

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JULIANA DAYENE DE SOUZA NEVES

**LAJES ALVEOLARES DE CONCRETO PROTENDIDO:
SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE EXPERIMENTOS FÍSICOS**

MARINGÁ
2016

JULIANA DAYENE DE SOUZA NEVES

**LAJES ALVEOLARES DE CONCRETO PROTENDIDO:
SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE EXPERIMENTOS FÍSICOS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientadora: Prof^a Dr^a Anamaria M. Miotto Farah

MARINGÁ
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

N518L Neves, Juliana Dayene de Souza
Lajes alveolares de concreto protendido :
simulações numéricas de experimentos físicos /
Juliana Dayene de Souza Neves. -- Maringá, 2016.
63 f. : figs. color.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Anamaria M. Miotto Farah.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de
Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, 2016.

1. Lajes alveolares. 2. Abaqus (Programa
computacional). 3. Método dos Elementos Finitos
(MEF). I. Farah, Anamaria M. Miotto, orient. II.
Universidade Estadual de Maringá. Centro de
Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III.
Título.

CDD 21.ed. 624.1834

GV5-003693

JULIANA DAYENNE DE SOUZA NEVES

LAJES ALVEOLARES DE CONCRETO PROTENDIDO:
SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE EXPERIMENTOS FÍSICOS
SIMPLES.

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração Estruturas, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 29 de agosto de 2016.



Prof^ª. Dr^ª. Vanessa Cristina de Castilho

Membro UFU



Prof. Dr. Carlos Humberto Martins

Membro UEM



Prof^ª. Dr^ª. Anamaria M. Miotto Farah

Orientadora UEM

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar força, calma e paciência ao longo deste trabalho.

Ao meu esposo Jefferson Grandini Neves, pelas palavras tão abençoadas e confortadoras e pelo grande amor e compreensão, principalmente nas muitas horas que não pude estar ao seu lado.

À Professora Anamaria Malachini Miotto Farah pela valiosa orientação, por toda contribuição, por me acolher num momento tão difícil e pelo indispensável apoio, amizade e compreensão.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação e da Graduação em Engenharia Civil da UEM pelas inúmeras contribuições.

Aos meus familiares, que sempre me apoiaram.

Aos meus pais, Faustino F. de Souza e Shirley L. de Souza, pela educação e condições de estudo que me fizeram chegar até aqui.

Aos meus tios Lucio Grandini e Neusa Grandini pelo carinho e pela amizade.

A todos os colegas da graduação e do mestrado em Engenharia Civil da UEM.

Às amigas Livia Fernanda Silva e Talita Marchiosi pelo companheirismo e pelas valiosas horas de estudo.

Aos amigos Adriano Vieira Risson, Michel Albertin e Miguel Oliveira pela companhia nas viagens à Maringá, pelo incentivo nos estudos e maravilhosa convivência nesses anos.

Aos colegas de trabalho da UNILA pelo apoio, incentivo e compreensão da minha ausência durante este período e acima de tudo pela amizade.

À secretária Marli Silveira (PCV-UEM) pelo carinho e dedicação com todos os alunos e professores do mestrado.

À todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O emprego de peças pré-fabricadas de concreto na construção civil representa um razoável progresso em termos construtivos, permitindo a racionalização e o aperfeiçoamento técnico das obras. As lajes alveolares correspondem a um dos mais avançados tipos de unidades pré-moldadas e vêm sendo amplamente utilizadas no Brasil. A realização de pesquisas de estruturas de concreto pré-moldado, sobretudo lajes alveolares é importante para a melhoria da qualidade e produtividade deste seguimento da construção civil. Nesta pesquisa, foi estudado o comportamento ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas. Para isso, foram feitas simulações computacionais de experimentos já realizados em laboratório. A simulação foi realizada comparando-se os resultados numéricos com os experimentais de Marquesi (2104) com auxílio do programa computacional Abaqus que tem o Método dos Elementos Finitos (MEF) como base de cálculo. A simulação numérica é uma ferramenta valiosa, porém, para utilizá-la satisfatoriamente precisam-se de dados experimentais detalhados e específicos. Observou-se uma diferença razoável entre as curvas numéricas e experimentais, mesmo na fase linear. Atribui-se essa diferença aos seguintes fatores: poucos dados disponíveis do trabalho de Marquesi (2014); o módulo de elasticidade do concreto foi obtido com base na sua resistência à compressão. Acredita-se que o valor usado para o módulo de elasticidade do concreto nas simulações esteja acima do real. O comportamento ao cisalhamento, com ruptura por tração diagonal, sem fissuração anterior é difícil de representar, e de garantir a convergência do modelo numérico.

Palavras-chave: Lajes alveolares; Abaqus; MEF.

ABSTRACT

The use of precast concrete in construction is reasonable progress in constructive terms, allowing the rationalization and technical improvement works. The hollow core slabs correspond to one of the most advanced types of precast units and see being widely used in Brazil. Conducting research precast concrete structures, particularly hollow core slabs is important to improve the quality and productivity of this follow-up construction. In this research, we studied the behavior shear of prestressed hollow core slabs. For this, computer simulations of experiments were made already made in the laboratory. The simulation was performed by comparing the numerical results with experimental Marquesi (2104) using the Abaqus computer program that has the Finite Element Method (FEM) as base. The numerical simulation is a valuable tool, but to use it satisfactorily need is reliable experimental data. There was a reasonable difference between the numerical and experimental curves, even in the linear phase. It is attributed this difference to the following factors: the limited data available Marquesi work (2014); the specific elastic modulus was obtained based on their resistance to compression. Only data provided in that work. It is believed that the value used in the simulations is above the real. The behavior shear with diagonal break by traction without prior cracking is difficult to represent, and to ensure the convergence of the numerical model.

Key-words: hollow core slabs; Abaqus; FEM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Laje alveolar e suas diferentes partes.	4
Figura 2.2: a: Lajes alveolares sobre estrutura metálica; b: Lajes alveolares sobre concreto moldado no local (África do Sul, 2001).	5
Figura 2.3: a: Lajes alveolares sobre alvenaria estrutural (África do Sul, 2001); b: Lajes alveolares sobre estrutura de madeira (Finlândia, 2005)	6
Figura 2.4: Paredes estruturais alveolares.	6
Figura 2.5: Lajes com formato especial utilizadas em arquibancadas de estádios.	7
Figura 2.6: Máquina utilizada no processo de fabricação pelo método da forma deslizante.	8
Figura 2.7: Extrusora.	8
Figura 2.8: a: Disposição dos cabos na pista; b: protensão dos cabos; c: ancoragem dos cabos.	9
Figura 2.9: Moldagem das unidades alveolares	9
Figura 2.10: Exemplos de seções transversais de elementos de laje alveolar	11
Figura 2.11: Modelos da região de concreto situada entre duas fissuras adjacentes	13
Figura 2.12: Resistência ao cisalhamento em peças fissuradas	14
Figura 2.13: Direções das forças internas devidas ao efeito de pino, considerando momentos positivos	15
Figura 2.14: Andamento do fluxo de tensões	15
Figura 2.15: Fissura crítica de flexo-cortante	16
Figura 2.16: Rupturas por tração diagonal em lajes alveolares	17
Figura 3.1: Medição realizada com paquímetro na seção transversal da laje	24
Figura 3.2: Preparação do apoio para as lajes. a: aplicação da graxa na chapa inferior. b: posicionamento da chapa superior.	24
Figura 3.3: Apoio para os ensaios das lajes	25
Figura 3.4: Regularização da superfície das lajes na região de contato com a viga de transmissão. A: com areia úmida. B: com massa plástica	25
Figura 3.5: Vigas de transmissão, rótulas e chapas metálicas posicionadas	26
Figura 3.6: Transdutor (LVDT) para medição de deslocamentos.	26

Figura 3.7: Esquema geral da instrumentação utilizada nos ensaios de força cortante	27
Figura 3.8: Sistema de aquisição de dados	27
Figura 3.9: Seção transversal nominal das Lajes A	28
Figura 3.10: Seção transversal LA06-C-A	29
Figura 3.11: Esquema geral dos ensaios	30
Figura 3.12: Força cortante vs. deslocamento: LA02, LA03 e LA04	31
Figura 3.13: Força cortante vs. Deslocamento: LA05 e LA06	32
Figura 3.14: Força cortante vs. Deslocamento: LA07, LA08 e LA09	32
Figura 3.15: Laje LA04 e sua ruptura	33
Figura 3.16: Laje LA06 e sua ruptura	33
Figura 3.17: Laje LA09 e sua ruptura	34
Figura 4.1: Janela principal do Abaqus	36
Figura 4.2: Seção transversal da laje.	37
Figura 4.3: Seção da laje alveolar.	38
Figura 4.4 – Modelo “tension-stiffening”	42
Figura 4.5 – Modelo de fissuração da Energia de Fratura	42
Figura 4.6: Laje modelada no Abaqus.	44
Figura 4.7: Forças aplicadas na peça	46
Figura 4.8: Malha gerada para o modelo.	47
Figura 4.9: Curvas de deslocamento vertical gerada pelo software	47
Figura 5.1: Seção da laje alveolar	49
Figura 5.2: Laje LA02-C-A deformada após a simulação	49

