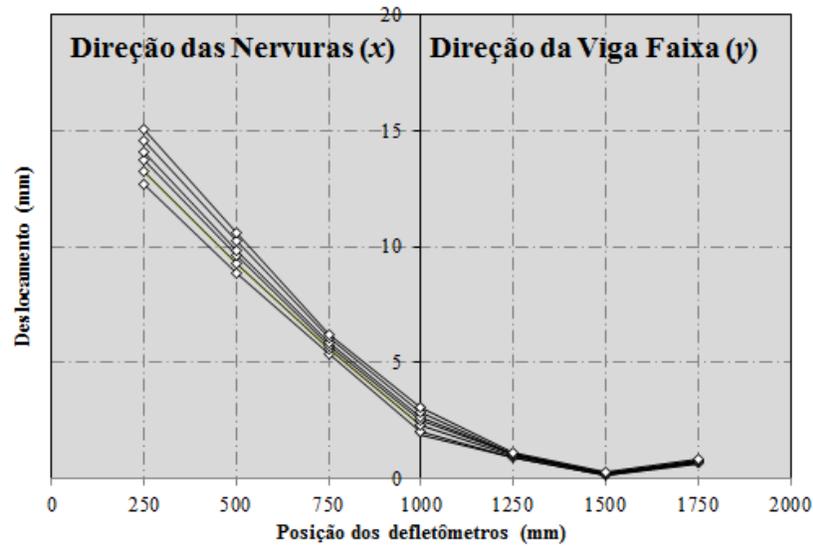
Estes resultados de deslocamentos das lajes comprovam que o aumento da altura da viga faixa em lajes nervuradas de concreto armado durante as definições de projeto evita flechas excessivas. No entanto, este aumento apresenta outras implicações na laje principalmente no que diz respeito à resistência ao cisalhamento das nervuras. Esta última situação, em geral, não é observada em diversos casos de projeto, pois na maioria das vezes o espaçamento entre as nervuras é definido dentro do intervalo recomendado pelas normas de projeto, em que a resistência ao cisalhamento das nervuras como vigas não precisa ser verificada e os critérios de laje podem ser adotados para a região nervurada.

Analisando os deslocamentos com efeito comparativo entre os dois tipos de configuração de apoio foi possível notar que as lajes bidirecionais (L3 e L4) apresentaram menores deslocamentos em relação às lajes unidirecionais (L1 e L2). Isto ocorreu por conta de dois motivos. O primeiro está relacionado à configuração de apoio, no qual as lajes apoiadas nas quatro bordas apresentam maior restrição ao deslocamento. O segundo é justificado pela contribuição da altura da viga faixa, já que nas lajes bidirecionais a altura da viga faixa era maior em relação às lajes unidirecionais. Os deslocamentos ao longo do comprimento das lajes, nas duas direções, para valores de carga próximos da ruptura também foram medidos, conforme mostram as Figuras 39 e 40.

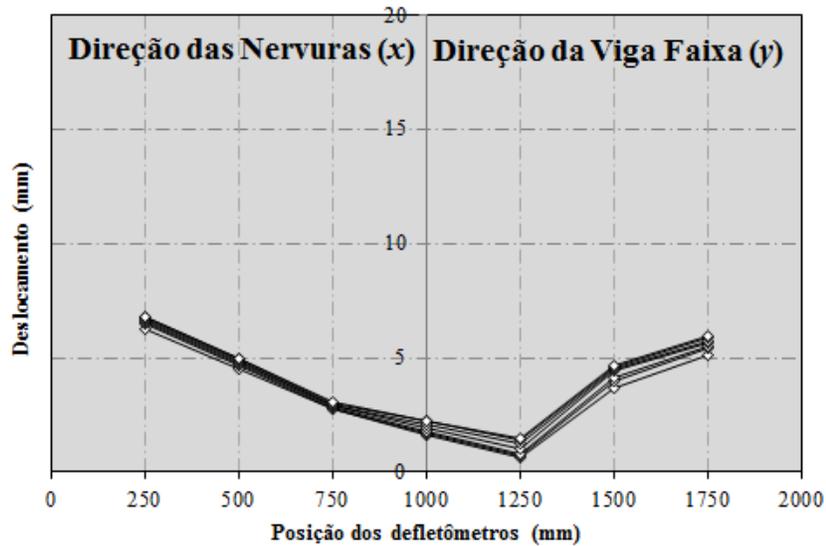
a) Deslocamentos nas direções x e y da laje L1b) Deslocamentos nas direções x e y da laje L2**Figura 39** – Deslocamentos ao longo do comprimento das lajes L1 e L2

De acordo com os resultados dos deslocamentos das lajes unidirecionais pôde-se observar que os deslocamentos foram maiores na região central da laje. Isto porque o carregamento foi aplicado no centro da laje, com as bordas apoiadas. Todas as duas lajes atingiram o limite $l/250$, proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014). A laje L2, por exemplo, que apresentou um comportamento mais dúctil pela presença de armadura de cisalhamento nas nervuras, chegou a dobrar o valor da flecha limite. Sob análise dos requisitos de conforto para uma edificação, pode-se afirmar que esta laje atingiu o Estado Limite de Serviço (ELS), sendo um ponto desfavorável. Do ponto de vista da segurança da edificação, isto é, em relação ao Estado Limite Último (ELU), pode-

se afirmar que a presença de armadura de cisalhamento nas nervuras permitiu observar a formação do mecanismo de ruptura, dando sinais visíveis da iminência do colapso da laje. Portanto, a presença de armadura de cisalhamento se torna indispensável, mesmo não havendo a necessidade de verificação da resistência ao cisalhamento das nervuras como vigas quando o espaçamento entre eixos das nervuras for menor ou igual ao limite estabelecido em normas de projeto.



a) L3



a) L4

Figura 40 – Deslocamentos ao longo do comprimento das lajes L3 e L4

Os resultados de deslocamentos ao longo do comprimento da laje, medidos na direção das nervuras e da viga faixa, conforme mostra a Figura 40, permitiram concluir que, ao longo das

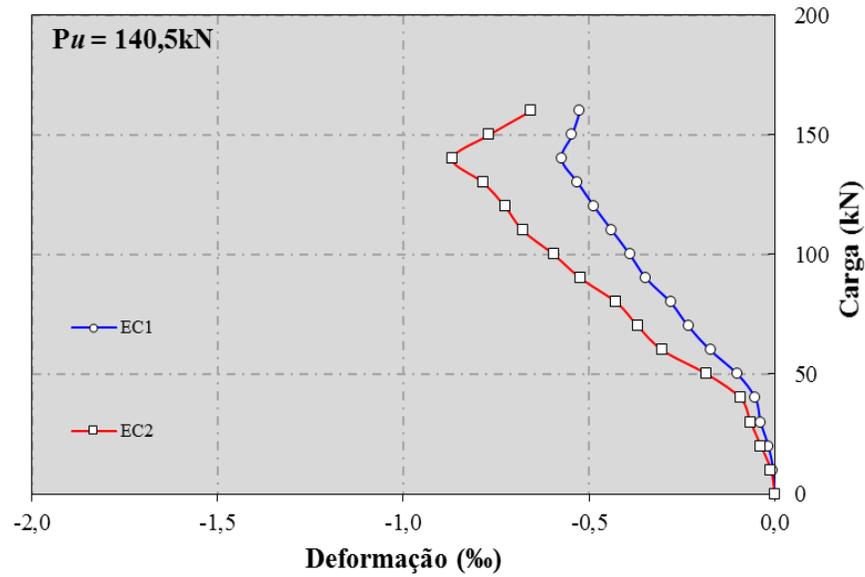
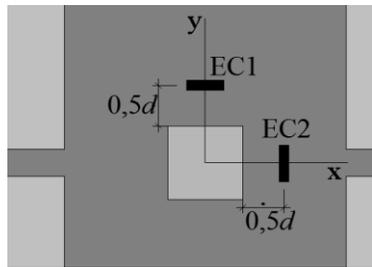
nervuras da laje L3, os deslocamentos apresentaram uma variação significativa do centro ao ponto mais distante analisado, no caso, próximo à borda da laje. Já os deslocamentos da laje L4 na direção das nervuras, não apresentaram grande variação do centro até a borda. Essa diferença de deslocamentos entre as lajes é atribuída à variação da altura da viga faixa, mostrando que a altura desse elemento influencia na rigidez de uma laje nervurada tanto na direção do seu eixo longitudinal (direção y) como na direção transversal (direção x). Nesta direção, somente a laje L3 ultrapassou o limite $l/250$ estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Os deslocamentos na direção da viga faixa (y) para as duas lajes apresentaram valores muito baixos, conforme observado nas Figuras 39 e 40. Em nenhuma das duas lajes o deslocamento, nesta direção, atingiu o limite $l/250$, que corresponde ao limite de flecha para o vão da laje. Estas lajes apresentaram um comportamento bastante rígido, fato que pode ser atribuído à região maciça da laje, no caso a viga faixa, que contribuiu não só na redução dos deslocamentos na própria direção como também na direção transversal, ou seja, na direção das nervuras.

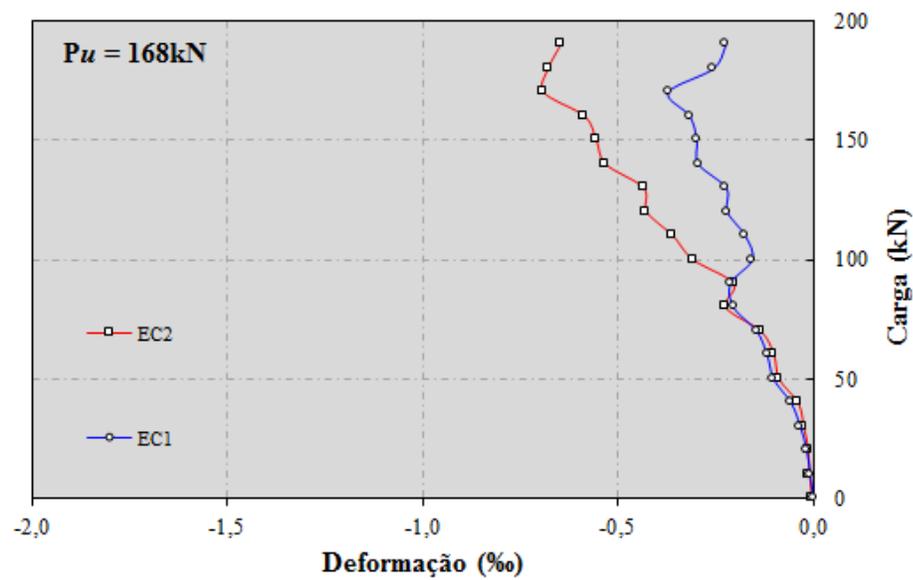
4.2. DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

Como visto anteriormente, as deformações na superfície comprimida do concreto foram investigadas através de extensômetros elétricos de resistência, posicionados na parte inferior das lajes. Como havia muitas incertezas quanto ao modo de ruptura, os extensômetros foram posicionados na região da viga faixa, com o objetivo de avaliar o comportamento da laje próximo à ligação viga faixa-pilar, por conta de uma possível ruptura por punção nesta ligação.

Dois extensômetros foram utilizados, fixados paralelamente às faces do pilar, isto é, um na direção x e outro na direção y em todas as lajes. Desta forma, o interesse era medir as deformações tangenciais ao pilar, pois as deformações radiais, como verificou MORAES NETO (2013), apresentam valores crescentes de encurtamento do concreto à medida que o carregamento aumenta, todavia, para valores próximos à carga de ruptura ocorre um alívio, podendo apresentar até deformações de tração. Nas Figuras 41 e 42 estão apresentados os resultados para as quatro lajes. O extensômetro C1 foi posicionado na direção y da laje e o C2 foi posicionado na direção x , ambos a uma distância $d/2$ da face do pilar.

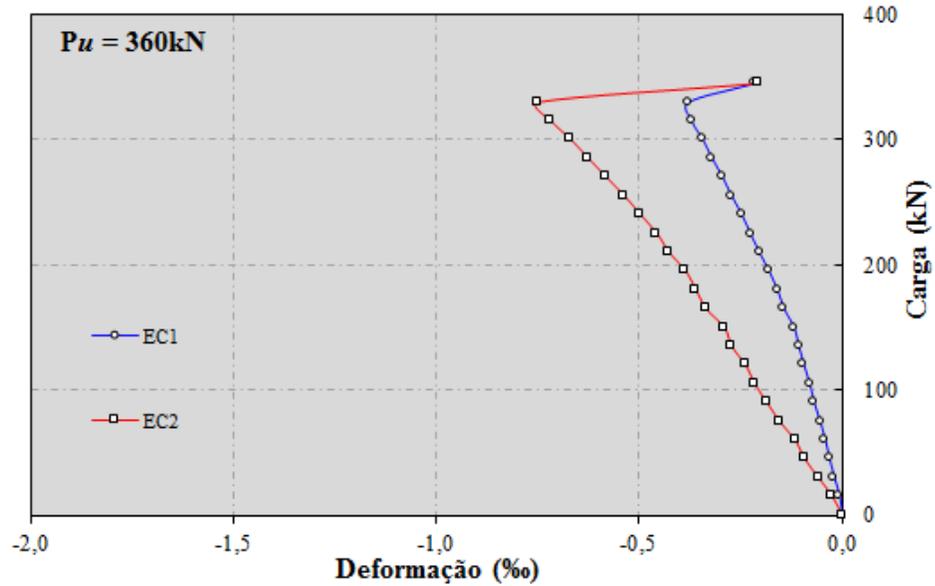
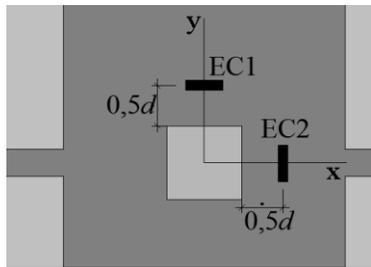


a) L1

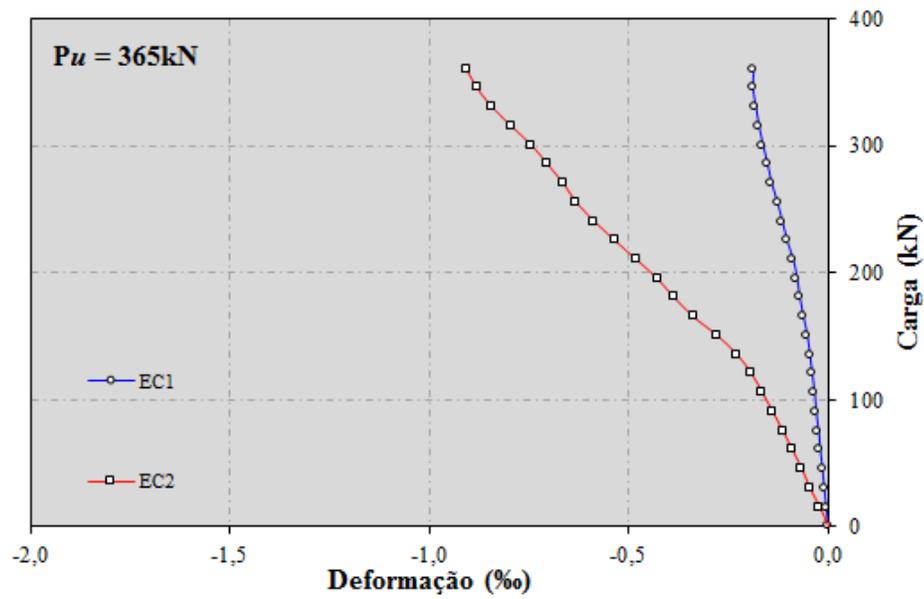


b) L2

Figura 41 – Deformações na superfície do concreto das lajes L1 e L2



a) L3



b) L4

Figura 42 – Deformações na superfície do concreto das lajes L3 e L4

De acordo com os resultados foi possível observar que em nenhum caso as deformações atingiram a deformação limite que caracteriza o esmagamento do concreto. As maiores deformações observadas foram nos extensômetros posicionados na direção x . Elas apresentaram valores próximos a deformação de 1%, mostrando que uma possível ruptura por esmagamento do concreto próxima a essa região era pouco provável de ocorrer. Para as lajes unidirecionais, os resultados mostraram que até o nível de carregamento próximo à fissuração das lajes L1 e L2 (ver Figura 41) as deformações apresentaram valores praticamente iguais e, a partir do início da fissuração, os valores se tornaram distintos, com as maiores deformações observadas na direção x , ou seja, na região mais próxima às nervuras das lajes.