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	OBJETIVOS	1
1.1.1.	Objetivo Geral	1
1.1.2.	Objetivos Específicos	1
1.2.	JUSTIFICATIVA DO TEMA ABORDADO	2
2.	REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1.	LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS	4
2.2.	APLICAÇÕES	5
2.3.	PRODUÇÃO	7
2.4.	VARIAÇÕES DA SEÇÃO TRANSVERSAL	10
2.5.	LAJES COM ALVÉOLOS PREENCHIDOS	11
2.6.	COMPORTAMENTO DE LAJES SEM ARMADURA DE CISALHAMENTO	11
2.7.	PESQUISAS REALIZADAS	17
2.7.1.	Trabalhos Publicados No Exterior	17
2.7.2.	Trabalhos Nacionais	19
3.	METODOLOGIA DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS REALIZADOS POR MARQUESI (2014)	23
3.1.	DESCRIÇÃO DOS MODELOS ENSAIADOS	27
3.2.	ESQUEMA DOS ENSAIOS	30
3.3.	PRINCIPAIS RESULTADOS	30
4.	MODELO NUMÉRICO DESENVOLVIDO NO ABAQUS®	35
5.	RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES	49
5.1.	RESULTADOS PARA ANÁLISE COM COMPORTAMENTO LINEAR DOS MATERIAIS	50
5.2.	RESULTADOS PARA ANÁLISE COM COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR DOS MATERIAIS	56
6.	CONCLUSÕES	58
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1. INTRODUÇÃO

A indústria de pré-fabricados busca atender as demandas da sociedade, oferecendo, com seus produtos: economia, eficiência, desempenho técnico, segurança e condições favoráveis de trabalho. O emprego de peças pré-fabricadas de concreto na construção civil representa um razoável progresso em termos construtivos, permitindo a racionalização e o aperfeiçoamento técnico das obras.

Os elementos pré-fabricados podem ser utilizados nos mais variados setores da construção civil, tais como: edificações industriais, comerciais e residenciais, construção pesada e infra-estrutura urbana, rodoviária e ferroviária.

Os elementos estruturais para pisos estão entre os produtos pré-moldados mais antigos. As primeiras lajes alveolares foram desenvolvidas na década de 1950, quando evoluíram as técnicas de protensão em longas pistas. Por mais de 30 anos os tipos de unidades produzidas pouco mudaram. (CATOIA, 2011)

As lajes alveolares correspondem a um dos mais avançados tipos de unidades pré-moldadas. Segundo Catoia (2011), dezenas de milhões de metros quadrados de lajes são fabricadas todo ano ao redor do mundo, com o emprego predominante na América do Norte e na Europa Ocidental, sua tecnologia de fabricação é bem desenvolvida em países como Alemanha e Estados Unidos.

Possuem uma concepção arrojada, podendo ser utilizadas nos mais variados sistemas estruturais, funcionando como laje ou como painel de fechamento. Esse tipo de laje é muito usado devido as suas características como: facilidade de manuseio, transporte e armazenagem e aplicação em grandes vãos. Sua espessura reduzida (e conseqüente menor peso próprio) quando comparada às lajes convencionais de concreto armado com mesma capacidade de carga, permite ganhos no dimensionamento de todos os elementos da estrutura.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo principal e geral deste trabalho é avaliar para o estudo do comportamento ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas por meio de simulações numéricas.

1.1.2. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos tem-se:

- Realizar pesquisas bibliográficas em literatura e artigos científicos nacionais e internacionais sobre lajes alveolares protendidas e os mecanismos de resistência ao cisalhamento de lajes sem armadura transversal.

- Desenvolver um modelo numérico no software Abaqus capaz de representar o comportamento das lajes alveolares quanto à resistência à força cortante.

- Simular através do modelo numérico implementado nesta pesquisa os experimentos com lajes alveolares protendidas realizados por Marquesi (2014) que foram desenvolvidos no NETPRE/UFSCar (Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto situado na Universidade Federal de São Carlos).

- Realizar comparações dos resultados obtidos através das simulações com os dados experimentais já desenvolvidos possibilitando a validação do modelo numérico.

1.2. JUSTIFICATIVA DO TEMA ABORDADO

Lajes alveolares são painéis de concreto protendido com seção transversal constante e alvéolos longitudinais que garantem a redução do peso próprio do elemento. Estes painéis são produzidos em diferentes dimensões, dependendo da utilização, e vêm sendo amplamente utilizados no Brasil.

O estudo se justifica plenamente pelo crescente emprego no Brasil das estruturas pré-moldadas para edifícios de múltiplos pavimentos, sendo grande o emprego de elementos pré-moldados na composição de pisos.

O controle da qualidade dos materiais e dos procedimentos empregados na execução, além da economia de mão de obra e redução dos prazos de execução torna esta uma solução atraente para a construção civil.

Devido ao método de fabricação a laje alveolar normalmente não possui armadura transversal. Assim, a resistência ao cisalhamento depende inteiramente da resistência do concreto à tração. Por essa razão, a qualidade do concreto deve ser constantemente controlada e certificada em todos os estágios da produção.

Considerando atendidos padrões mínimos de qualidade segundo a ABNT NBR 14861:2011, o cálculo das lajes alveolares à força cortante pode estar com segurança demasiada para algumas situações. Isso pode levar a medidas como preenchimento de alvéolos ou até aumento da altura da laje sem real necessidade. (MARQUESI, 2014).

A previsão da resistência à força cortante, representada pela situação em que a tensão principal nas nervuras da laje alcança a máxima tensão de tração do concreto (ruptura por tração diagonal) constitui uma lacuna no projeto das lajes brasileiras. Já no âmbito internacional, apesar de existirem formulações para representar este mecanismo, elas tem se mostrado insatisfatórias para casos de lajes com alvéolos oblongos (alvéolos não circulares) (Pajari, 2004 e Ghosh, 2006).

A realização de pesquisas de estruturas de concreto pré-moldado, sobretudo lajes alveolares é importante para a melhoria da qualidade e produtividade deste seguimento da construção civil.

Nesta pesquisa, será estudado o comportamento ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas, uma vez que existe a carência, na literatura técnica nacional, de tal análise. Para isso, foram feitas simulações computacionais de experimentos já realizados em laboratório.

Há uma tendência de estudos de elementos estruturais através de simulações computacionais porque a análise destes elementos em laboratório tem limitações de custo e também demanda um enorme esforço de trabalho humano.

Surge, então, a necessidade de complementação das análises laboratoriais por meio de análises numéricas baseadas em programas computacionais que utilizam o MEF a fim de simular numericamente o comportamento dos elementos estruturais.

Com base nos resultados de laboratório, é possível calibrar e validar os modelos computacionais e ainda, ampliar criteriosamente o campo de dados a serem obtidos com menor esforço e custo.

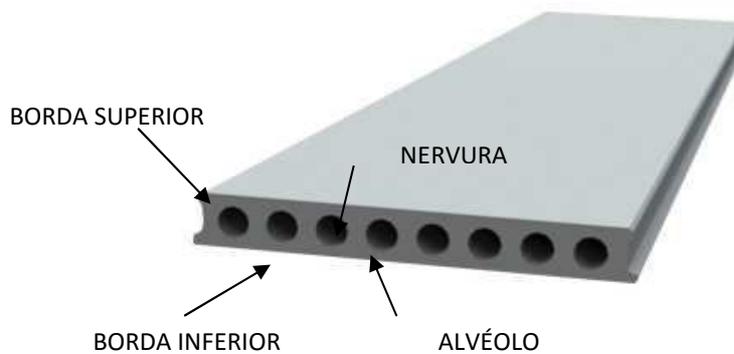
2. REVISÃO DA LITERATURA

Lajes alveolares são elementos pré-moldados que correspondem a um tipo especial de laje que não utiliza outros elementos (como lajotas ou blocos de isopor) para o seu preenchimento. Essas lajes podem conter armaduras ativas ou armaduras passivas, sendo as lajes protendidas as mais empregadas em todo mundo. O sistema de lajes alveolares está sendo muito utilizado atualmente na construção civil devido as circunstâncias vantajosas de manuseio, transporte, armazenagem e aplicação em grandes vãos.

2.1. LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS

As lajes alveolares são constituídas por painéis de concreto que possuem seção transversal de altura constante e alvéolos longitudinais (vazios na estrutura), os quais tem a finalidade principal de reduzir o peso próprio e a quantidade de concreto, em comparação com lajes maciças de mesma altura. A porcentagem de vazios varia entre 30% e 50%. As unidades de laje alveolar e suas diferentes partes podem ser observadas na Figura 2.1.

Figura 2.1: Laje alveolar e suas diferentes partes



Fonte: Pré Tubo (2015)

Em alguns países os painéis de concreto armado são utilizados em construções habitacionais e possuem, geralmente, largura de 30cm a 60cm. Já nos elementos de concreto protendido, as pistas de protensão são construídas com largura de 120cm e comprimento de 80m a 150m. Os principais parâmetros de projeto são: o grau de protensão, o tipo de cordoalha e a espessura do elementos. Geralmente as lajes protendidas são utilizadas para vencer vãos que variam de 5m a 15m e possuem altura de 15cm a 30cm, podendo atingir ate 50cm. Atualmente, tais lajes também estão sendo produzidas com alturas de 60cm, 70cm e ate

80cm, mas por razões de segurança, com essas alturas, elas devem possuir estribos verticais nas nervuras e um mínimo de armadura na parte inferior, com tela soldada contínua.

2.2. APLICAÇÕES

Até 1970, as lajes alveolares foram usadas quase que exclusivamente com apoio simples. As pequenas alturas das lajes então produzidas (12cm, 15cm, 20cm e 25cm) não permitiam longos vãos ou grandes cargas.