Nota-se que as deformações da laje L1, destacando o extensômetro C2, foram maiores em relação à laje L2. Essa diferença pode ser atribuída à presença de armadura de cisalhamento nas nervuras da laje L2, as quais também atravessavam toda a largura da viga faixa. Com isto, as tensões após a fissuração na laje L2 eram parcialmente absorvidas pela armadura de cisalhamento. Já as tensões da laje L1, eram absorvidas apenas pelo concreto, com uma região comprimida menor por causa da diminuição da profundidade da linha neutra, provocada pelo prosseguimento da fissuração.

Nas lajes bidirecionais (L3 e L4), desde as primeiras etapas de carregamento, as deformações do concreto observadas foram distintas quanto aos valores. É válido ressaltar que, embora o carregamento no eixo y da laje, ou seja na direção da viga faixa, fosse equivalente ao dobro do carregamento na direção x , as tensões no concreto na região tracionada eram absorvidas pela armadura de flexão da viga faixa, evitando que houvesse a diminuição na profundidade da linha neutra nesta direção. Isto mostrou que a ligação da viga faixa com as nervuras (direção x) é uma região crítica de projeto, pois há uma considerável diferença de rigidez entre a área maciça e a região das nervuras, quando as tensões atingem esta última região. As deformações no concreto na região das nervuras não foram investigadas, exatamente porque haviam muitas incertezas em relação ao tipo de ruptura das lajes.

4.3. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO

As deformações nas armaduras de flexão foram medidas através de extensômetros elétricos de resistência, posicionados na altura média da barra, a fim de evitar efeitos de flexão localizada. Conforme foi dito anteriormente, foram utilizados sete extensômetros para medir as deformações de flexão das barras, sendo posicionados quatro deles (EF1, EF2, EF3 e EF4) em uma das barras da

nervura central, ao longo do eixo x e três (EF5, EF6 e EF7) alternadamente nas barras posicionadas na mesa, na direção y . Nas Figuras 43 e 44 são mostradas as deformações de flexão das barras nas lajes unidirecionais e bidirecionais, respectivamente. A armadura de flexão da viga faixa, posicionada na direção y , não foram monitoradas neste trabalho, pois a análise se concentrava no comportamento das nervuras, variando-se a altura da viga faixa.

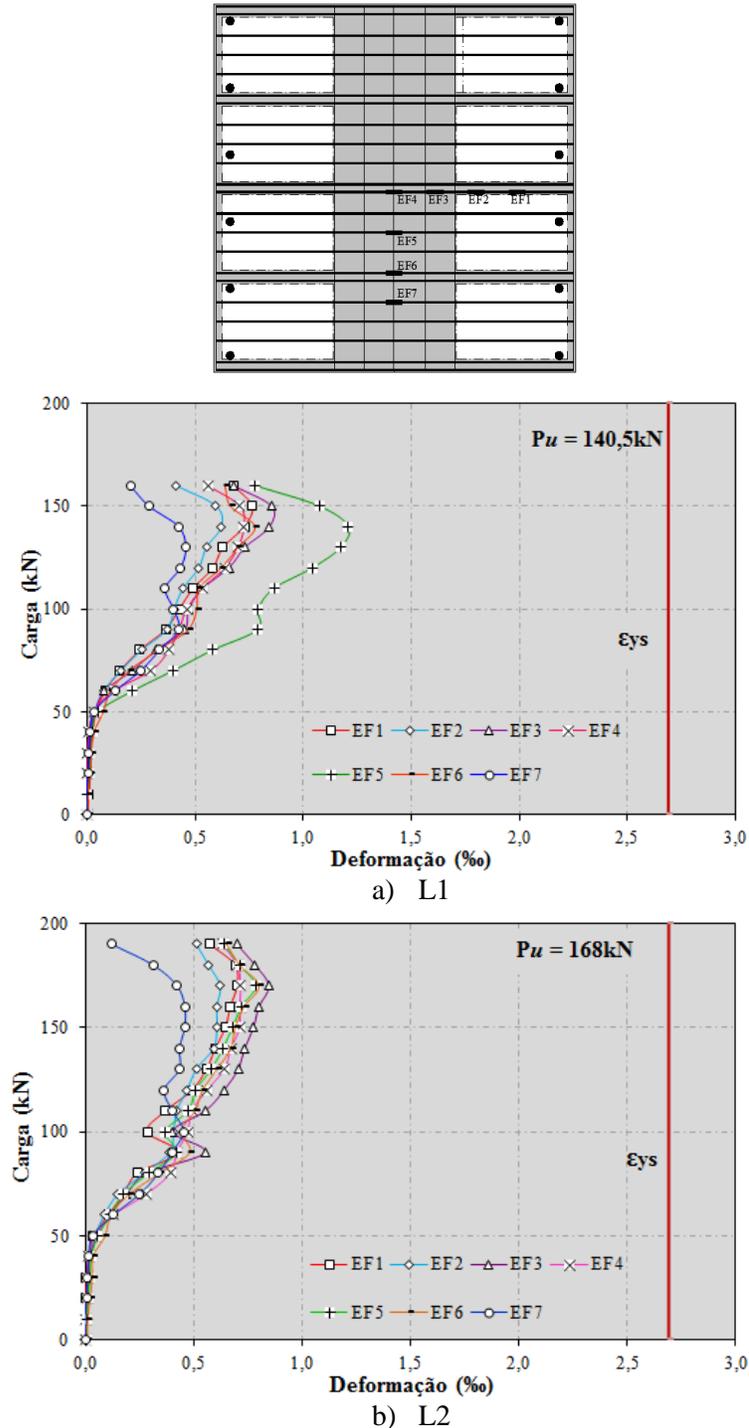
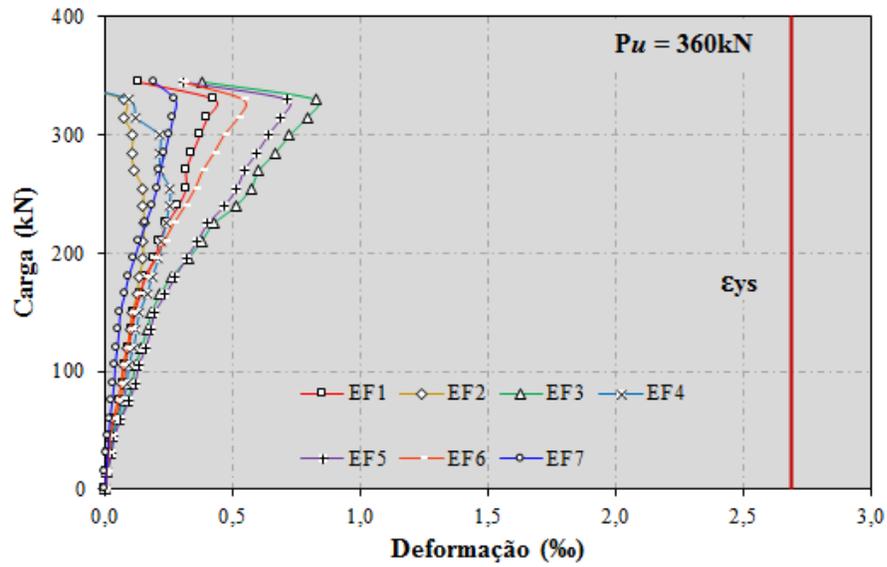
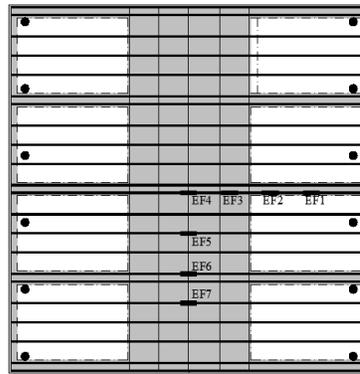
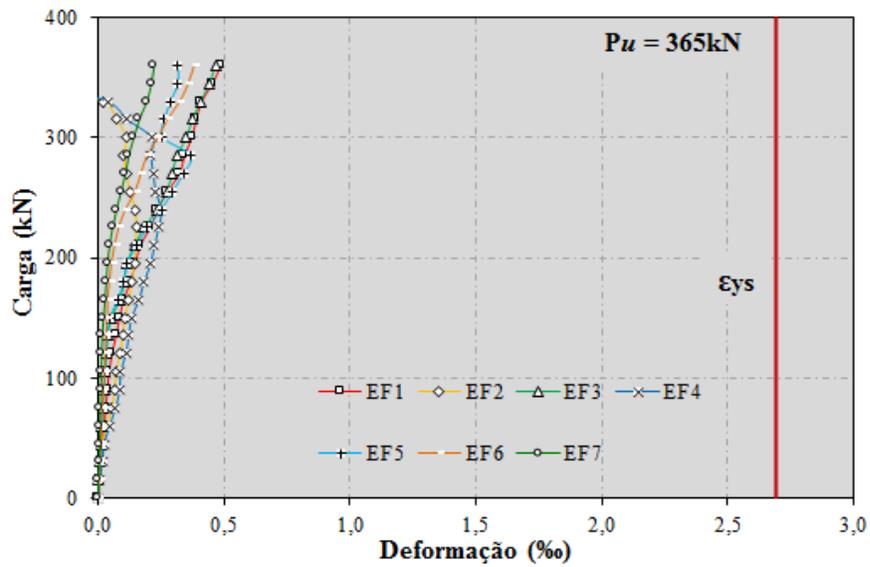


Figura 43 – Deformações nas armaduras de flexão das lajes L1 e L2



a) L3



b) L4

Figura 44 – Deformações nas armaduras de flexão das lajes L3 e L4

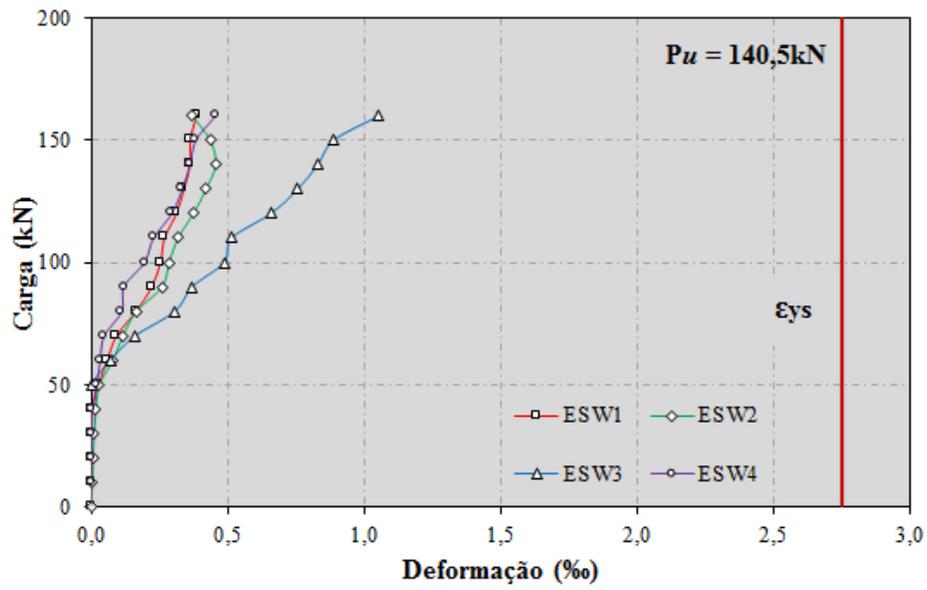
De acordo com os resultados obtidos observou-se que, para todas as lajes, nenhuma das barras atingiu a deformação correspondente à tensão de escoamento para as barras da classe CA-50. As deformações da armadura de flexão das lajes unidirecionais tiveram um comportamento similar, exceto no caso do extensômetro EF5 da laje L1, que apresentou deformação superior a 1‰. Conforme pode ser observado, o extensômetro mais afastado do centro da laje (EF7), apresentou a menor deformação nas duas lajes L1 e L2.

Nas lajes bidirecionais L3 e L4, foi possível notar que as deformações das barras da laje L3 foram superiores às deformações das barras da laje L4. O extensômetro EF3 da laje L3, próximo ao centro da laje, foi o que apresentou maior deformação. Estes resultados mostraram que as deformações por conta da flexão foram menores nas lajes apoiadas nas duas direções.

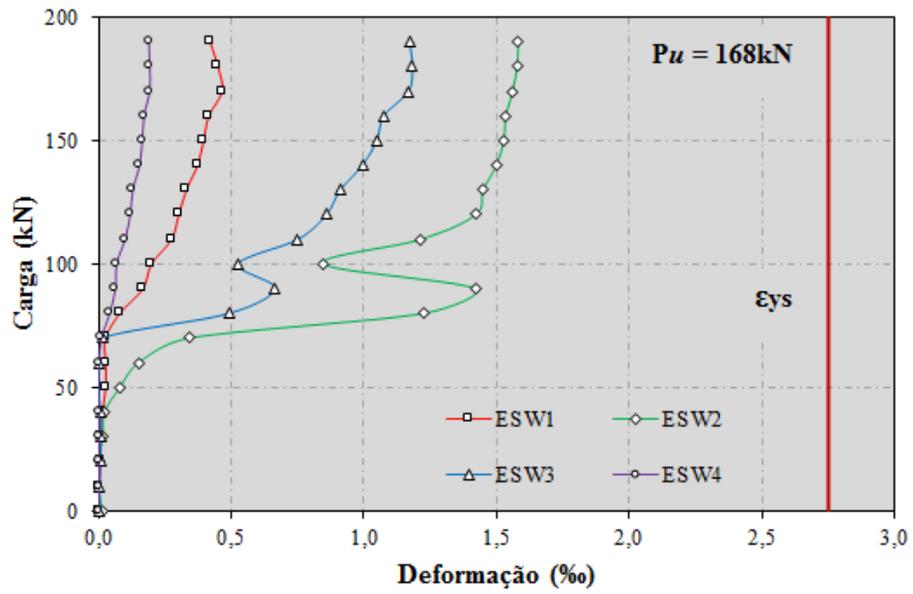
De um modo geral, observa-se que a armadura de flexão não apresentou deformações correspondentes ao escoamento, pois, embora tenha ocorrido fissuração excessiva na região tracionada, principalmente nas lajes L2, L3 e L4, entende-se que as nervuras não apresentaram resistência suficiente às tensões de compressão causadas na região de ligação com a viga faixa. Este fato será mais bem comentado nos tópicos a seguir sobre os modos de ruptura das lajes. Os resultados mostram, portanto, que esta ligação, principalmente quando se aumenta a região maciça em torno do pilar, deve ser tratada com maior rigor.

4.4. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE CISALHAMENTO

As deformações da armadura de cisalhamento também foram investigadas através de extensômetros elétricos de resistência, posicionados nos estribos da viga faixa, os quais foram dimensionados para resistir aos esforços cortantes na viga. Eles foram localizados na altura média da barra de 5,0 mm, sendo posicionado um na direção x , afastado do centro (ESW1), um no eixo de simetria da laje (ESW2) e outros dois na direção y , afastados do centro (ESW3 e ESW4). Os resultados das deformações de cisalhamento são mostrados nas Figuras 45 e 46.

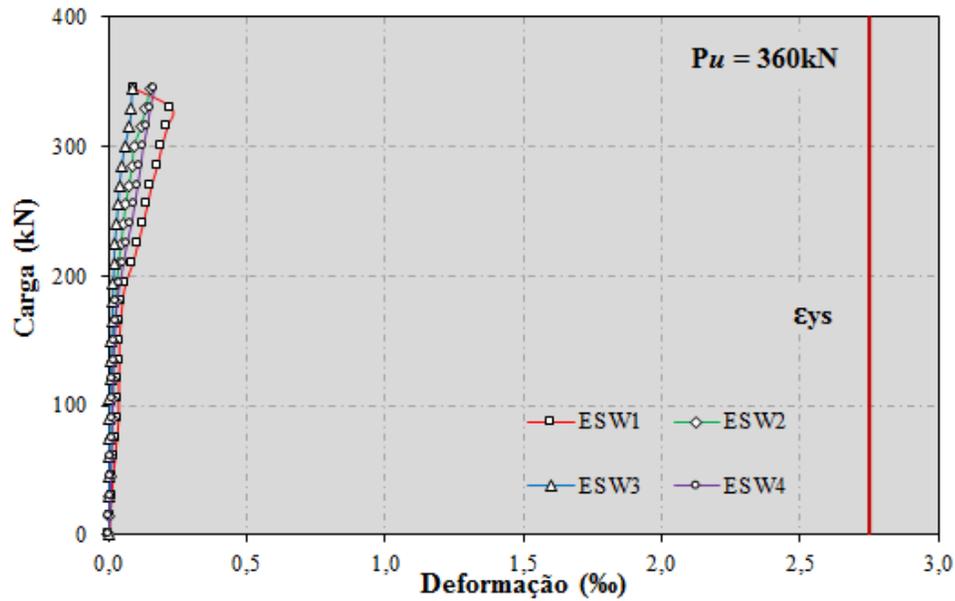


a) L1

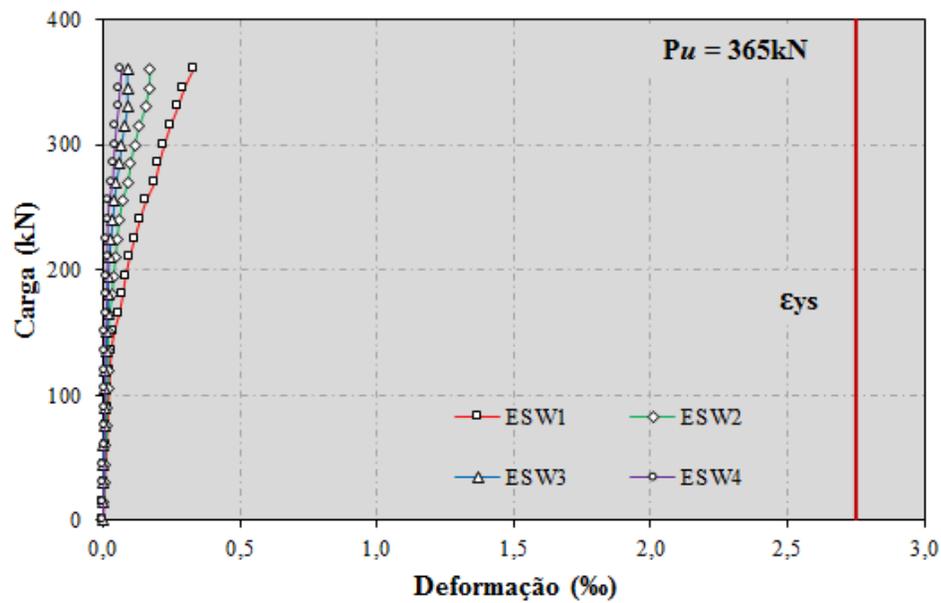


b) L2

Figura 45 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da viga faixa das lajes L1 e L2



a) L3



b) L4

Figura 46 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da viga faixa das lajes L3 e L4

De acordo com as análises é possível notar que a armadura de cisalhamento em todas as lajes não atingiu o escoamento. Nas lajes unidirecionais foram observados os maiores valores das deformações, especialmente a laje L2, a qual apresentou uma resistência maior por conta da presença de armadura de cisalhamento nas nervuras. Isso permitiu uma maior ductilidade e, conseqüentemente, maiores solicitações nas armaduras de cisalhamento da viga faixa.

Nas lajes bidirecionais as deformações das armaduras de cisalhamento foram menores ainda. Os extensômetros seguiram basicamente a mesma configuração de deformação à medida que a carga aumentava. As baixas solicitações nas armaduras de cisalhamento se deve principalmente à grande parcela resistente de concreto na região central e à fragilidade na ligação da viga faixa com as nervuras.

4.5. MAPA DE FISSURAÇÃO

Esta fase do trabalho teve como finalidade avaliar o desenvolvimento das fissuras na superfície tracionada das lajes. A cada passo de carga realizava-se a inspeção visual, a fim de verificar o surgimento de alguma fissura. Quando identificada, uma linha era desenhada ao lado da mesma, desde o início até o final da fissura e, neste ponto final, era anotada a carga responsável pela formação da fissura. Esse processo se estendia até a iminência da ruptura das lajes. Pouco antes do início do ensaio, as fissuras de retração foram levemente marcadas a fim de não confundir com as fissuras oriundas da solicitação durante o ensaio.

Observou-se que o aparecimento das fissuras na superfície superior da laje se deu início na região em torno da área carregada. Na maioria dos casos, as primeiras fissuras surgiram também na ligação da viga faixa com as nervuras, seguindo por todo o comprimento da viga faixa, isto é, de forma tangencial ao carregamento. A partir daí as fissuras se estendiam radialmente pela laje, especialmente na região da mesa das nervuras. Na região central a fissuração apresentou um nível não muito elevado de fissuração, por conta da alta rigidez da viga faixa. A evolução das fissuras pode ser vista nas Figuras 47, 48, 49 e 50.

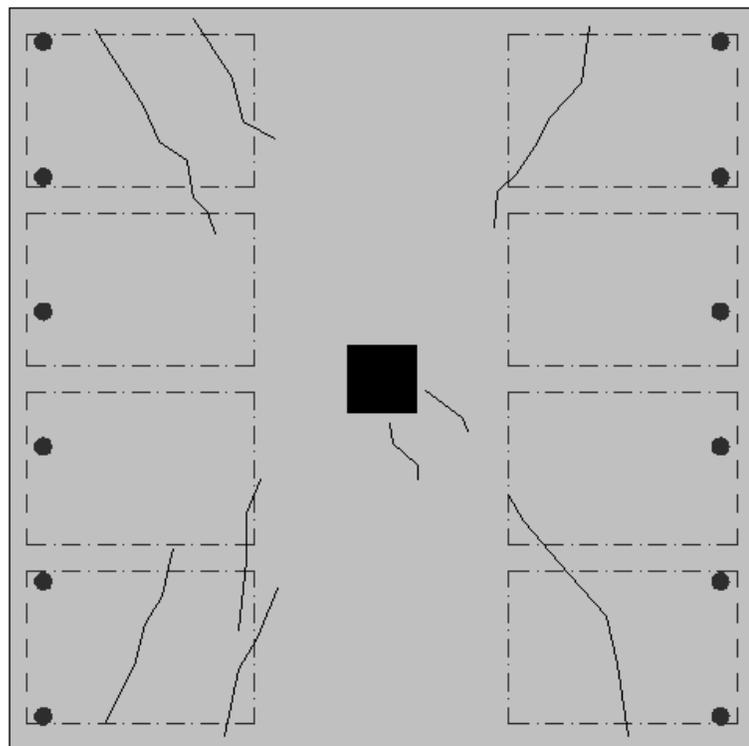
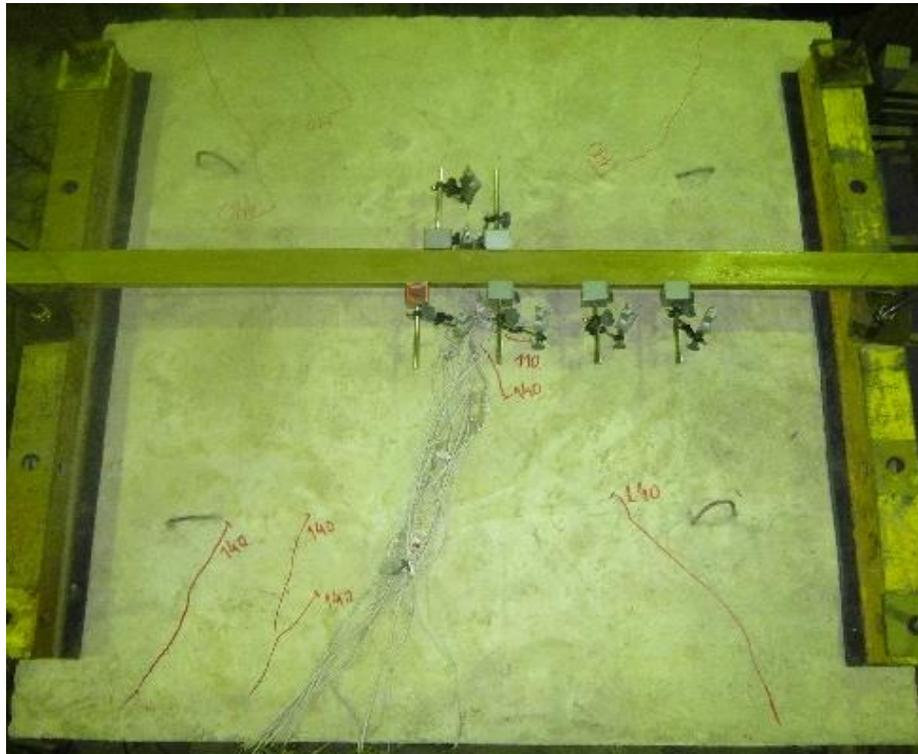