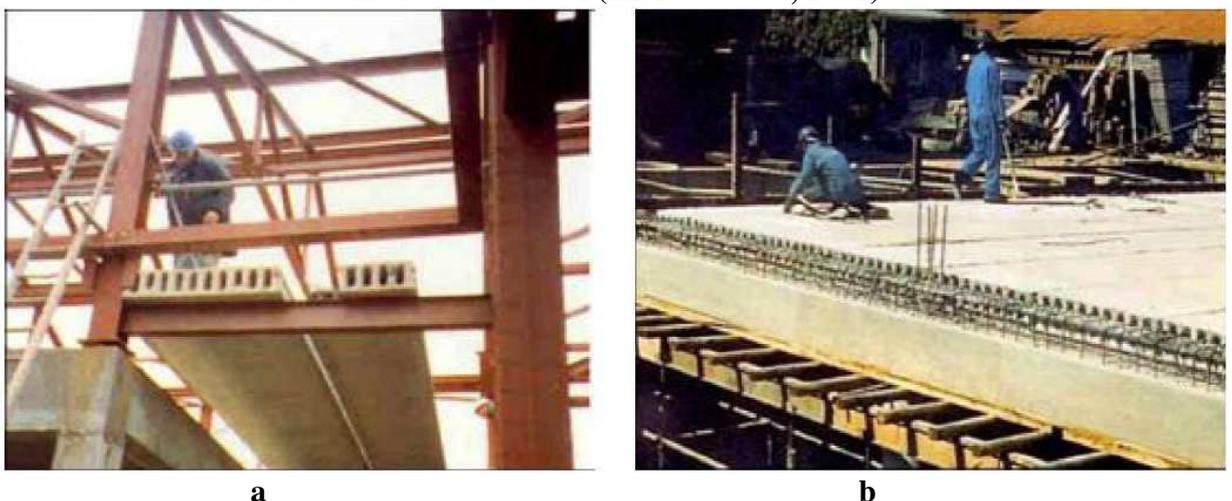
Com o tempo, foi desenvolvido o conceito de seção composta (laje pré-moldada com capa de concreto), proporcionando maior eficiência tanto para a laje como para viga, o que conduziu ao crescimento das aplicações das unidades de laje alveolares em pisos e ao uso generalizado desses elementos em todos os tipos de construções.

Assim, as lajes alveolares protendidas passaram a representar uma das soluções estruturais mais avançadas para sistemas de piso, podendo ser utilizadas extensivamente em todo tipo de construção, não somente para estruturas pré-moldadas, mas também em combinação com outros materiais, como por exemplo: estruturas metálicas, de madeira, de concreto moldado no local etc.

Alguns exemplos de aplicações das unidades alveolares em diversos sistemas construtivos podem ser observados na Figura 2.2 e na Figura 2.3.

As lajes alveolares de grandes alturas permitem a construção de pisos com vãos de até 20 metros, não mais com apoio simples, mas com continuidade estrutural e mesmo extremidades engastadas.

Figura 2.2: a: Lajes alveolares sobre estrutura metálica; b: Lajes alveolares sobre concreto moldado no local (África do Sul, 2001)



Fonte: ELLIOTT (2005)

Figura 2.3: a: Lajes alveolares sobre alvenaria estrutural (África do Sul, 2001); b: Lajes alveolares sobre estrutura de madeira (Finlândia, 2005)



Fonte: ELLIOTT (2005)

Além disso, a grande versatilidade das lajes alveolares permite que elas sejam usadas não somente como pisos, mas também como paredes de tanques para tratamento de água, como muros de arrimo e, eficientemente, como paredes externas e estruturais para construções de diferentes tamanhos (Figura 2.4). Existe também a produção de um tipo específico de laje alveolar, com três alvéolos, que é utilizado como arquibancada de estádios (Figura 2.5).

Figura 2.4: Paredes estruturais alveolares



Fonte: CASSOL PRÉ-FABRICADOS (2015)

Figura 2.5: Lajes com formato especial utilizadas em arquibancadas de estádios.



Fonte: ASSAP (2002)

De acordo com ASSAP (2002), inúmeros exemplos de edifícios com múltiplos pavimentos, erguidos com painéis alveolares estruturais, demonstram que os possíveis usos desse elemento pré-moldado ainda não foram totalmente explorados. Seu desenvolvimento em todo o mundo deve ser ampliado.

2.3. PRODUÇÃO

Para a fabricação de lajes alveolares são utilizados basicamente dois tipos de processos: por forma deslizante e por extrusão.

No processo por forma deslizante, a fabricação ocorre em várias camadas de concreto, as unidades de laje são produzidas a partir do deslizamento da forma, o concreto com maior trabalhabilidade é lançado pela máquina de produção e a compactação é realizada externamente por vibradores. A Figura 2.6 mostra uma máquina utilizada nesse processo produtivo.

Figura 2.6: Máquina utilizada no processo de fabricação pelo método da forma deslizante



Fonte: CATOIA (2009)

O método mais utilizado para a fabricação das unidades é o processo por extrusão. Através de uma máquina extrusora o concreto é expulso e comprimido nas paredes do molde, o que permite a formação de um bloco único (Figura 2.7). O concreto utilizado neste método tem um baixo fator água-cimento o que garante elevada resistência à compressão e menor porosidade do concreto.

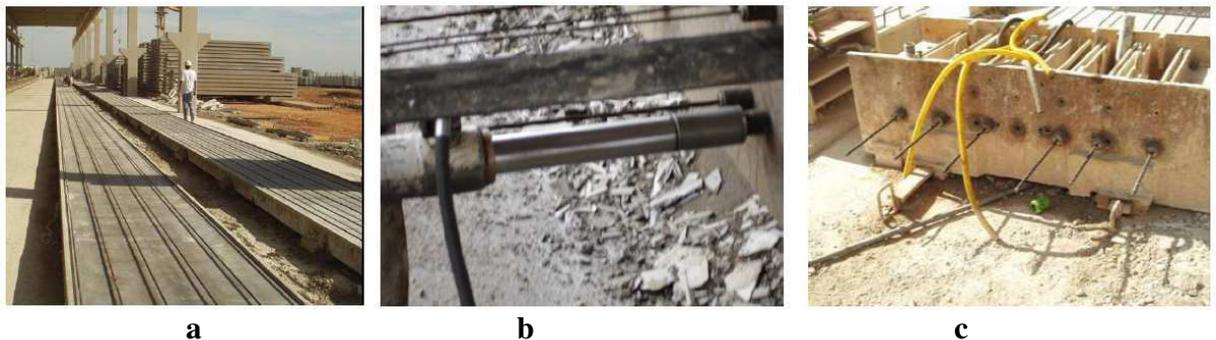
Figura 2.7: Extrusora



Fonte: Revista AECweb (2015)

Para a produção, inicialmente são dispostos os cabos de protensão sobre as pistas de concretagem, os quais serão protendidos com tensão previamente estipulada. Em seguida é realizada a ancoragem das cordoalhas em cabeceiras próprias para essa finalidade, localizadas na extremidade da pista. Essas etapas podem ser observadas na Figura 2.8.

Figura 2.8: a: Disposição dos cabos na pista; b: protensão dos cabos; c: Ancoragem dos cabos



Fonte: CATOIA (2009)

Os cabos são protendidos e temporariamente encapados para evitar o contato com o desmoldante que será aplicado sobre a pista. À medida que o concreto é inserido na extrusora, ela lança o concreto na forma definitiva, moldando as lajes, como se observa na Figura 2.9.

Figura 2.9: Moldagem das unidades alveolares



Fonte: CATOIA (2009)

Após a etapa de concretagem, a cura do concreto é feita por vapor d'água com temperatura controlada. Assim que o concreto adquire resistência suficiente é feito o corte das lajes nas medidas desejadas com uma serra de disco diamantado.

Ao serem retiradas da pista, as lajes são transportadas para a estocagem. O transporte até a obra é feito por carretas específicas para esta atividade e a descarga das peças é feita preferencialmente diretamente no local de montagem. O ciclo completo, compreendido por preparo da pista, concretagem, cura do concreto e liberação da laje para o transporte, é de aproximadamente 24 horas.

Quando as peças forem estocadas, devem seguir as recomendações da FIP (1992):

- Não devem ser apoiadas diretamente no solo, ou umas sobre as outras, mas em local plano, sobre dois apoios de madeira distantes de 200 a 400mm das extremidades;
- Devem ser empilhadas com uma altura máxima de 3,5m a 5m, dependendo do tipo de laje. Essa altura deve ser bem menor para lajes muito longas.

A montagem é feita com equipamentos de içamento. Após a colocação das lajes na posição de serviço elas são niveladas e rejuntadas. Uma das características das lajes alveolares é a superfície inferior lisa o que elimina a necessidade de revestimento. Na face superior é colocada uma tela soldada e feito um capeamento para melhor distribuição das cargas.

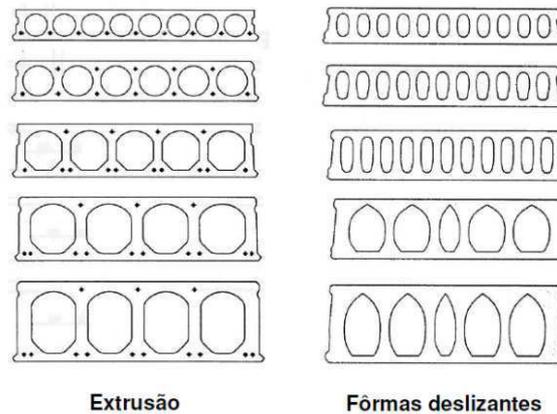
A laje alveolar, quando protendida, apresenta uma contra flecha natural decorrente de suas características intrínsecas. A capa de concreto deve ser locada a partir da contraflecha média do pano de várias lajes alveolares, depois de efetuada a equalização das peças. A partir desse ponto, deve ser adotada a espessura da capa, em geral de 5cm.