Figura 47 – Mapa de fissuração da laje L1

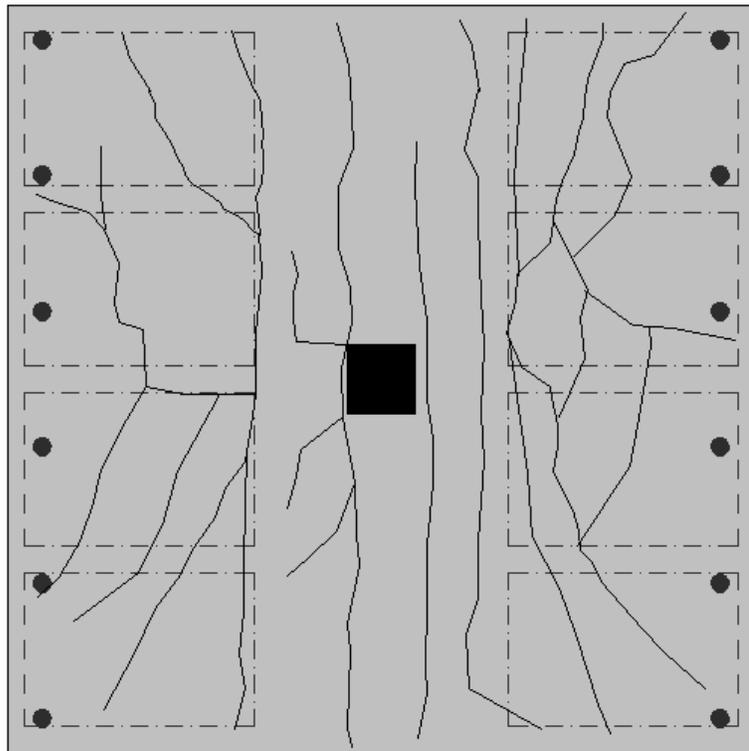


Figura 48 – Mapa de fissuração da laje L2

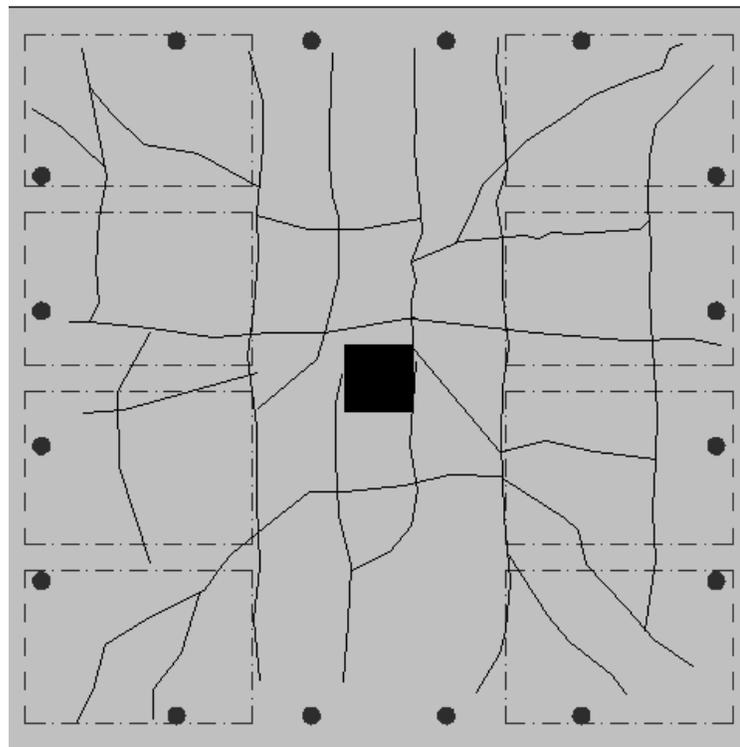


Figura 49 – Mapa de fissuração da laje L3

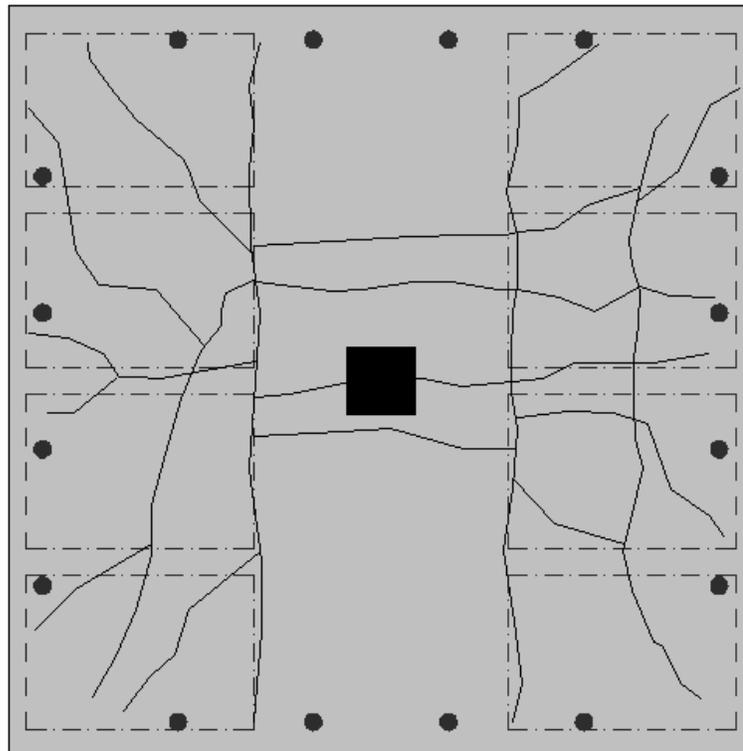
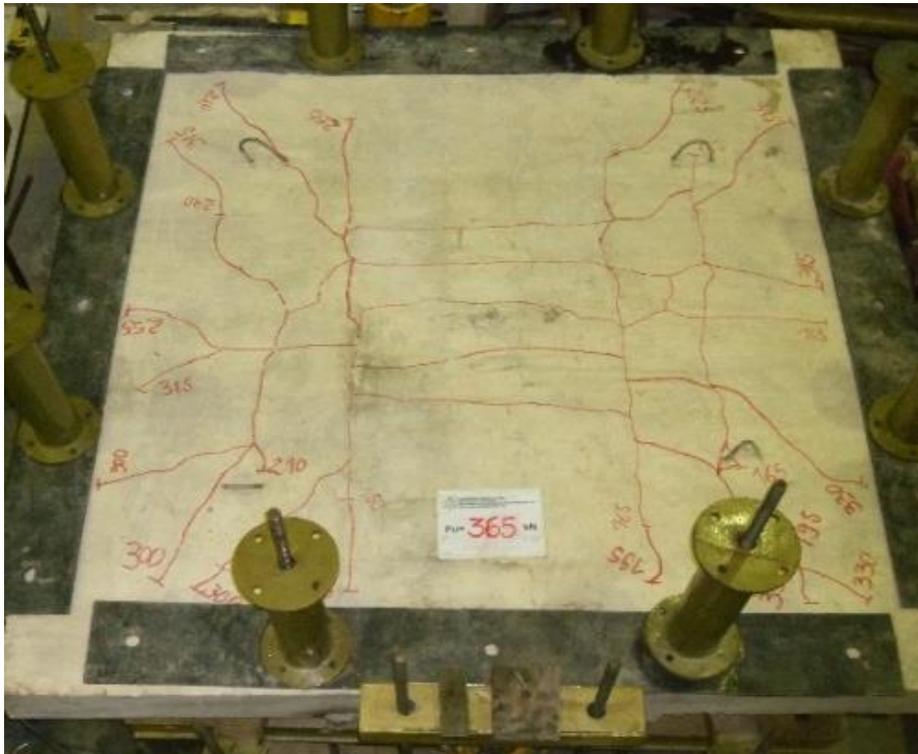


Figura 50 – Mapa de fissuração da laje L4

Através da análise da fissuração nas lajes, nota-se também a formação das linhas de ruptura com segmento das fissuras estendendo-se da ligação da viga faixa com as nervuras até os cantos das lajes. Nas lajes unidirecionais, prevaleceram as fissuras tangenciais, especialmente na laje L2, embora tenham havido fissuras radiais. Isto ocorre porque a tendência da formação da linha de ruptura, neste caso, é maior ao longo da largura da laje (direção y). No caso das lajes bidirecionais, o nível de fissuração fora bem mais intenso, o que já era esperado por conta da maior resistência em função das condições de apoio. Mas, nesse caso, é possível observar com clareza o avanço das linhas de ruptura em diagonais na direção dos cantos, situação comum para uma laje bidirecional com apoios de segundo gênero.

Destas análises tem-se a conclusão de que as condições de contorno influenciam diretamente na formação do mecanismo de colapso de lajes nervuradas com viga faixa. Porém, essas condições de contorno não são sozinhas determinantes no modo de ruptura de lajes nervuradas, como foi observado neste trabalho. Isso depende também de outras variáveis como a resistência das nervuras, da ligação viga faixa-nervuras e da ligação viga faixa-pilar.

Os mapas de fissuração das lajes mostraram que o comportamento quanto à distribuição das fissuras desse tipo de laje se diferencia de outros tipos, pelo menos quando se tem como comparação as lajes lisas, por exemplo. Neste último tipo, as fissuras normalmente são iniciadas em torno do pilar e prosseguem radialmente em torno da área carregada e, após essas fissuras radiais serem estabilizadas, ocorrem as fissuras tangenciais, como observou Oliveira (2007). No caso das lajes nervuradas com vigas faixas, as primeiras fissuras surgiram tangencialmente à área carregada na ligação viga faixa-nervuras e, em seguida, as fissuras radiais se propagaram com maior intensidade pela superfície, como foi o caso das lajes L3 e L4, especialmente.

Essa configuração de fissuração em lajes nervuradas na região superior foi também observada por Ajdukiewicz, A. B. and Kliszczewicz, A. T (1986), em que ocorreu predominantemente um padrão de fissuração tangencial à área carregada, diferentemente do padrão das lajes maciças. Este fato verificado experimentalmente serviu inclusive para os autores adotarem um padrão de linha de ruptura para o cálculo da resistência à flexão de lajes nervuradas diferente daquele adotado para lajes maciças. Ressaltam ainda que as lajes nervuradas apresentam um comportamento mecânico diferente do adotado pelos códigos ACI 318-83 e CP 110-72. A Figura 51 mostra a fissuração na região superior das lajes ensaiadas por Ajdukiewicz, A. B. and Kliszczewicz, A. T (1986).

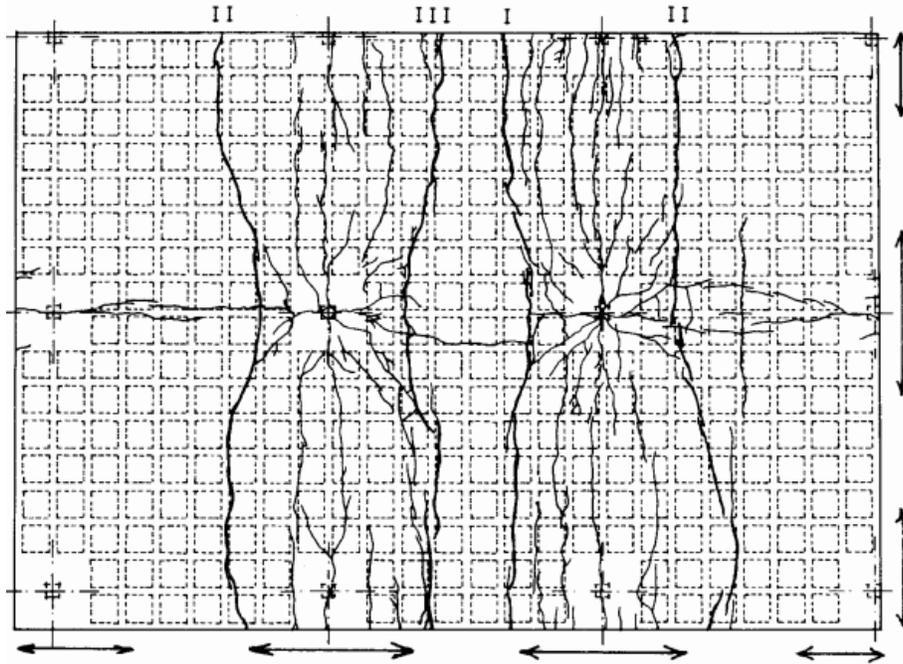


Figura 51 – Padrão de fissuração das lajes ensaiadas por Ajdukiewicz, A. B. and Kliszczewicz, A. T (1986)

4.6. MODO DE RUPTURA DAS LAJES

De acordo com a inspeção visual dos ensaios e análise dos resultados obtidos foi possível classificar os tipos de ruptura das lajes nervuradas. A Tabela 11 apresenta as cargas últimas e os modos de ruptura das lajes. Na idealização do trabalho houveram muitas incertezas a respeito do modo de ruptura que ocorreria durante os ensaios, pois não foram detectados muitos trabalhos na literatura científica que tratassem de lajes nervuradas com vigas faixas. Além disso, os códigos normativos ainda não tratam de forma específica esse tipo de laje. Os possíveis tipos de ruptura esperados eram por flexão, por punção na ligação viga faixa-pilar, por cisalhamento da laje, considerando como laje maciça e, por fim, por cisalhamento das nervuras.

Tabela 11 - Modo de ruptura das lajes

LAJE	d_{nerv} (mm)	f_{ck} (MPa)	<i>Arm. Cisalhamento nervuras</i>	P_u (kN)	Modo de Ruptura Observado
L1	115	31	-	140,5	Cisalhamento nas Nervuras
L2	115	31	TR 8644 (38,6°)	168,0	Cisalhamento nas Nervuras
L3	115	31	TR 8644 (38,6°)	360,0	Cisalhamento nas Nervuras
L4	115	31	TR 8644 (38,6°)	365,0	Cisalhamento nas Nervuras

A partir das análises foi possível afirmar que todas as lajes romperam por cisalhamento nas nervuras. De acordo com a interpretação da fissuração das lajes e dos resultados de deformações dos materiais, pode-se dizer que houve um esmagamento do concreto das nervuras próximo à ligação com a viga faixa. Quando a solicitação proveniente da aplicação da carga ultrapassou a tensão de tração do concreto (transição do estágio I para o estágio II), as armaduras absorveram as tensões de tração, porém, não atingiram o escoamento porque a área de concreto comprimido não apresentara resistência suficiente para equilibrar as forças de compressão nesta região. As Figuras 52 e 53 mostram o local onde ocorreu a ruptura das lajes.



a) Local de ruptura da laje L1



b) Local de ruptura da laje L2

Figura 52 – Modo de ruptura observado das lajes L1 e L2



a) Local de ruptura da laje L3



b) Local de ruptura da laje L4

Figura 53 – Modo de ruptura observado das lajes L3 e L4

Outra observação a respeito da ruptura das lajes ocorrendo por esmagamento do concreto na ligação viga faixa-nervuras é que, como afirma Fadwa *et. al* (2014), a transferência das forças de cisalhamento pelas barras de flexão da viga faixa posicionadas fora da largura do pilar, provocam torção nessa área externa, ou seja, esforços de torção são desenvolvidos por esse mecanismo de transferência de forças de cisalhamento próximo às nervuras, o que causa uma redução na resistência dessa ligação, pois ela não dispõe de armadura de torção capaz de combater essa solicitação. Este fato foi melhor observado nas lajes bidirecionais, em que a carga verificada na direção das nervuras foi menor do que a carga nesta direção para as lajes unidirecionais.

Uma das justificativas para a ruptura localizada na ligação da viga faixa com as nervuras pode ser atribuída também à rotação excessiva das nervuras nesta ligação, causada pelos efeitos da flexão na laje. Isso ocorre pela diferença de rigidez existente entre a região maciça e as nervuras. Na região central, a viga faixa apresenta alta rigidez à rotação principalmente por conta da alta parcela contribuinte de concreto, porém, na região nervurada da laje, essa rigidez é consideravelmente menor, apresentando uma rotação superior à da viga faixa, provocando maiores deformações e, conseqüentemente, aumento no ângulo entre as seções, causando dessa forma um esmagamento das fibras que tendem a se aproximar na região comprimida das nervuras.

Os modos de ruptura e os valores de carga última das lajes observadas neste trabalho, permitem avaliar que a resistência das lajes nervuradas com viga faixa, tanto apoiadas em uma como em duas direções, é governada pela resistência ao cisalhamento das nervuras. Isso pode ser discorrido, pois todas as lajes romperam por cisalhamento nas nervuras e, além disso, mesmo quando houve o aumento da altura da viga faixa, o valor da carga de ruptura foi praticamente igual, como pode ser observado para as lajes L3 e L4, especialmente, demonstrando que o acréscimo da altura da viga faixa na região central pode tanto reduzir as flechas como aumentar a resistência à punção, porém não garante um desempenho satisfatório no comportamento das nervuras.

5. ANÁLISE COMPUTACIONAL

A modelagem computacional, de um modo geral, tem trazido muitos benefícios à análise do comportamento das estruturas. Através dela é possível observar a estrutura em conjunto, analisar os pontos mais críticos no dimensionamento e até prever o desempenho da estrutura quando em serviço. Para Lima Neto (2013), a modelagem computacional é uma das formas de complementação dos resultados obtidos experimentalmente, pois a realização de ensaios em modelos experimentais fornece resultados apenas nos pontos em que houve instrumentação através de sensores para deformações e deslocamentos.

A fim de compreender o comportamento das lajes e verificar a distribuição dos esforços foram elaborados modelos computacionais, baseados no método dos elementos finitos. Neste capítulo, portanto, são apresentados os resultados de uma análise linear, relacionando-os com os resultados experimentais observados durante os ensaios. Esta análise proporcionou condições para explicar com maior clareza o comportamento das lajes nervuradas com viga faixa de altura variável. Os modelos foram construídos no programa *SAP2000 v.14.0.0 Advanced*.

5.1. DESCRIÇÃO DOS MODELOS

Para realizar a análise foram modeladas três lajes nervuradas, variando-se apenas a altura da viga faixa. As dimensões em planta foram de (2200x2200) mm, as nervuras com altura total igual a 150mm, a mesa com espessura igual a 50mm e a viga faixa variando em 150mm, 200mm e 250mm. Como as lajes L1 e L2 eram compostas por uma viga faixa de mesma altura, foi construído apenas um modelo, e mais dois considerando as lajes L3 e L4.

Com base nos resultados experimentais, algumas definições foram tomadas a respeito da construção dos modelos. Optou-se por modelar tanto a mesa quanto as nervuras como elementos de superfície do tipo *shell*. A viga faixa e o pilar foram modelados como elemento *solid*. Como o principal objetivo era analisar a distribuição dos esforços e detectar os pontos onde havia a maior concentração deles de forma que permitisse relacionar com o mecanismo de ruptura desenvolvido, foi aplicada uma carga unitária nos pontos de carregamento conforme o ensaio experimental. O refinamento da malha foi definido de acordo com as dimensões limites dos elementos, sempre com o objetivo de não prejudicar a resposta dos modelos. As Figuras 54, 55 e 56 mostram os modelos das lajes unidirecionais e bidirecionais construídos.

As condições de contorno das lajes modeladas computacionalmente foram consideradas buscando-se representar de forma mais precisa as condições adotadas durante a fase de testes em laboratório, tanto para as lajes unidirecionais (L1 e L2) como para as lajes bidirecionais (L3 e L4). Para isto, foram utilizados apoios de 1º gênero nos pilares, restringindo apenas o movimento na direção do eixo z , desconsiderando os efeitos de excentricidade que pudesse provocar momentos desbalanceados e deslocamentos laterais. Nas bordas das lajes foram aplicadas as cargas unitárias na direção z exatamente onde os tirantes estavam fixados, simulando de forma mais próxima os pontos de carregamento durante os ensaios experimentais. As propriedades mecânicas dos materiais utilizadas nos modelos computacionais foram àquelas obtidas experimentalmente, sendo f_{ck} igual a 30 MPa, E_c igual a 31,2 GPa e f_{ct} igual a 2,9 MPa e ν (coeficiente de Poisson) igual a 0,2.

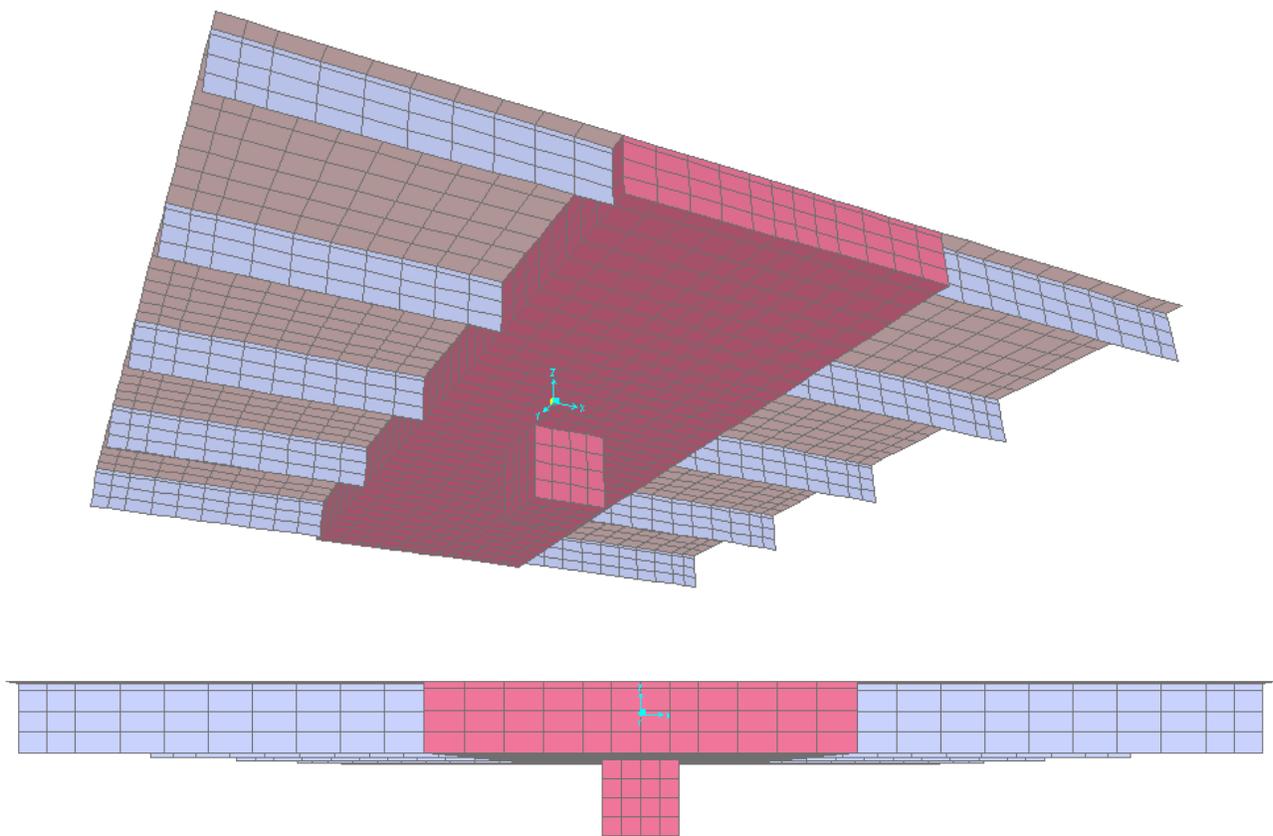


Figura 54 – Modelo da laje com viga faixa igual a 150 mm

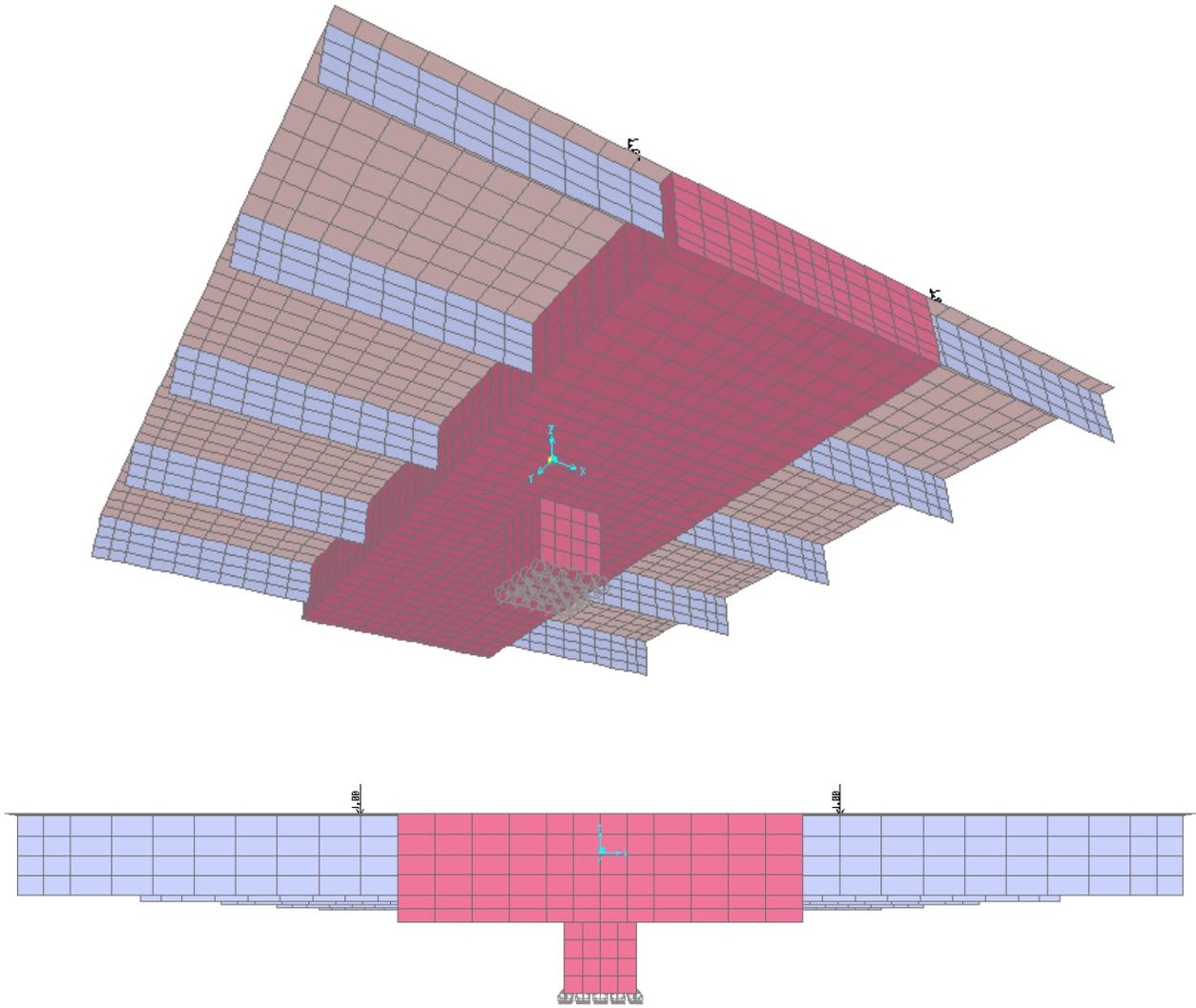


Figura 55 – Modelo da laje com viga faixa igual a 200 mm

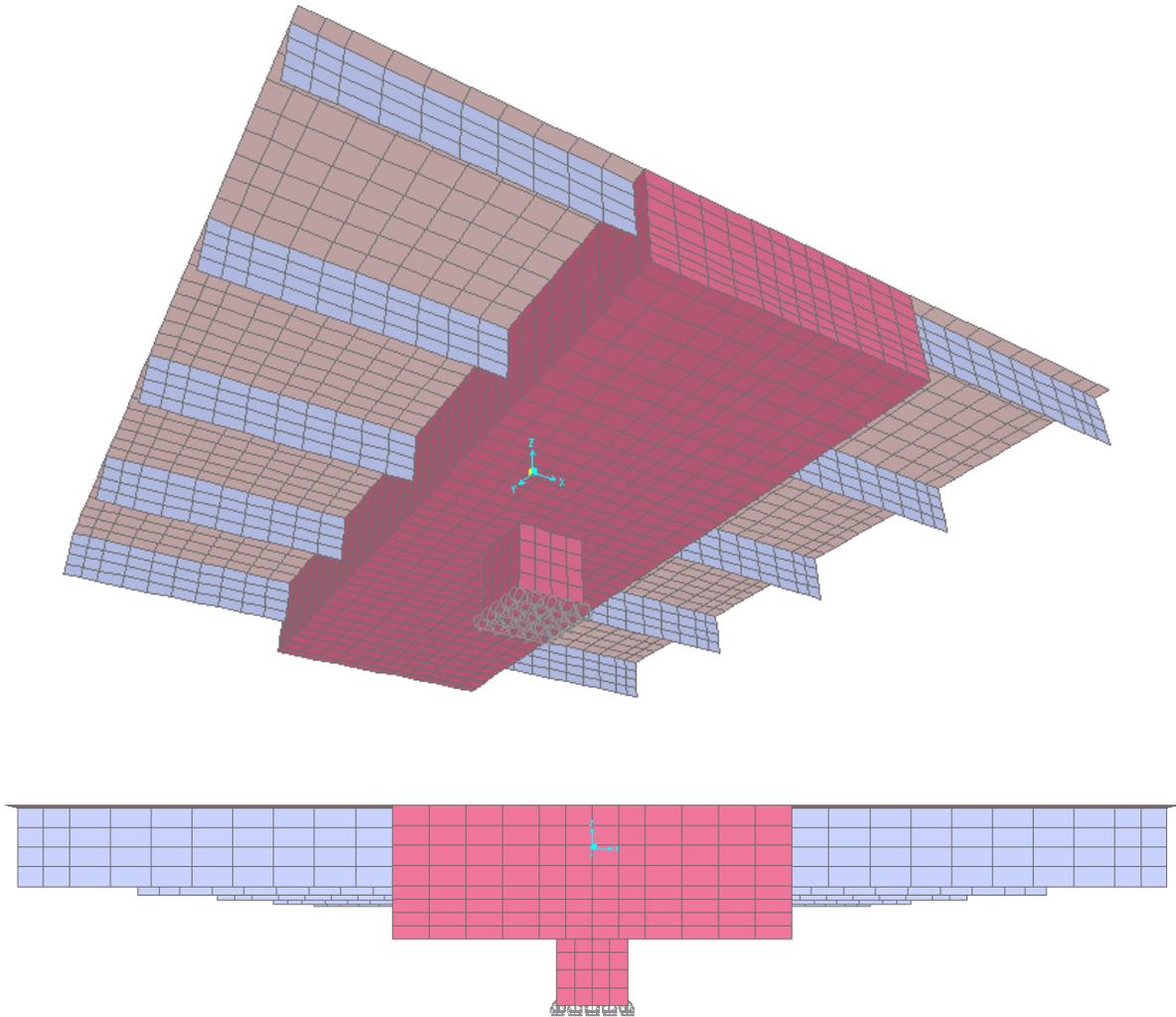


Figura 56 – Modelo da laje com viga faixa igual a 250 mm

5.2. RESULTADOS DA ANÁLISE

A avaliação dos resultados dos modelos computacionais concentrou-se em comentar a distribuição dos esforços solicitantes nas ligações da viga faixa com o pilar e com as nervuras. As Figuras 57, 58 e 59 mostram a distribuição das tensões normais nas nervuras, no pilar e na viga faixa das lajes modeladas. Por causa do modo de ruptura observado durante os ensaios, decidiu-se avaliar com maior afinco as tensões normais principalmente na ligação viga faixa-nervuras.