Vale ressaltar que a paginação das lajes, ou seja, a distribuição delas em planta é um dos aspectos mais importantes do projeto, pois é a partir dessa paginação que se verifica a viabilidade econômica do sistema.

2.4. VARIAÇÕES DA SEÇÃO TRANSVERSAL

Existem muitas variações da seção transversal de unidades alveolares. Os alvéolos podem ter seção transversal de forma circular, oval, retangular etc. Essa forma será determinada pelo tipo de equipamento empregado para a fabricação das peças. Os lados das seções não são planos possuem entalhes que são as chamadas chaves de cisalhamento.

Figura 2.10: Exemplos de seções transversais de elementos de laje alveolar



Fonte: CATOIA (2009)

2.5. LAJES COM ALVÉOLOS PREENCHIDOS

Na utilização de lajes alveolares para vencer grandes vãos ou suportar cargas elevadas, algumas alternativas são avaliadas, tais como: aumento do número de cordoalhas; aumento da resistência do concreto; aumento da altura da laje e, pode-se realizar o preenchimento de alvéolos nas extremidades da peça.

Os alvéolos podem ser preenchidos na pista durante a moldagem das peças ou na obra. Esta medida é adotada para melhorar a resistência da laje alveolar ao cisalhamento.

Quando o preenchimento é realizado na pista, geralmente é empregado o mesmo concreto usado na fabricação dos elementos e esse procedimento é feito antes da liberação da protensão. Desta forma, a seção transversal composta, ou seja, laje juntamente com os alvéolos preenchidos, receberá o efeito da protensão quando da liberação dos cabos.

Quando o preenchimento é realizado em obra, os concretos são diferentes, tanto na idade quanto na resistência e, nesse caso, a liberação da protensão é realizada quando a seção ainda é simples. Devem-se observar maiores cuidados para que o concreto de preenchimento tenha boa aderência com o da laje.

2.6. COMPORTAMENTO DE LAJES SEM ARMADURA DE CISALHAMENTO

As unidades de lajes alveolares são normalmente constituídas por cordoalhas protendidas, posicionadas em uma ou mais camadas na região inferior das nervuras, e em alguns casos também podem ser inseridas cordoalhas na região superior.

Normalmente não há armaduras de cisalhamento, e isso deve ser levado em consideração no dimensionamento das peças. De acordo com Lindstrom (2007), a força de

protensão é introduzida por aderência e o valor de cálculo do comprimento de transferência depende do nível de protensão e do tipo das cordoalhas usadas.

Para uma laje fissurada por flexão, a capacidade resistente da ancoragem das cordoalhas é essencial. Segundo Catoia (2009), em uma situação geral de projeto, a resistência ao cisalhamento, para os relevantes modos de ruptura (por flexão e cisalhamento e por tração devida ao cisalhamento), precisa ser avaliada ao longo do vão da laje alveolar e comparada com valores de cálculo das forças na seção.

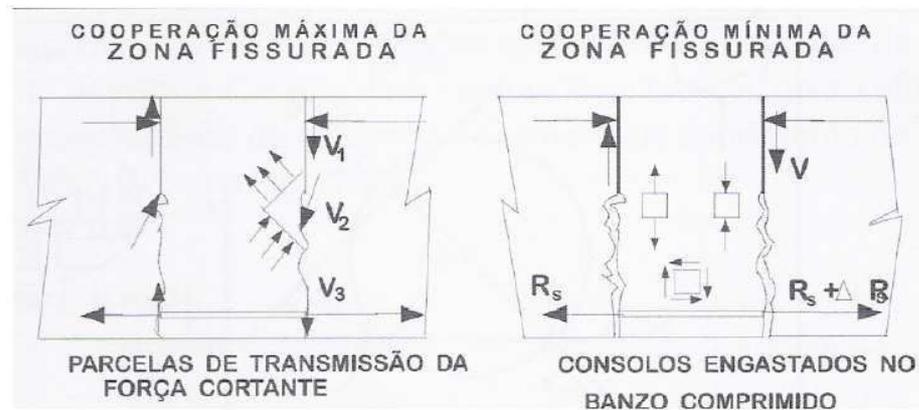
Se uma região próxima ao apoio está fissurada pela flexão, é essencial checar a capacidade de ancoragem para a força real da cordoalha. De acordo com Fusco (2008), nas lajes sem armadura de cisalhamento, a fissuração por flexão pode ocorrer sem a inviabilização da integridade da peça, pois tal fissuração possui menor concentração quando comparada com a das vigas. A ruptura da peça somente ocorre com o surgimento da chamada fissura crítica, que corresponde à primeira fissura inclinada, característica da ruptura por força cortante.

Conforme Fusco (2008), a segurança em relação a estados limites últimos de forças cortantes em peças maciças de concreto sem armadura de cisalhamento é garantida por diferentes mecanismos resistentes. Dois modelos do funcionamento da região de concreto situada entre duas fissuras adjacentes podem justificar a resistência ao cisalhamento de peças fissuradas por flexão. Tais modelos são denominados: modelo de cooperação máxima da zona fissurada (em que é admitida a cooperação máxima do concreto entre fissuras) e modelo de cooperação mínima da zona fissurada (em que é admitida a cooperação mínima do concreto entre fissuras). Os modelos podem ser observados na Figura 2.11.

Ainda segundo Fusco (2008), admite-se, no modelo de cooperação máxima da zona fissurada, que três diferentes mecanismos resistentes alternativos são responsáveis pela transmissão da força cortante ao longo do elemento, sendo que cada mecanismo contribui com a transmissão de uma parcela da força cortante total. Assim, a força cortante é transmitida por meio do banzo comprimido (parcela V1), engrenamento dos agregados (parcela V2) e efeito de pino da armadura (parcela V3).

A parcela V2 é transmitida por meio da fissura de flexão, pelo engrenamento existente entre os grãos do agregado graúdo, e retransmitida adiante por tensões de tração na alma da peça. A parcela V3 é transmitida por meio da fissura de flexão, pela armadura de flexão, que se comporta como um pino de ligação entre as duas faces da fissura, sendo retransmitida adiante por tração no trecho da alma entre duas fissuras adjacentes.

Figura 2.11: Modelos da região de concreto situada entre duas fissuras adjacentes



Fonte: FUSCO (2008)

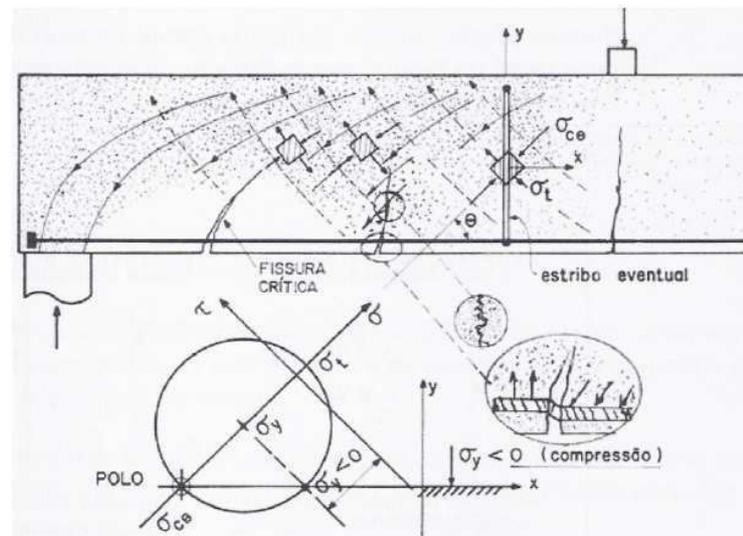
Considerando o segundo modelo (modelo de cooperação mínima da zona fissurada), admite-se a transmissão integral da força cortante pelo banzo comprimido da peça, e que os trechos da alma entre duas fissuras adjacentes tenham o comportamento de consolos engastados no banzo comprimido, que permitem a variação da força de tração na armadura de flexão ao longo do comprimento desses trechos.

Esse modelo admite que o mecanismo de viga continue a existir até a ruptura da peça, após a formação da fissura crítica, sendo que a resistência à força cortante seria garantida pela resultante das tensões no banzo comprimido da peça (cuja componente transversal equilibra a força cortante).

No caso do modelo de cooperação máxima do concreto, admite-se que ocorra uma alteração do mecanismo de funcionamento da peça fletida, a partir do mecanismo de viga, para um comportamento global análogo ao mecanismo de treliça, em que as tensões diagonais de tração permitem a resistência da peça, como pode ser observado na Figura 2.12.

Fissuras com superfícies bastante irregulares contribuem para que ocorra a alteração do mecanismo resistente ao cisalhamento, pois permitem, ao longo delas, a transmissão de forças por meio do engrenamento dos grãos do agregado graúdo. Tal engrenamento permite a transmissão de forças oblíquas através das fissuras.

Figura 2.12: Resistência ao cisalhamento em peças fissuradas



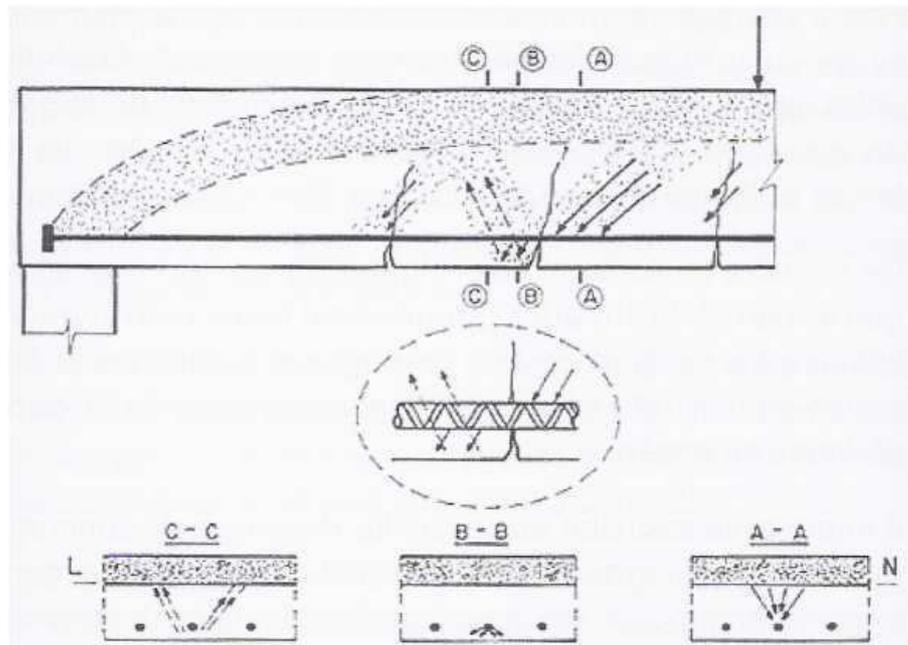
Fonte: FUSCO (2008)

De forma análoga, a maior rigidez do aço em relação ao concreto fornece às barras da armadura longitudinal a capacidade de funcionarem como pinos de ligação, que possibilitam a solidarização dos dois trechos da peça separados pelas fissuras, aumentando a região do concreto que colabora na transmissão da força cortante. A contribuição do efeito de pino à resistência da peça depende da qualidade do concreto da região de envolvimento das barras de aço da armadura longitudinal (Figura 2.13).

Com o aumento da força cortante, as tensões diagonais de tração chegam à ruptura do concreto, surgindo a fissura crítica, e conseqüentemente a ruptura final da peça.

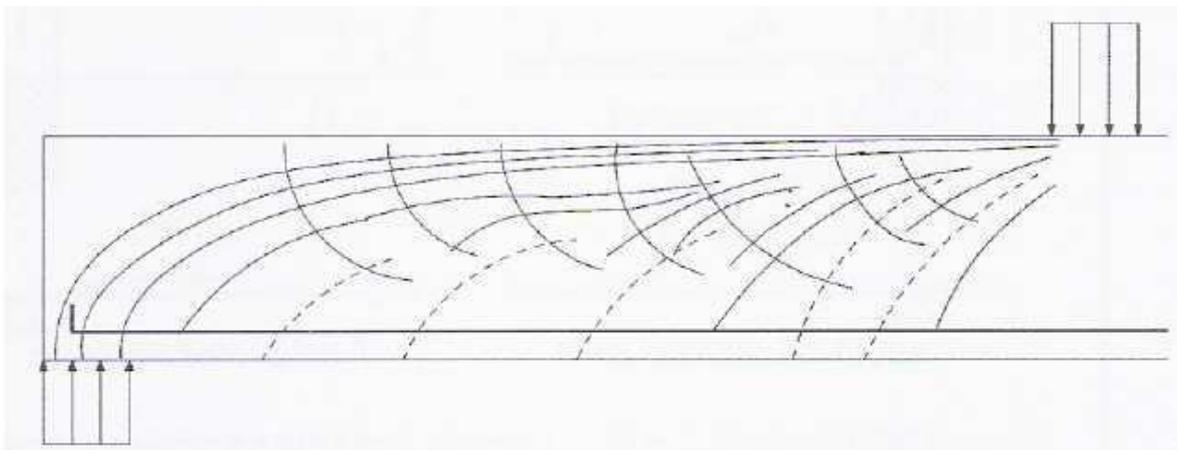
Tendo como base esses mecanismos resistentes a forças cortantes, nas lajes sem armadura de cisalhamento, o andamento geral do fluxo de tensões de compressão, desde as forças aplicadas até os apoios, pode ser idealizado como na Figura 2.14.

Figura 2.13: Direções das forças internas devidas ao efeito de pino, considerando momentos positivos



Fonte: FUSCO (2008)

Figura 2.14: Andamento do fluxo de tensões



Fonte: FUSCO (2008)

A Figura 2.15 ilustra a ruptura de uma laje espessa sem armadura transversal. Neste caso, dois tipos de fissuras podem ser visualizados. As fissuras verticais, ocasionadas pela flexão, ocorrem primeiramente. A partir delas, as fissuras inclinam devido à interação com o esforço cortante. A esse mecanismo dá-se o nome de flexo-cortante.

Figura 2.15: Fissura crítica de flexo-cortante



Fonte: SHERWOOD (2006) apud MARQUESI (2014)

Nos elementos de concreto armado, é muito comum que as fissuras de flexão apareçam antes que a tensão máxima de tração seja atingida na sua alma ou nervura. Desta forma, após a fissuração por flexão, novos equilíbrios são estabelecidos e mecanismos complementares importantes, como o efeito pino da armadura longitudinal e o engrenamento dos agregados se fazem presentes, contribuindo com a capacidade resistente.

Já nos elementos protendidos, a fissuração é retardada de forma a possibilitar que outro mecanismo seja condicionante, como exemplo, a tração diagonal em lajes alveolares (Figura 2.16).

Figura 2.16: Rupturas por tração diagonal em lajes alveolares



Fonte: MARQUESI (2014)

2.7. PESQUISAS REALIZADAS

Várias pesquisas vem sendo realizadas em todo mundo com o objetivo de desenvolver modelos numéricos para a análise e modelos de cálculo simplificados para o projeto de lajes alveolares protendidas submetidas ao cisalhamento.

A seguir serão descritas algumas pesquisas realizadas sobre lajes alveolares no âmbito internacional.

2.7.1. Trabalhos Publicados No Exterior

Walraven (1983) estudou sobre a capacidade resistente de lajes alveolares. Neste estudo, além da resistência à força cortante, o autor aborda a capacidade à flexão e o mecanismo por perda de ancoragem. Quanto à resistência à força cortante, os dois mecanismos foram estudados: flexo-cortante (*flexure shear* ou *shear compression*) e tração diagonal (*tension shear* ou *web shear*). Quanto à tração diagonal, Walraven sugere um coeficiente redutor de 0,75 e não 0,70 na formulação utilizada, devido a resultados contra segurança, principalmente em lajes com alvéolos não circulares. Isso se deve ao fato de lajes com alvéolos oblongos apresentarem maiores regiões numa mesma nervura com largura mínima. Dessa forma a probabilidade de ruptura é maior que nas lajes com alvéolos circulares, onde a largura da nervura é mínima em apenas um ponto.

Yang (1994) propôs em seu trabalho um importante estudo sobre o mecanismo de ruptura por tração diagonal. O pesquisador sugere uma formulação que busca quantificar a

tensão de cisalhamento provocada pela introdução da protensão. A metodologia utilizada para a validação do método foi a modelagem numérica de lajes alveolares através do programa ABAQUS cuja ferramenta de análise é método de elementos finitos. Yang comparou os resultados numéricos com dados experimentais anteriormente realizados. Frente às considerações adotadas, o autor concluiu que a sua abordagem se mostra adequada. No entanto, Pajari (2005) ao analisar um banco de dados comparando o Eurocode2 tradicional com o método de Yang concluiu que, apesar de uma melhora significativa em relação ao Eurocode2, o modelo de Yang ainda é deficiente pelo menos para os dados analisados pelo autor.

Oh e Kim (2000) desenvolveram uma série de ensaios em vigas protendidas buscando avaliar o comprimento de transferência da protensão. Para tanto, os autores instrumentaram as cordoalhas para a medição das tensões após a liberação da protensão. O estudo mostrou para a série de dados analisados, que o comprimento de transferência da protensão diminui com o aumento da resistência do concreto e com o aumento do espaçamento entre as cordoalhas.

Broo H.,Lundgren K. (2002) analisaram lajes alveolares protendidas submetidas ao cisalhamento e a torção, através do método dos elementos finitos. O objetivo da pesquisa é melhorar a compreensão da interação entre cisalhamento e torção em lajes alveolares. No desenvolvimento desta pesquisa foram realizados experimentos e modelagem computacional para análise e comparação dos resultados. A modelagem das lajes para as simulações computacionais foi feita utilizando o programa DIANA 7.2. Inicialmente foram modeladas lajes disponíveis na literatura, estudados por Gabrielsson (1999). Após adquirir conhecimento sobre a utilização do programa, foram feitos os modelos conforme os experimentos realizados pelos próprios autores. A comparação dos resultados dos experimentos com os modelos numéricos mostram que a carga máxima obtida está coerente, isto demonstra que o modelo numérico desenvolvido pelos autores está devidamente calibrado.

Hoogenboom (2005) apresenta através da análise de elementos finitos, fórmulas para homogeneização das propriedades das lajes. O autor calcula e analisa as tensões em locais críticos das lajes. É demonstrado que lajes alveolares protendidas podem vencer grandes vãos sem a necessidade de vigas ou pilares extras. O método proposto é uma forma prática de verificação da capacidade da laje. A partir deste estudo foi desenvolvido um programa para

análise de pavimentos com lajes alveolares. Assim, os projetistas necessitam apenas inserir a geometria do pavimento e o carregamento e o programa faz a análise da estrutura.