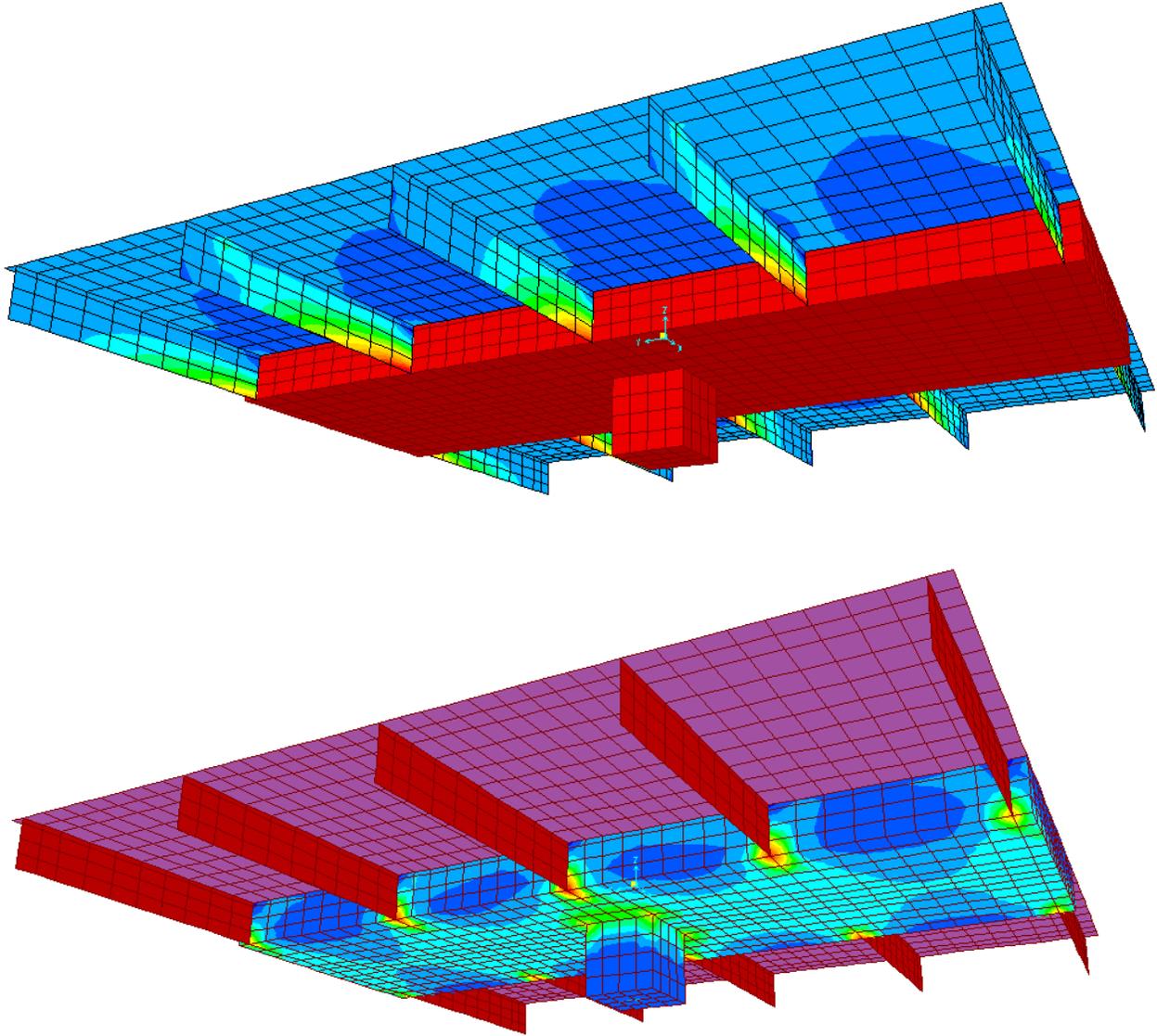


Figura 57 – Distribuição dos esforços nas lajes unidirecionais L1 e L2 com viga faixa de altura igual a 150 mm

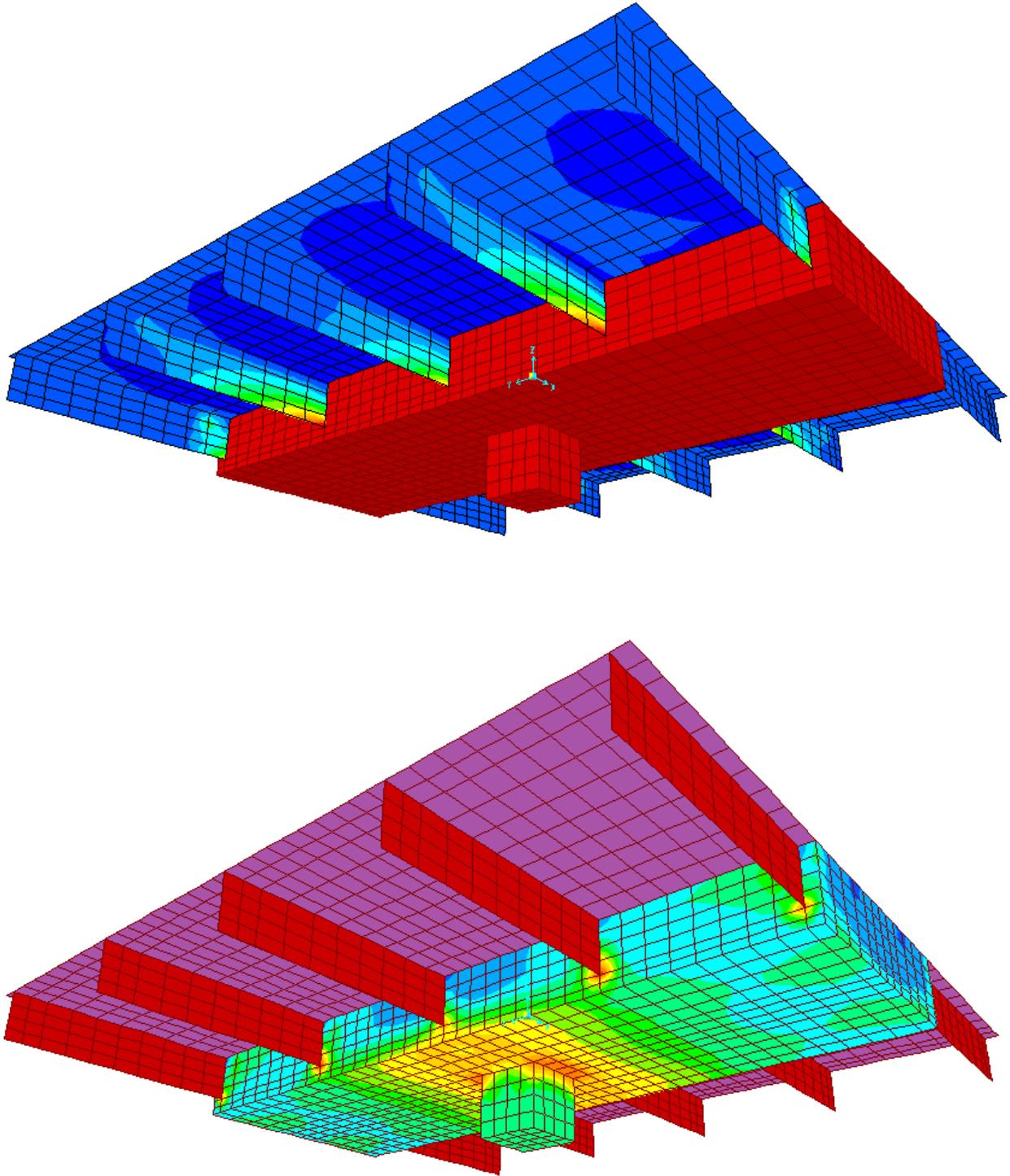


Figura 58 – Distribuição dos esforços na laje bidirecional L3 com viga faixa de altura igual a 200 mm

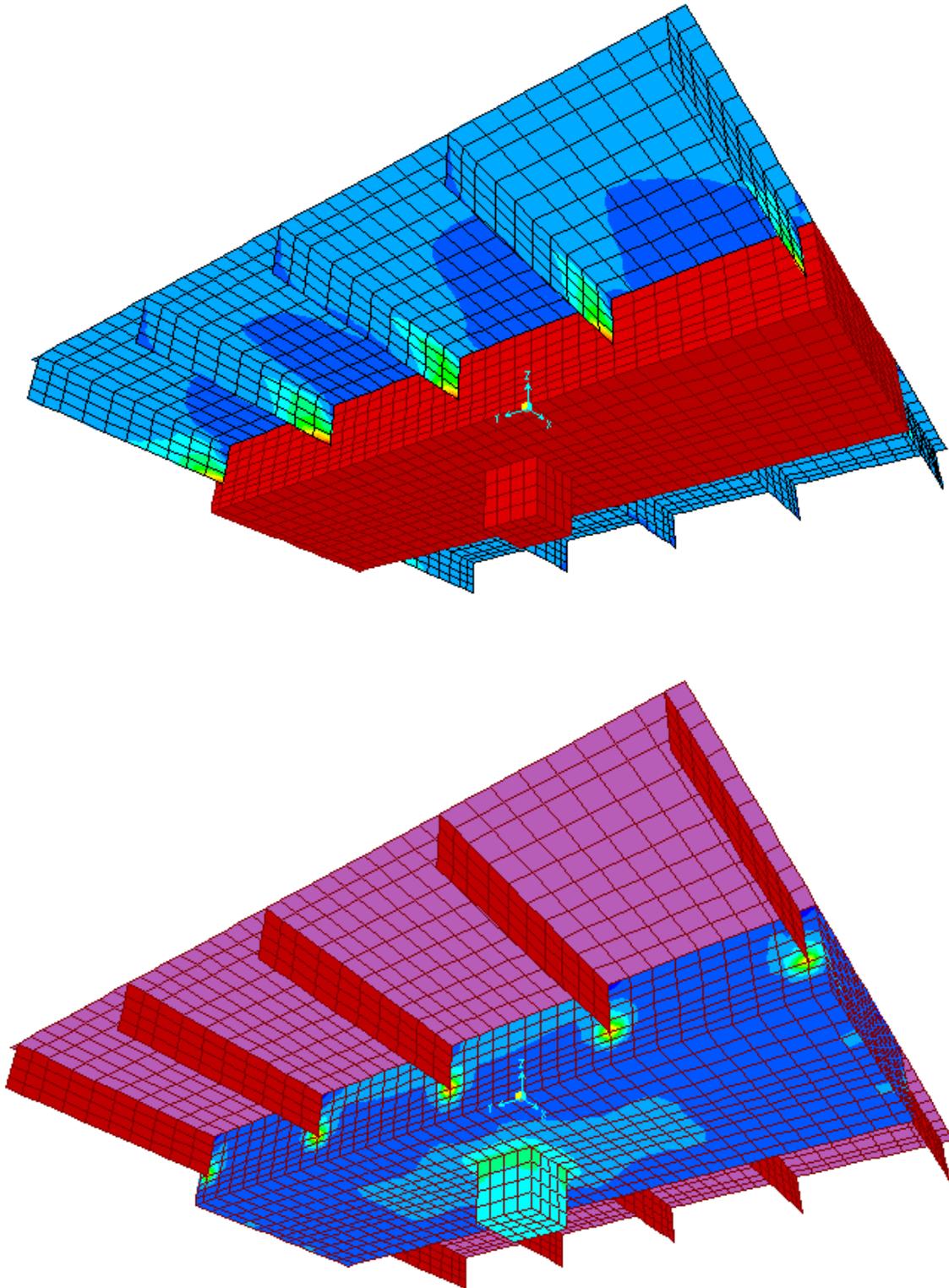


Figura 59 – Distribuição dos esforços na laje bidirecional L4 com viga faixa de altura igual a 250 mm

De acordo com os resultados obtidos é possível perceber que houve uma concentração de tensões principalmente na ligação da viga faixa com as nervuras, sobretudo nas nervuras centrais das lajes. Nota-se uma diminuição na solicitação das nervuras à medida que a altura da viga faixa aumenta. Isso ocorre também porque a laje com viga faixa de altura igual a 150 mm possuía apoios apenas na direção x , transmitindo assim maior solicitação para as nervuras. Já as outras lajes possuíam apoios nas duas direções. Isso permitia um alívio nas nervuras, com as tensões sendo absorvidas em sua maioria pela viga faixa. No entanto, essas tensões não foram suficientes para provocar uma ruptura na região maciça, principalmente pela resistência elevada da viga faixa em função de sua altura útil. Neste caso, portanto, as nervuras embora menos solicitadas apresentaram esgotamento de sua capacidade resistente.

Esta análise permitiu relacionar o modo de ruptura com a distribuição das tensões. Conforme pôde ser visto nas figuras, as tensões principais estão concentradas próximas aos locais de ruptura das lajes. Isto justifica que a ligação viga faixa-nervuras é um ponto crítico no dimensionamento de lajes nervuradas com viga faixa, independentemente das condições de contorno, pois a ruptura tanto nas lajes unidirecionais como nas bidirecionais foi praticamente semelhante, ocorrendo pelo esgotamento da capacidade resistente das nervuras.

Outra observação importante proveniente da análise dos modelos e que serve de parâmetro para o dimensionamento e verificação deste tipo de laje foi o fluxo das cargas de tração e compressão verificado. A Figura 60 mostra o curso das cargas ao longo dos elementos em *shell* das nervuras, o que permite explicar o comportamento das lajes durante os ensaios.

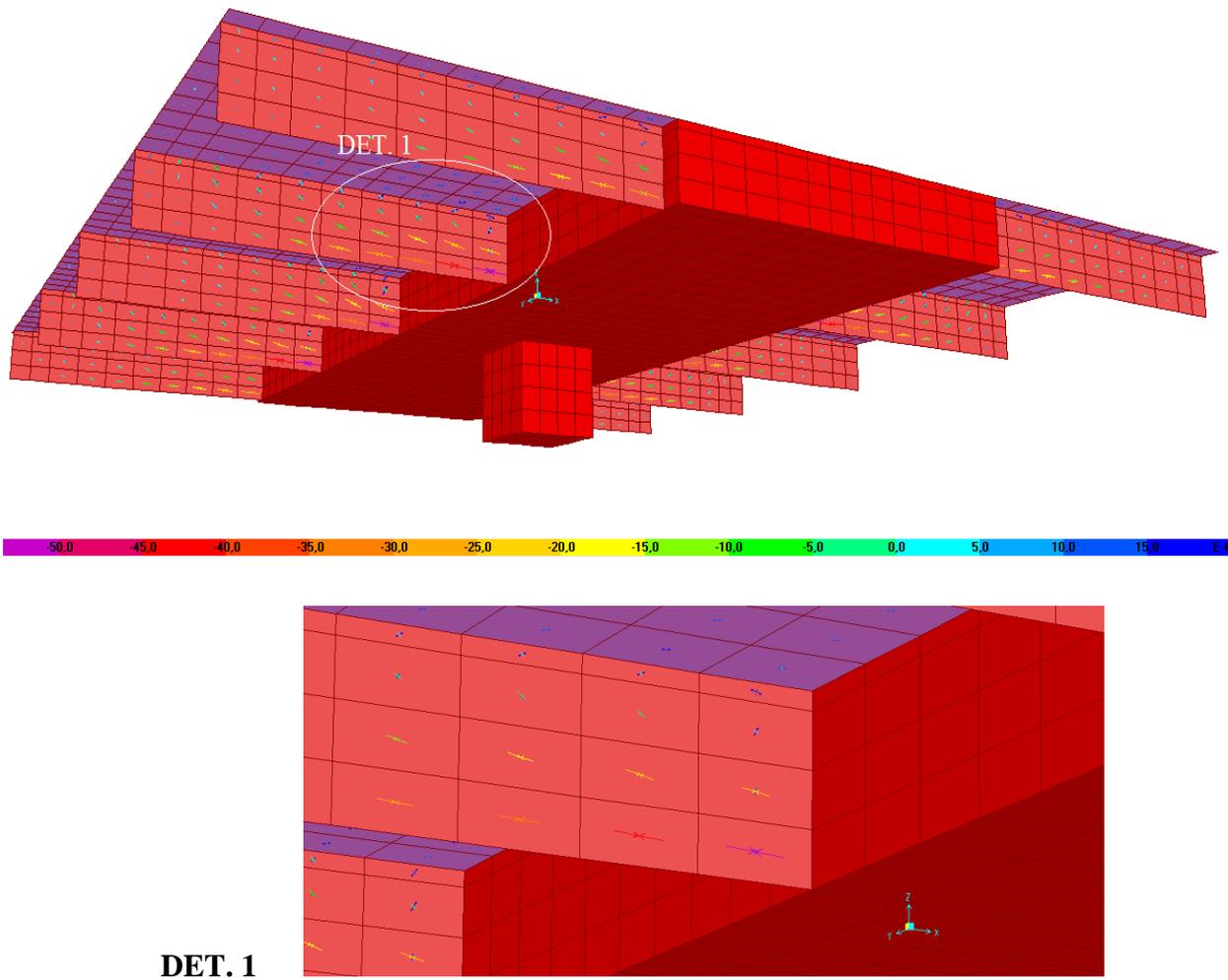


Figura 60 – Fluxo de cargas na ligação viga faixa-nervuras

Esses resultados demonstram um panorama geral das lajes ensaiadas no que diz respeito à fissuração e ao modo de ruptura. O fluxo de cargas formado demonstra que a região das nervuras próximo à superfície superior da laje, apresenta tensões de tração de maior magnitude bem próximo à ligação com a viga faixa. Isto serve para explicar a fissuração ocorrida nesta ligação quando a tensão de tração foi atingida, provocando a diminuição da profundidade da linha neutra neste trecho. Isto, por conseguinte, provocou uma redução da área de concreto resistente à compressão.