Girhammar e Pajari (2008) apresentam um estudo em lajes alveolares com capeamento. O objetivo foi avaliar a possibilidade de redução da altura da seção da laje e em contra partida aumentar a espessura da capa. Obviamente, essa opção só é possível quando a aderência entre capa e laje é adequada e confiavelmente quantificada. Para os modelos ensaiados, as rupturas foram por tração diagonal com aumento teórico 35% devido à seção composta. Esse aumento foi comprovado experimentalmente. Portanto, para as condições de aderência avaliadas, o funcionamento foi satisfatório viabilizando a solução investigada.

Brunesi, Bolognini e Nascimbene (2015) avaliaram a capacidade de resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas sem armadura transversal através de um programa que utiliza o método dos elementos finitos com análise não-linear e compararam os resultados com dados de ensaios experimentais previamente realizados. O estudo investigou o modo de ruptura das unidades analisadas e o comportamento das mesmas com a variação da seção transversal utilizando alvéolos circulares e oblongos. O resultado final da pesquisa mostra a influencia da forma do alvéolo na resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas.

2.7.2. Trabalhos Nacionais

Fernandes (2007) iniciou os estudo sem lajes alveolares no NETPRE/UFSCar (Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto situado na Universidade Federal de São Carlos) propondo procedimentos de ensaios baseados em recomendações européias. Além disso, o autor analisou alguns experimentos validando os métodos sugeridos.

Teixeira e Silva, Araújo e Antunes (2009) pesquisaram a resistência de lajes alveolares quando submetidas à força cortante, avaliando a influência da capa de concreto estrutural e do preenchimento dos alvéolos através de ensaios experimentais. Assim, validaram de forma satisfatória o uso da equação proposta pela NBR 6118:2003, originalmente proposta para avaliar a resistência ao cisalhamento de lajes maciças de concreto sem armadura transversal, para avaliar a resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas sem a presença de capa estrutural e sem o preenchimento dos alvéolos. Quanto às lajes alveolares com

preenchimento parcial dos alvéolos, a mesma equação, não avaliou de forma satisfatória a resistência ao cisalhamento da laje. Para lajes com a presença de capa estrutural, o uso dessa equação descreveu de forma satisfatória a resistência ao cisalhamento das lajes alveolares.

Petrucci (2009) apresenta a teoria aplicada para o desenvolvimento dos cálculos e verificações nos estados limites último e de serviço, levando-se em conta o comportamento dos elementos à flexão, ao cisalhamento, assim como as deformações excessivas, além de tratar das perdas de protensão. Assim, criou um roteiro para resolver problemas numéricos, os quais partem de uma seção pré-estabelecida, com base em tabelas publicadas pelos fabricantes, em que relacionam a sobrecarga e o vão máximo que a laje pode atingir. Em seguida, são comparados os resultados obtidos através do roteiro de cálculo com as tabelas e pode-se dizer que as tabelas de pré-dimensionamento estudadas apresentam valores aproximados. Observou-se que as tabelas não contemplam valores para situações não usuais de ações como a ocorrência de cargas concentradas, também não fornecem esquemas estruturais que não sejam somente bi-apoiadas como peças em balanço e lajes com continuidade.

Costa (2010) investigou procedimentos de ensaios para a avaliação de desempenho de lajes alveolares, com base nas referências internacionais. E apresentou recomendações para adequações e aplicação destes procedimentos na realidade brasileira. São apresentados ensaios de cisalhamento e de flexão, onde foram avaliados elementos de laje sem capa e com capa, com e sem preenchimento de alvéolos. Estes resultados foram validados com base na comparação com resultados obtidos por modelos teóricos. A principal contribuição foi a revisão e a sistematização dos procedimentos de ensaios de lajes alveolares, ficando evidente as diferenças de requisitos e de condução de ensaios segundo diferentes propósitos de avaliações experimentais, como ensaios propriamente de pesquisa, ensaios de validação de produto e ensaios para controle da qualidade. O texto deste estudo foi submetido ao projeto da NBR-14861:2009 – *Lajes alveolares protendidas de estruturas de concreto pré-fabricadas – requisitos e procedimentos* apresentando as principais recomendações de procedimentos para estes tipos de ensaios.

Catoia (2011) avaliou o comportamento de lajes alveolares de uso corrente no Brasil (alturas até 200 mm e alta protensão) quanto ao cisalhamento em região fissurada por ação do momento fletor, para diferentes situações: sem e com capa e com preenchimento parcial de

alvéolos. Foi desenvolvido um estudo teórico com o emprego de equacionamentos analíticos disponíveis na literatura técnica, envolvendo as recomendações da norma brasileira NBR 6118:2003 (Projeto de Estruturas de Concreto), do ACI-318:2008 (*Building code requirements for structural concrete*) e da EN 1992-1-1 (2004) (Eurocode2- Projeto de estruturas de betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios). Foram analisados 96 ensaios, sendo 31 de flexão e 65 de força cortante sendo que, uma parte dos modelos foi ensaiada durante o desenvolvimento da pesquisa, e outra parte foi ensaiada anteriormente. Com as diversas análises, considerando os ensaios experimentais e um vasto estudo teórico quanto ao dimensionamento dessas lajes, verificou-se a adequabilidade de equações de diferentes normas. Assim, foi possível identificar o equacionamento que melhor representa o comportamento das peças produzidas no Brasil. Com esta pesquisa, foi possível contribuir para a padronização do dimensionamento junto a norma brasileira NBR 14861 (Laje pré-fabricada – Painel alveolar de concreto protendido).

Antunes (2011) focou no desempenho de lajes alveolares com alvéolos preenchidos. Para a realização dos experimentos foram produzidas oito lajes de 16cm de altura, 120cm de largura e 4m de comprimento. As lajes foram classificadas primeiramente, de acordo com a presença ou não de capa estrutural com 5cm de espessura e, em seguida, pelo preenchimento dos alvéolos. A concretagem parcial dos alvéolos ocorreu 12 dias após a concretagem da lajes, enquanto que a concretagem da capa estrutural ocorreu 9 dias após o preenchimento dos alvéolos. O preenchimento dos alvéolos se estendeu até 50cm no sentido longitudinal de cada extremidade da laje. Primeiramente foi determinada a rugosidade da superfície superior da laje alveolar e posteriormente foi realizado o ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento das lajes. Os resultados obtidos validaram de forma satisfatória o uso da equação proposta pela NBR 6118(2003), originalmente desenvolvida para avaliar a resistência ao cisalhamento de lajes maciças de concreto sem armadura transversal, para avaliar a resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas sem a presença de capa estrutural e sem o preenchimento dos alvéolos. Quanto às lajes alveolares com preenchimento parcial dos alvéolos, a mesma equação, proposta pela NBR 6118(2003), não avaliou de forma satisfatória a resistência ao cisalhamento da laje. Já para as lajes alveolares com a presença de capa estrutural, o uso dessa equação proposta para lajes maciças de concreto sem armadura transversal descreveu de forma satisfatória a resistência ao cisalhamento das lajes alveolares, desde que seja garantida uma boa aderência entre a capa estrutural e a superfície superior da laje alveolar, resultando no não descolamento da capa.

Camillo (2012) apresenta um roteiro de cálculo e verificações baseado em modelos teóricos que seguem as instruções das normas brasileiras e ensaios anteriormente realizados considerando a continuidade das lajes alveolares através da adição de armadura passiva na capa das lajes. Detalhou os procedimentos de cálculo também para as situações em que existem ações acidentais alternadas, assim como, para a situação em que há cargas concentradas móveis atuantes no pavimento. Exemplos numéricos comparando a situação de continuidade com a situação simplesmente apoiada mostram que é possível alcançar: economia na armadura longitudinal ativa, aumento do valor de carga acidental atuante e atender às verificações de deformação excessiva não atendidas em um sistema simplesmente apoiado. Apontou também em quais situações a consideração da continuidade não chega a trazer grande vantagem. No caso de cargas acidentais concentradas que atuam ao longo do pavimento, o exemplo mostrou-se vulnerável ao valor excessivo da força cortante próxima ao apoio. Isto porque a laje alveolar continua só atende aos requisitos de força cortante com o preenchimento dos alvéolos e o preenchimento necessário é quase do comprimento total da laje.

Marquesi (2014) estudou os mecanismos condicionantes à ruptura por força cortante em lajes alveolares. Analisou 39 experimentos coletados na literatura e desenvolveu um programa experimental em que foram ensaiadas 15 lajes alveolares variando a distância entre a extremidade da laje e seu apoio mais próximo. Todas as rupturas foram pelo mecanismo de tração diagonal. Concluiu que o comprimento de transferência de protensão estabelecido pela NBR14861 está adequado para as lajes ensaiadas pela correlação com os resultados dos ensaios de ruptura por força cortante.

3. METODOLOGIA DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS REALIZADOS POR MARQUESI (2014)

Nesta seção descreve-se a metodologia de ensaio, as características dos modelos ensaiados e os esquemas dos experimentos realizados por Marquesi (2014), a partir dos quais foram desenvolvidos os modelos para simulação numérica que está apresentada no presente trabalho.

O programa experimental englobou duas etapas: Etapa A e Etapa B, neste trabalho foram analisados os experimentos da Etapa A. Nesta primeira etapa foram realizados 9 experimentos, sendo que 8 foram analisados. O experimento não apresentado foi um ensaio de flexão que devido a problemas técnicos não foi completado.

Todas as lajes alveolares da Etapa A são de uma mesma pista de protensão e, portanto, possuem as mesmas características como resistência do concreto, tipo e número de cordoalhas, nível de protensão e dimensões. Todas possuem nominalmente 26,5cm de altura e foram cortadas com 6m de comprimento.

As lajes foram denominadas de forma geral como Lajes A e de forma específica pela seguinte nomenclatura: LXXX-C-Y. Os quatro primeiros caracteres referem-se à numeração das lajes alveolares: laje alveolar número XX. O caractere seguinte refere-se à tipologia do ensaio, sendo C referência à força cortante. E por fim, a última letra refere-se à etapa do programa experimental, A ou B.

A preparação dos experimentos consistiu primeiramente na medição das características geométricas das lajes (Figura 3.1), tais como, altura (h_i) e largura das nervuras (b_i), distância do centro das cordoalhas até a borda inferior das lajes (d'_i), comprimento das lajes, largura total e dimensões dos alvéolos.

Foram feitas marcações nas lajes alveolares para possibilitar o seu posicionamento em relação aos apoios e ao atuador. Para o apoio das lajes, foram utilizadas vigas metálicas enrijecidas, sobre as quais foram colocadas duas chapas metálicas, com uma camada inicial de graxa de aproximadamente 3mm entre elas. A finalidade da graxa é mitigar uma possível restrição horizontal nos apoios, como mostra a Figura 3.2.

Sobre as chapas metálicas, colocou-se uma viga de madeira com a parte superior chanfrada, e sobre ela, uma tira de elastômero, como mostra a Figura 3.3. Após o posicionamento dos apoios de acordo com o esquema de cada ensaio, colocaram-se as vigas de transmissão de carga sobre a laje. Em algumas regiões da superfície das lajes, utilizou-se massa plástica ou areia úmida para regularizar a área de contato com as vigas (Figura 3.4).

Figura 3.1: Medição realizada com paquímetro na seção transversal da laje



Fonte: MARQUESI (2014)

Figura 3.2: Preparação do apoio para as lajes. a: aplicação da graxa na chapa inferior. b: posicionamento da chapa superior.



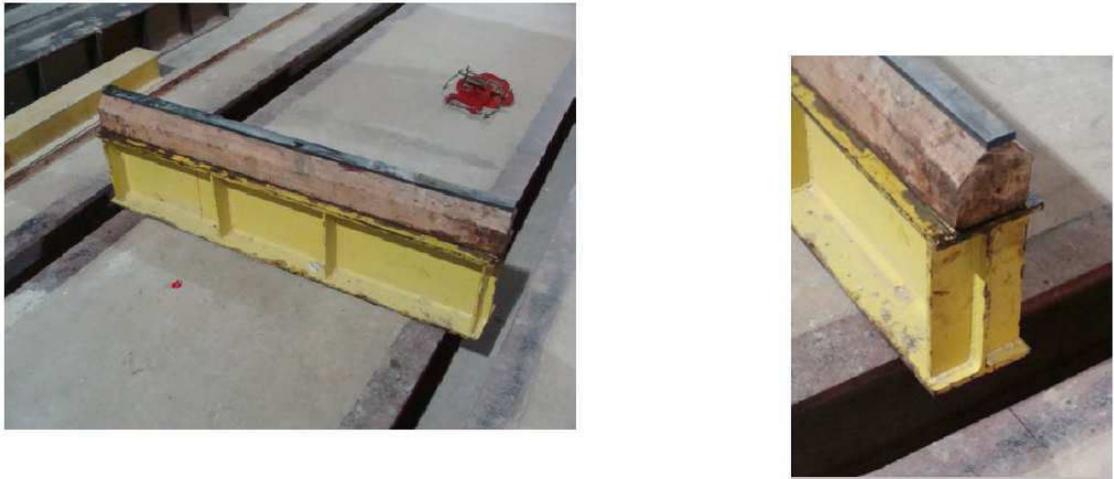
a



b

Fonte: MARQUESI (2014)

Figura 3.3: Apoio para os ensaios das lajes



Fonte: MARQUESI (2014)

Entre as vigas de transmissão e as células de carga, foram colocadas rótulas para evitar possíveis excentricidades e chapas metálicas para ajuste da altura quando necessário (Figura 3.5).

Após a preparação do ensaio, aplicou-se uma pré-carga de aproximadamente 2,0 kN para acomodação da viga de transmissão de carga. A taxa de aplicação de carga durante o ensaio foi de aproximadamente 50 kN/min.

Figura 3.4: Regularização da superfície das lajes na região de contato com a viga de transmissão. A: com areia úmida. B: com massa plástica



Fonte: MARQUESI (2014)

Figura 3.5: Vigas de transmissão, rótulas e chapas metálicas posicionadas



Fonte: MARQUESI (2014)

Para os ensaios da Etapa A utilizaram-se dois atuadores hidráulicos de 500kN de capacidade da marca ENERPAC. Uma bomba manual foi utilizada para alimentar os atuadores.

Dois transdutores (Figura 3.6) foram posicionados na linha de atuação da carga, ou imediatamente ao lado, para aferição dos deslocamentos ao longo do ensaio.

Sobre a laje fixaram-se chapas metálicas para não haver interferência da sua rugosidade na medição dos deslocamentos. Duas células de carga, de 500kN, foram utilizadas para fornecer leituras das forças aplicadas na Etapa A.

O esquema geral da instrumentação utilizada esta representado na Figura 3.7.

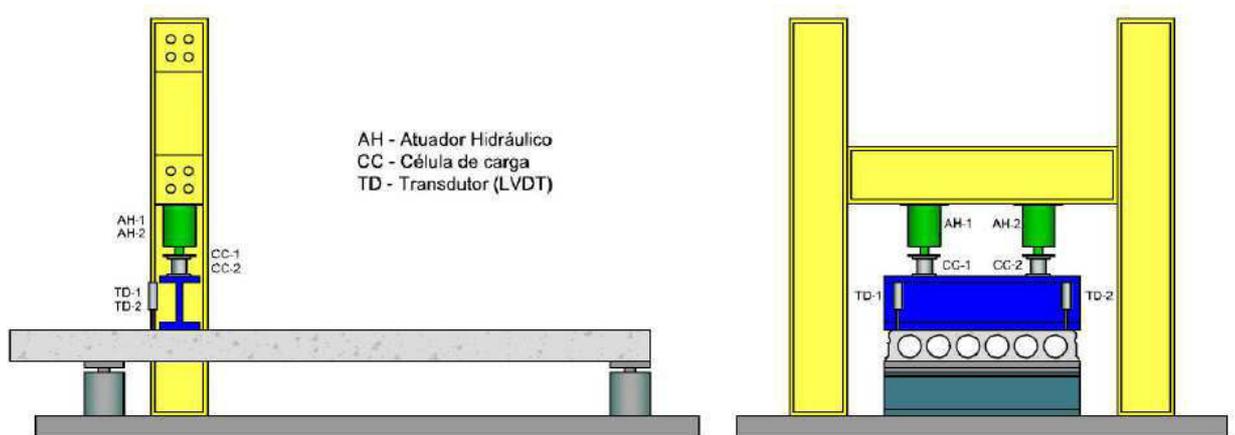
Para a aquisição dos dados foi utilizado o System 5000. Nele foram conectados os cabos de todos os instrumentos utilizados nos ensaios permitindo a transferência das leituras feitas para o computador (Figura 3.8).

Figura 3.6: Transdutor (LVDT) para medição de deslocamentos.



Fonte: MARQUESI (2014)

Figura 3.7: Esquema geral da instrumentação utilizada nos ensaios de força cortante



Fonte: MARQUESI (2014)

Figura 3.8: Sistema de aquisição de dados



Fonte: MARQUESI (2014)

3.1. DESCRIÇÃO DOS MODELOS ENSAIADOS

As lajes ensaiadas por Marquesi (2014) foram fornecidas por duas empresas por meio da ABCIC (Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto).

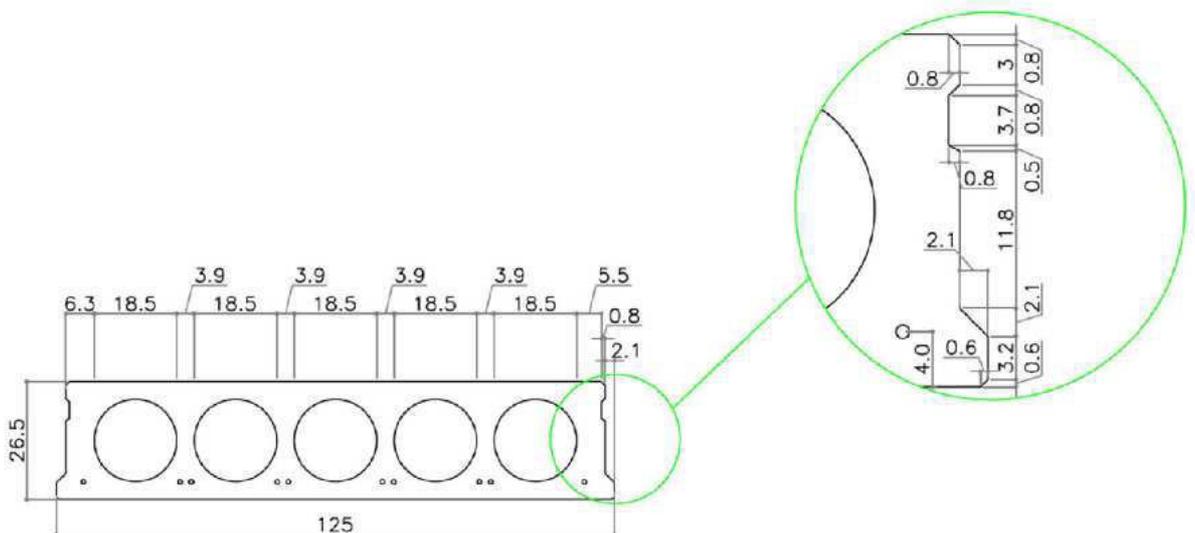
No Quadro 3.1 são apresentadas as características dos modelos das Lajes A.