A rotação das nervuras apresentava valores maiores do que a viga faixa. Isto é comum por conta da diferença de rigidez entre elas. Quando ocorre a abertura da fissura na ligação viga faixa-nervuras, a rotação se intensifica e provoca uma ruptura precoce das nervuras. É interessante frisar que esse efeito ocorreu durante os experimentos mesmo com a presença de armadura de flexão na região tracionada. Na etapa de dimensionamento deste tipo de laje, a previsão do enrijecimento

dessa ligação a fim de evitar esse efeito torna-se fundamental para garantir o bom desempenho da laje tanto no estado limite de serviço como em relação ao estado limite último.

5.3. CONSIDERAÇÕES DA ANÁLISE

A análise computacional se mostrou bastante eficiente para o que foi proposta, em analisar a distribuição dos esforços e fluxo de cargas na laje. Esses resultados verificados mostraram semelhança em relação aos resultados experimentais, principalmente relacionado à fissuração da laje e ao modo de ruptura. Eles demonstraram que a problemática do dimensionamento de lajes nervuradas com viga faixa é a ligação com as nervuras, local onde foram observadas as máximas tensões.

A realização da análise é de extrema importância, pois casos como os modelos construídos neste trabalho, ainda são pouco abordados e, além disso, as normas de projeto não apresentam recomendações onde se considere a influência da região maciça, neste caso a viga faixa. Ainda mais, embora as normas limitem os espaçamentos entre as nervuras para dispensar a verificação da flexão da mesa e o cisalhamento nas nervuras, é fundamental uma análise com maior acurácia, pois os resultados experimentais demonstraram que mesmo dentro dos limites estabelecidos a resistência da laje estimada foi superestimada para os casos das lajes unidirecionais.

6. ANÁLISES DAS ESTIMATIVAS

Esta parte do trabalho consistiu em analisar as previsões de carga última das lajes propostas pelos códigos normativos EC 2 (2004), ACI 318 (2008) e NBR 6118 (ABNT, 2014), confrontando com os resultados de carga de ruptura observados na realização do ensaio experimental. Foram considerados aqui a resistência ao cisalhamento das nervuras como viga, a resistência ao cisalhamento como laje e a resistência à punção com base nas estimativas das normas de projeto.

É válido ressaltar a configuração de ensaio adotada para as lajes nervuradas bidirecionais L3 e L4, mencionada no capítulo 3 deste trabalho, em que a carga aplicada na direção y (viga faixa) equivalia ao dobro da carga aplicada na direção x (nervuras). Além disso, foi avaliada a estimativa da resistência à flexão das lajes através da Teoria das Linhas de Ruptura e comparada com os resultados experimentais.

6.1. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A resistência ao cisalhamento das lajes foi calculada considerando a resistência ao cisalhamento das nervuras como vigas e a resistência ao cisalhamento considerando a largura total da laje. As Tabelas 12 e 13 apresentam, respectivamente, a resistência das nervuras como viga e a resistência da laje considerando a largura total.

Tabela 12 - Relação entre as cargas experimentais e as estimativas de resistência ao cisalhamento das nervuras

LAJE	d_{WB} (mm)	d_{nerv} (mm)	Arm. Cisalhamento nervuras	P_u (kN)	P_u nervuras (kN)	P_{ACI} (kN)	$P_{u\ nerv} /$ P_{ACI} (kN)	P_{EC} (kN)	$P_{u\ nerv} /$ P_{EC} (kN)	P_{NBR} (kN)	$P_{u\ nerv} /$ P_{NBR} (kN)
L1	130	115	-	140,5	140,5	85	1,65	120	1,17	160	0,88
L2	130	115	TR 8644 (38,6°)	168,0	168,0	98	1,71	131	1,29	176	0,95
L3	176	115	TR 8644 (38,6°)	360,0	120,0	98	1,22	131	0,92	176	0,68
L4	230	115	TR 8644 (38,6°)	365,0	121,7	98	1,24	131	0,93	176	0,69

P_{u nervuras} - carga experimental observada nas nervuras no momento da ruptura da laje

Como mostrado na Tabela 12, todas as lajes apresentaram um tipo de ruptura por esgotamento da capacidade resistente das nervuras da laje. Isso explica a relação das cargas de ruptura e das estimativas de resistência ao cisalhamento apresentada na Tabela 11. No caso das lajes nervuradas unidirecionais L1 e L2, as estimativas da resistência ao cisalhamento dos códigos EC2 e

ACI 318 apresentaram valores conservadores, principalmente o código americano com resultados de aproximadamente 70% de conservadorismo. A norma brasileira, por sua vez, apresentou resultados abaixo dos valores de carga última obtidos nos ensaios das lajes unidirecionais L1 e L2, sendo o caso mais crítico em torno de 12% desfavorável.

As estimativas de resistência ao cisalhamento para as lajes bidirecionais L3 e L4 na direção das nervuras segundo a norma ACI 318 (2008) foram novamente conservadoras, porém com valores mais próximos em relação à carga de ruptura. O código EC 2 (2004) apresentou resultados com percentual de aproximadamente 9% abaixo dos valores das cargas experimentais, considerando as lajes L3 e L4. Já a norma brasileira foi a que apresentou resultados novamente mais desfavoráveis, com um percentual crítico em torno de 30% contra a segurança. Isto demonstra uma variação na resistência das nervuras em função das condições de apoio. Isto pode ser atribuído ao efeito de torção que ocorre na região da viga faixa fora da largura do pilar, ou seja, próximo à ligação com as nervuras.

Em relação à carga última das lajes é possível afirmar que, embora as lajes bidirecionais tenham apresentado uma carga maior de ruptura em relação às cargas unidirecionais, especialmente pela contribuição da resistência da viga faixa (direção y), a carga observada nas nervuras das lajes apoiadas nas quatro bordas (L3 e L4) foi menor que nas lajes apoiadas em uma direção (L1 e L2). Isso confirma que independentemente das condições de apoio, não só a região maciça da ligação com o pilar mas também as nervuras tornam-se uma problemática no dimensionamento de lajes nervuradas com viga faixa. É importante ressaltar que a carga observada nas nervuras no instante da ruptura foi possível apenas em função da visualização fornecida pela célula de carga.

Como foi visto anteriormente, a norma brasileira sugere que a região das nervuras seja verificada ao cisalhamento segundo os critérios de laje, desde que o espaçamento entre os seus eixos seja menor que 65cm. A Tabela 13 apresenta os valores teóricos das estimativas da resistência ao cisalhamento desta região como laje, comparando com os resultados experimentais de ruptura. Os valores estimados de resistência ao cisalhamento são calculados utilizando dois valores de altura útil. O primeiro considera a altura útil das nervuras (d_{nerv}). Já o segundo considera a altura útil equivalente (d_{eq}), calculada em função da altura equivalente, conforme observado por Dias (2003), onde é realizado uma equivalência de rigidez entre uma laje maciça e uma laje nervurada.

Tabela 13 - Relação entre as cargas últimas e as estimativas de resistência ao cisalhamento considerando os critérios de laje maciça, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014)

LAJE	d_{nerv} (mm)	d_{eq} (mm)	f_{ck} (MPa)	Arm. Cisalhamento nervuras	P_u (kN)	P_{NBR} Laje d_{nerv} (kN)	P_u / P_{NBR} d_{nerv} (kN)	P_{NBR} d_{eq} (kN)	P_u / P_{NBR} d_{eq} (kN)
L1	115	59	31	-	140,5	316,2	0,44	210,1	0,67
L2	115	59	31	TR 8644 (38,6°)	168,0	316,2	0,53	210,1	0,80
L3	115	59	31	TR 8644 (38,6°)	360,0	316,2	1,14	210,1	1,71
L4	115	59	31	TR 8644 (38,6°)	365,0	316,2	1,15	210,1	1,74

De acordo com a análise dos resultados é possível afirmar que as estimativas da norma brasileira de projeto para as lajes unidirecionais apresentaram valores contra a segurança, tanto quando é utilizado a altura útil das nervuras como quando é utilizado a altura útil equivalente. Os resultados estimados utilizando d_{nerv} são consideravelmente contra a segurança. Isto implica dizer que a altura útil equivalente é quem deve ser considerada na estimativa de resistência das lajes nervuradas unidirecionais, já que apresentou resultados mais próximos dos resultados experimentais, embora ainda tenha apresentado valores desfavoráveis à segurança.

Já no caso das lajes bidirecionais, as estimativas da norma brasileira apresentaram-se levemente conservadoras quando utilizada a altura útil das nervuras e extremamente conservadoras quando utilizada a altura útil equivalente. Neste caso, todavia, seria mais recomendado utilizar a altura útil das nervuras em vez da altura útil equivalente, pois esta última mostra-se com alto índice de conservadorismo.

Estas duas análises permitem observar que há imprecisão quanto às recomendações normativas para lajes nervuradas unidirecionais e bidirecionais com viga faixa. Outra questão a ser mencionada é que a diferenciação do cálculo da resistência das lajes nervuradas em função das condições de apoio torna-se indispensável, pois, como pode ser observado para as lajes unidirecionais, a utilização do critério de laje não apresentou condições satisfatórias de resistência.

6.2. RESISTÊNCIA À PUNÇÃO

Como haviam incertezas quanto ao modo de ruptura das lajes nervuradas, a resistência à punção também foi avaliada a fim de verificar o comportamento da laje em relação a esta possibilidade de ruptura, analisando se isso poderia ser um limitante no dimensionamento deste tipo

de laje. Foi considerado um perímetro crítico de controle de acordo com cada norma de projeto avaliada neste trabalho, para o cálculo da resistência à punção.

As Figura 61 e 62 mostram os perímetros de controle calculados para cada laje. Na Tabela 14 são apresentadas as estimativas de resistência à punção e a relação das cargas experimentais com estas estimativas. Segundo a norma americana, conforme pode ser visto, o perímetro de controle em todas as lajes encontra-se dentro da região da viga faixa. Isso quer dizer que se ocorresse uma ruptura por punção, nesta situação considerada, o cone de punção não afetaria a região das nervuras.

De acordo com o EC 2 (2004), apenas nas lajes L1 e L2 o perímetro de controle não alcança a região das nervuras. Já nas lajes L3 e L4 a formação do cone atingiria a região nervurada. Esta última situação seria a mais desfavorável, pois a fissura inclinada encontraria uma região com capacidade resistente menor, o que causaria uma ruptura de forma súbita.

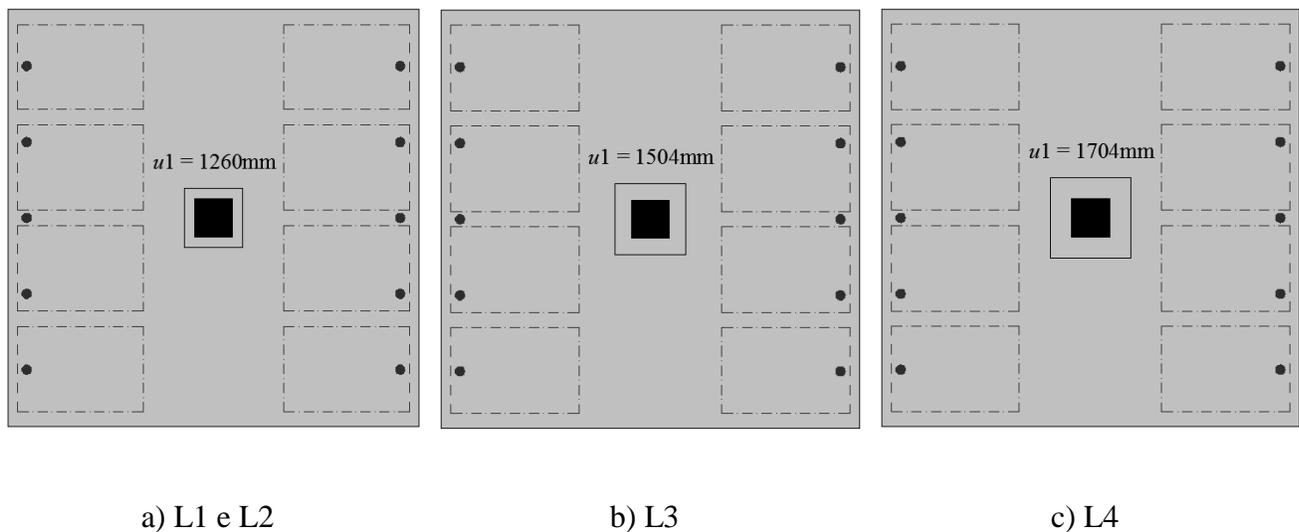
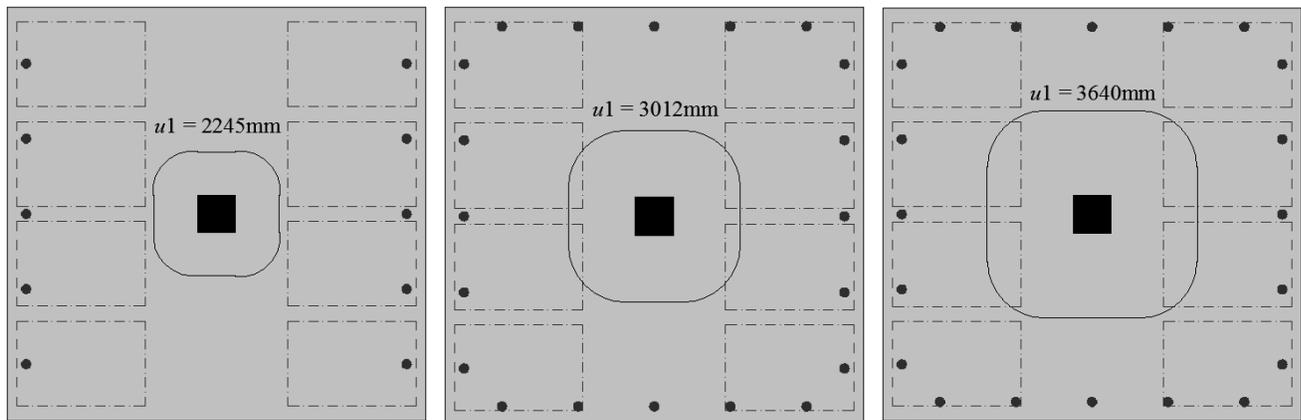


Figura 61 – Perímetro de controle das lajes segundo o ACI 318 (2008)



a) L1 e L2

b) L3

c) L4

Figura 62 – Perímetro de controle das lajes segundo o EC 2 (2004) e NBR 6118 (ABNT, 2014)

Como foi visto, nenhuma das lajes rompeu por punção. Duas situações contribuíram para a não ocorrência desse tipo de ruptura. A primeira está relacionada à capacidade resistente das nervuras ser menor do que a resistência à punção. E, além disso, a abertura da fissura na região tracionada da ligação viga faixa-nervuras adicionada à rotação excessiva das nervuras, provocaram o esmagamento do concreto na região comprimida da laje. O outro fator inibidor de uma ruptura por punção está relacionado à contribuição da armadura de cisalhamento utilizada na viga faixa. Sem dúvidas, isso contribuiu para que os esforços de cisalhamento fossem distribuídos além da região da viga faixa, favorecendo ainda mais a ocorrência de uma ruptura na região nervurada da laje.

Tabela 14 - Relação entre as cargas últimas e as estimativas de resistência à punção de acordo com as estimativas de projeto

LAJE	d_{WB} (mm)	f_{ck} (MPa)	P_u (kN)	$P_{PS\ ACI}$ (kN)	$P_u / P_{PS\ ACI}$ (kN)	$P_{PS\ EC}$ (kN)	$P_u / P_{PS\ EC}$ (kN)	$P_{PS\ NBR}$ (kN)	$P_u / P_{PS\ NBR}$ (kN)
L1	115	31	140,5	268,9	0,52	297,8	0,47	345,3	0,41
L2	115	31	168,0	268,9	0,62	297,8	0,56	345,3	0,49
L3	176	31	360,0	491,3	0,73	611,4	0,59	631,5	0,57
L4	226	31	365,0	714,7	0,51	920,7	0,40	920,7	0,40

6.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Como foi visto, a resistência à flexão foi calculada segundo a Teoria das Linhas de Ruptura. A Tabela 15 apresenta a relação da carga última das lajes com os resultados estimados segundo esta teoria. Foram considerados dois valores de altura útil para o cálculo da resistência à flexão. O primeiro considera a altura útil das nervuras e o segundo a altura útil equivalente e, então, foi analisada a relação entre esses dois casos.

Tabela 15 - Relação entre as cargas últimas e a resistência à flexão pela Teoria das Linhas de Ruptura

LAJE	d_{nerv} (mm)	d_{WB} (mm)	f_{ck} (MPa)	P_u (kN)	P_{flex} (kN)	P_u / P_{flex} (kN)	$P_{flex\ deq}$ (kN)	$P_u / P_{flex\ deq}$ (kN)
L1	115	115	31	140,5	289,8	0,48	165,9	0,85
L2	115	115	31	168,0	289,8	0,58	165,9	1,01
L3	115	176	31	360,0	550,7	0,65	359,1	1,00
L4	115	226	31	365,0	672,0	0,54	469,4	0,78

É possível notar que a resistência à flexão estimada foi, em geral, superior às cargas de ruptura. Entende-se, portanto, que uma ruptura por flexão seria pouco provável de ocorrer. Para fins deste trabalho, essa possibilidade foi interessante, pois o objetivo concentrava-se em analisar a resistência ao cisalhamento das lajes. O próprio comportamento dos materiais investigados, através da instrumentação demonstraram um baixo nível de deformação, principalmente da armadura de flexão, o que, do contrário, possibilitaria classificar um comportamento característico de modo de ruptura por flexão.

Em relação às alturas úteis consideradas nos cálculos, é possível ponderar que a utilização da altura útil equivalente torna-se mais adequada, pois a relação com as cargas últimas apresenta resultados próximos, com ligeiras diferenças. A utilização da altura útil total das nervuras, por sua vez, superestima consideravelmente a resistência à flexão das lajes. Essas imprecisões em relação às estimativas confrontadas com os resultados experimentais, tornam-se preocupantes do ponto de vista do dimensionamento de lajes nervuradas com viga faixa. Sabe-se que o esgotamento da capacidade resistente de uma estrutura, como hipótese de ocorrer, deve ser preferencialmente por flexão, evitando uma súbita ruptura por cisalhamento. Porém, as incertezas quanto à verificação de lajes nervuradas não permitem afirmar com precisão a ocorrência dessa regra.

7. CONCLUSÕES

7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho possibilitou observar de forma prática o comportamento estrutural de lajes nervuradas de concreto armado com vigas faixas, apoiadas ora nas bordas da direção das nervuras (unidirecionais) apenas ora tanto na direção das nervuras como na direção da viga faixa simultaneamente (bidirecionais). Alguns pontos considerados importantes no desenvolvimento deste trabalho estão apresentados a seguir.

- ✓ As dimensões das lajes foram consideradas adequadas, as quais tinham a finalidade de representar situações reais em que lajes nervuradas, utilizando vigas faixas, são definidas como uma boa solução para edificações de diversos fins. As dimensões representavam um trecho de momento fletor negativo em um pavimento real, um dos pontos mais críticos em projetos estruturais.
- ✓ As condições de contorno, mais uma vez, representaram um ponto fundamental no comportamento estrutural de lajes. Essas condições podem alterar significativamente o desempenho da estrutura, devendo ser levado em consideração nas definições de projeto deste tipo de laje. E, além disso, devem ser consideradas na resistência de lajes nervuradas com vigas faixas.
- ✓ Os deslocamentos observados permitiram concluir que a região maciça influencia expressivamente na rigidez ao deslocamento da laje. O aumento da altura da viga faixa proporcionou menores deslocamentos, influenciando diretamente no Estado Limite de Serviço (ELS). Além disso, a armadura de cisalhamento nas nervuras, proporcionou um comportamento mais dúctil quando comparado com a laje que não dispunha deste tipo de armadura, isto para as lajes unidirecionais.
- ✓ As deformações observadas dos materiais (concreto e aço) apresentaram valores baixos em relação aos valores limites que caracterizam deformações excessivas. Isto permite inferir que os pontos investigados neste trabalho não eram os mais solicitados para esta situação, pois antes que houvesse o escoamento da armadura ou o esmagamento do concreto ocorreu o

esgotamento da capacidade resistente ao cisalhamento das nervuras por esmagamento do concreto.

- ✓ A fissuração das lajes examinada durante os ensaios deu subsídios para afirmar que lajes nervuradas com viga faixa podem apresentar configuração diferente de outros tipos de lajes. Nestas lajes a fissuração tangencial é predominante na etapa inicial do carregamento, diferentemente das lajes lisas em que as fissuras radiais são formadas antes das fissuras tangenciais. Essas fissuras iniciam exatamente na ligação da viga faixa com as nervuras na superfície tracionada. Isso se tornou um fator determinante neste trabalho, pois exatamente nesta ligação ocorreu o esmagamento do concreto, por conta da abertura da fissura, que provocou a diminuição da profundidade da linha neutra nesta seção e, conseqüentemente, reduziu a área de concreto resistente.
- ✓ O modo de ruptura dos espécimes testados ocorreu em todos os casos por cisalhamento nas nervuras, intensificado pelo esmagamento do concreto das nervuras na ligação com a viga faixa. A fissuração na região tracionada dessa ligação e o acréscimo de carga provocaram a diminuição da profundidade da linha neutra e, como consequência, a diminuição da região comprimida.
- ✓ A análise numérica trouxe benefícios quanto à compreensão do comportamento das lajes. Foi possível notar, através dos modelos analisados, que a ligação da viga faixa com as nervuras apresentavam um nível de sollicitação maior em relação à ligação viga faixa-pilar. Ela apresentou resultados condizentes com os observados durante os ensaios.
- ✓ Os códigos normativos, considerando a resistência ao cisalhamento das nervuras como vigas, foram, em geral, conservadores, exceto no caso da NBR 6118 (ABNT, 2014), que apresentou resultados contra a segurança, especialmente para as lajes bidirecionais. Porém, esta norma apresentou resultados mais precisos quanto ao tratamento da região das nervuras como laje, quando apoiada nas duas direções.
- ✓ A ligação viga faixa-nervuras demonstrou ser um dos pontos críticos do projeto de lajes nervuradas de concreto armado. A diferença de rigidez entre a viga faixa, sobretudo quando a altura é aumentada, e as nervuras pode tornar a ligação um ponto crítico na resistência da laje. Os esforços de torção que ocorrem na viga faixa fora da largura do pilar também

contribuem para a vulnerabilidade das nervuras quanto à resistência. Além disso, a abertura da fissura nessa ligação na região tracionada provoca o aumento de tensão na região comprimida, causando o esmagamento do concreto.

- ✓ Embora não tenha ocorrido uma ruptura por punção na ligação viga faixa-pilar, não significa que a verificação se torna menos importante. Esta ligação deve ser cuidadosamente verificada tal como a ligação da viga faixa com as nervuras, pois tanto uma ruptura por punção como uma ruptura por cisalhamento na região das nervuras devem ser evitadas por causa da forma súbita como ocorrem.

De um modo geral, ainda existem muitas incertezas a respeito do sistema estrutural com lajes nervuradas. As aproximações ao comportamento de lajes maciças não são adequadas em algumas situações. Porém, este trabalho ofereceu condições de avaliar com mais precisão o comportamento deste tipo de laje. De qualquer forma, mais estudos devem ser realizados a fim de proporcionar uma melhor compreensão a respeito deste sistema, principalmente em relação à ligação viga faixa-pilar e à ligação viga faixa-nervuras.

7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base na pesquisa dos trabalhos realizados, das recomendações normativas e dos resultados obtidos experimentalmente neste trabalho, algumas sugestões para realizações de trabalhos que podem contribuir no comportamento de lajes nervuradas de concreto armado com viga faixa são apresentadas a seguir.

- ✓ Realização de um maior número de ensaios em lajes nervuradas a fim de produzir uma série de resultados que verifiquem a influência da altura da viga faixa na resistência destas lajes.
- ✓ Verificação dos esforços de torção através de estudo experimental desenvolvidos na ligação viga faixa-nervuras, em função do enrijecimento da viga faixa.
- ✓ Verificação da resistência ao cisalhamento das nervuras com variação do espaçamento entre elas, em lajes nervuradas com viga faixa.
- ✓ Influência da adição de fibras de aço na resistência e no modo de ruptura de lajes nervuradas com viga faixa de altura variável.

- ✓ Recomendações de padrão de linha de ruptura para estimar a resistência à flexão de lajes nervuradas unidirecionais e bidirecionais de concreto armado.
- ✓ Desenvolvimento de métodos de cálculo para estimar a resistência ao cisalhamento de lajes nervuradas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2007.
- ABNT. **NBR 6118 – Projeto e execução de obras de concreto armado.** Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT. **NBR 6118 – Projeto e execução de obras de concreto armado.** Rio de Janeiro, 2007.
- ABNT. **NBR 6118 – Projeto e execução de obras de concreto armado.** Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT. **NBR 7223 – Determinação da consistência pelo tronco de cone "slump test".** Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT. **NBR 7222 – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1994.
- ABNT. **NBR 7480 – Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado – Especificação.** Rio de Janeiro, 1996.
- ABNT. **NBR 8522 – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação.** Rio de Janeiro, 2003.
- ACI Committee 318, **Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)**, American Concrete Institute, Detroit, 1983.
- ACI-318R. **Building Code Requirements for Structural Concrete**, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2005.
- ACI-318R. **Building Code Requirements for Structural Concrete**, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2008.
- AJDUKIEWICZ, A. B. and KLISZCZEWICZ, A. T. **Experimental Analysis of Limit States in a Six-Panel Waffle Flat Plate Structure.** ACI Journal, Technical Paper, 83-78, November-December, 1986.
- ALBUQUERQUE, N. G. B. (2009). **Análise Experimental de Lajes Lisas Nervuradas de Concreto Armado com Região Maciça de Geometria Variável ao Puncionamento.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Belém, PA. 2009. 190p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos de prova, cilíndricos ou prismáticos – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2003.
- CEB-FIP. **Model Code 1990**, Thomas Telford, London, 1990.
- CP 110-72. **Code of Practice for the Structural Use of Concrete (CP 110: Part 1: 1972)**, British Standards Institution, London, 1972, 154 pp.

MORAES NETO, B.N. (2013). **Comportamento à Punção de Lajes Lisas em Concreto Reforçado com Fibras de Aço sob Carregamento Simétrico**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-001A/13 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 343 p.

BRANCO, V. H. L. **Resistência ao Cisalhamento de Vigas T de Concreto Armado: Verificação das Longarinas da ponte sobre o rio Sororó**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Belém, PA. 2011. 132p.

CLIMENT, A. B. e ÁVILA, J. D. **Moment transfer and influence of transverse beams in interior waffle flat plate-column connections under lateral loading**. Engineering Structures, 2014, Volume 49, 2013, Pages 146-155.

DIAS, R. H. **Análise Numérica de Pavimentos de Edifícios em Lajes Nervuradas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP. 2003. 453p.

EUROCODE 2. **Design of Concrete Structures**, Part 1, General rules and rules for buildings, DD ENV 2004-1-1, British Standards Institution, London, 2004.

FADWA, I. *et al.* **Reinforced concrete wide and conventional beam-column connections**. Engineering Structures, 2014, Volume 76, 1 October 2014, Pages 34-48.

FERREIRA, M. P. (2010). **Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Armaduras de Cisalhamento e Momentos Desbalanceados**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E. TD – 007 A/10 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 275p.

LAU AND CLARK, **Shear transfer between ribbed slab and internal column**. Magazine of Concrete Research, 2007, **59**, No. 7, September, 507-516.

LIMA NETO, A. F. *et al.* **Experimental and numerical analysis of reinforced concrete mushroom slabs**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, Volume 6, Number 2 (April 2013) p. 270-306.

MACGREGOR, J. G. **Reinforced Concrete: Mechanics and Design**. Fifth Edition. New Jersey. Pearson Education, 2009.

OLIVEIRA, D. R. C. **Análise Experimental de Lajes Cogumelo de Concreto Armado com Pilares Retangulares**. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília. Brasília, DF. 2003. 214p.

SCHWETZ, **Análise Numérico-Experimental de uma Laje Nervurada Projetada como Piso de uma Quadra de Tênis**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, Volume 6, Number 3 (June 2013) p. 375-391

SOARES, Y.V., **Análise Experimental de Lajes Cogumelo Nervuradas de Concreto Armado com Pilares Metálicos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília. Brasília, DF. 2004. 200p.

SOUZA, S. S. M. **Análise Experimental de Lajes lisas Nervuradas de Concreto Armado com Armadura de Cisalhamento.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Belém, PA. 2007. 182p.