Quadro 3.1 – Nomenclaturas e características das Lajes A

	h_{nominal} (cm)	$b_{w, \text{nominal}}$ (cm)	Armadura inferior	$F_{p, \text{inicial}}$ inferior (KN)	$f_{c, \text{saque}}$ (MPa)	f_c (MPa)
LA02-C-A	26,5	28	10 ϕ 12,7	124,5	25	45
LA03-C-A						
LA04-C-A						
LA05-C-A						
LA06-C-A						
LA07-C-A						
LA08-C-A						
LA09-C-A						

Fonte: MARQUESI (2014)

Na Figura 3.9 é apresentada a seção transversal nominal ou de projeto das lajes alveolares utilizadas na Etapa A. A Figura 3.10 apresenta a seção transversal real de uma das lajes ensaiadas.

Figura 3.9: Seção transversal nominal das Lajes A

Fonte: MARQUESI (2014)

Figura 3.10: Seção transversal LA06-C-A



Fonte: MARQUESI (2014)

Notam-se algumas diferenças na geometria em relação à seção de projeto, a citar, irregularidades nos alvéolos e, portanto, na espessura das nervuras E diferenças de posicionamento das cordoalhas tanto em relação à borda inferior quanto em relação ao eixo da nervura. Distâncias como altura e larguras mínimas das nervuras e distâncias do centro das cordoalhas até a borda inferior foram aferidas e os valores médios destas grandezas para cada laje foram utilizados nos estudos realizados por Marquesi (2014).

Considerando que, para as Lajes A, as diferenças de geometria são aceitáveis, grandezas como área da seção transversal, inércia e momento estático em relação ao centróide da seção foram calculados a partir da seção nominal e estão relacionadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Características geométricas das Lajes A

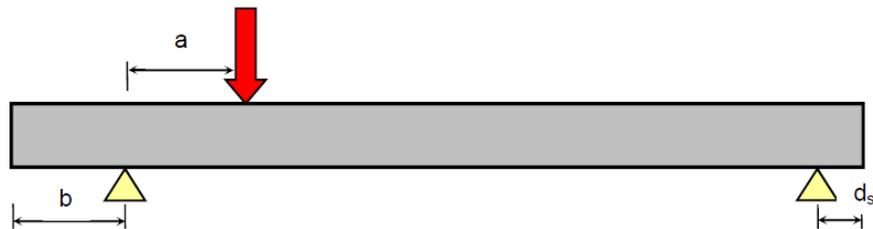
	h (cm)	d' (cm)	d (cm)	Σb_w (cm)	e_p (cm)	A (cm ²)	I (cm ⁴)	S (cm ³)	y_i (cm)
LA02-C-A	26,63	4,34	22,29	31,41	8,96	1869	160457,6	8038,8	13,3
LA03-C-A	26,62	4,48	22,14	30,11	8,82				
LA04-C-A	26,92	4,64	22,28	29,91	8,66				
LA05-C-A	26,78	4,41	22,37	30,25	8,89				
LA06-C-A	26,64	4,58	22,06	30,25	8,72				
LA07-C-A	26,45	4,61	21,84		8,69				
				31,66					
LA08-C-A	26,41	4,45	21,96	30,00	8,85				
LA09-C-A	26,43	4,38	22,05	30,00	8,92				

Fonte: MARQUESI (2014)

3.2. ESQUEMA DOS ENSAIOS

A seguir apresentam-se as informações dos esquemas dos ensaios. A Figura 3.11 mostra o esquema geral. No Quadro 3.3 são apresentados os valores de a , b e d_s para cada laje ensaiada. Todas as lajes possuem 600cm de comprimento com variação de $\pm 0,5$ cm. Essa variação foi desprezada.

Figura 3.11: Esquema geral dos ensaios



Fonte: MARQUESI (2014)

Quadro 3.3 - Características dos esquemas dos ensaios

	a (cm)	b (cm)	d_s (cm)
LA02-C-A	66,25	13	40
LA03-C-A	66,25	6,35	50
LA04-C-A	66,25	19	40
LA05-C-A	66,25	31,75	20
LA06-C-A	66,25	44,5	10
LA07-C-A	66,25	63,5	10
LA08-C-A	66,25	89	10
LA09-C-A	66,25	108	10

Fonte: MARQUESI (2014)

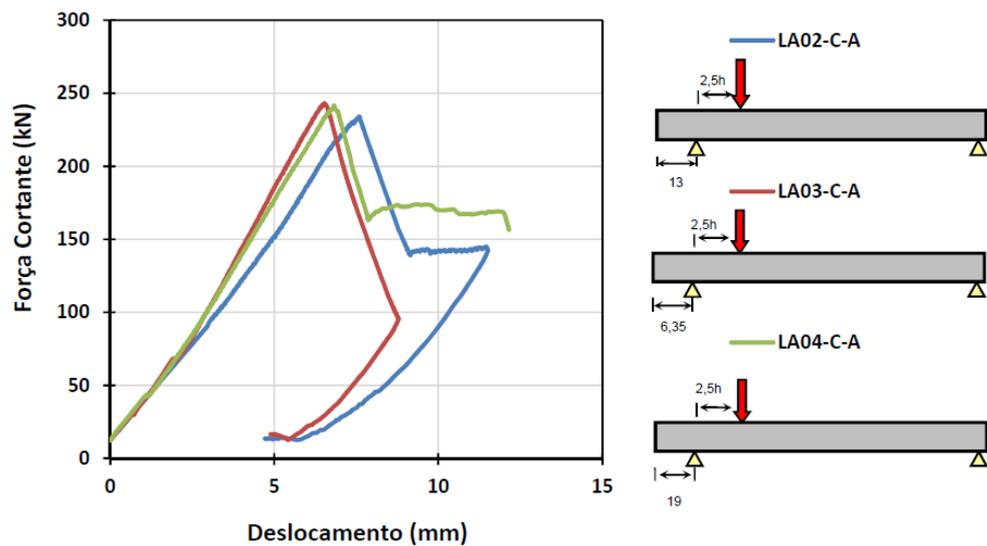
3.3. PRINCIPAIS RESULTADOS – LAJES A

Marquesi (2014) utiliza seus resultados experimentais para comparar com modelos de cálculo para tração diagonal apresentados no EC2, EN1168 e ACI318. Além destes, e apesar de se tratar de análise de flexo-cortante, o modelo da NBR14861 foi utilizado para demonstrar a disparidade existente quando se compara o resultado de um fenômeno físico com uma formulação desenvolvida para representar outro. Adicionalmente, Marquesi propõe um modelo para tração diagonal para a ABNT NBR 14861:2011.

Marquesi (2014) apresenta as curvas de força cortante versus deslocamento medido já considerando o peso próprio da laje e dos aparatos de ensaio. Nas figuras a seguir, a indicação da distância entre a extremidade da laje e o apoio está em centímetros e h se refere à altura da laje, também em cm.

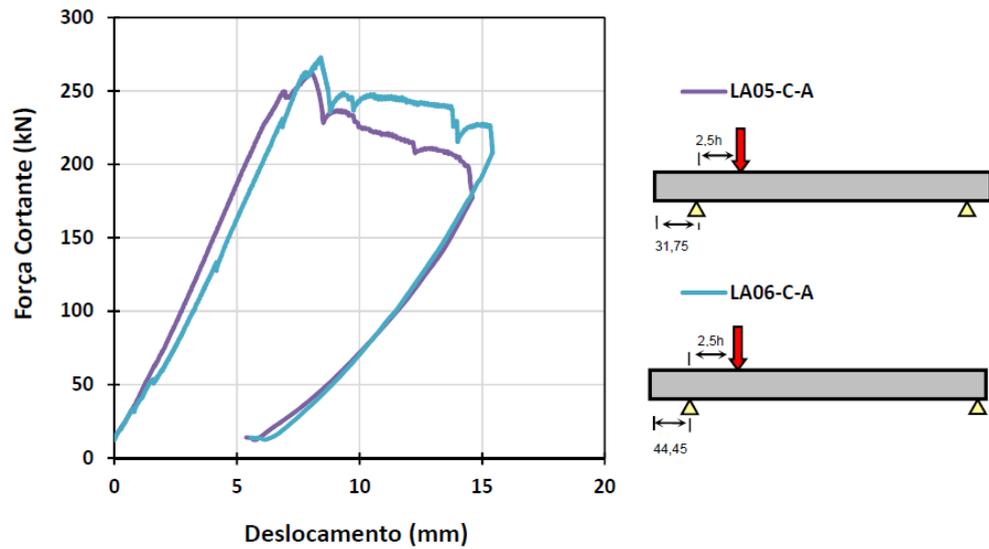
Todas as rupturas das Lajes A foram por tração diagonal. As lajes LA02, LA03 e LA04 tiveram comportamentos semelhantes mesmo havendo alteração na distância entre a extremidade da laje e o apoio (Figura 3.12). As lajes LA-05 e LA-06, cujas distâncias foram de 31,75 e 44,45, respectivamente, resistiram mais que as anteriores (Figura 3.13)..

Figura 3.12: Força cortante vs. deslocamento: LA02, LA03 e LA04



Fonte: MARQUESI (2014)

Figura 3.13: Força cortante vs. Deslocamento: LA05 e LA06

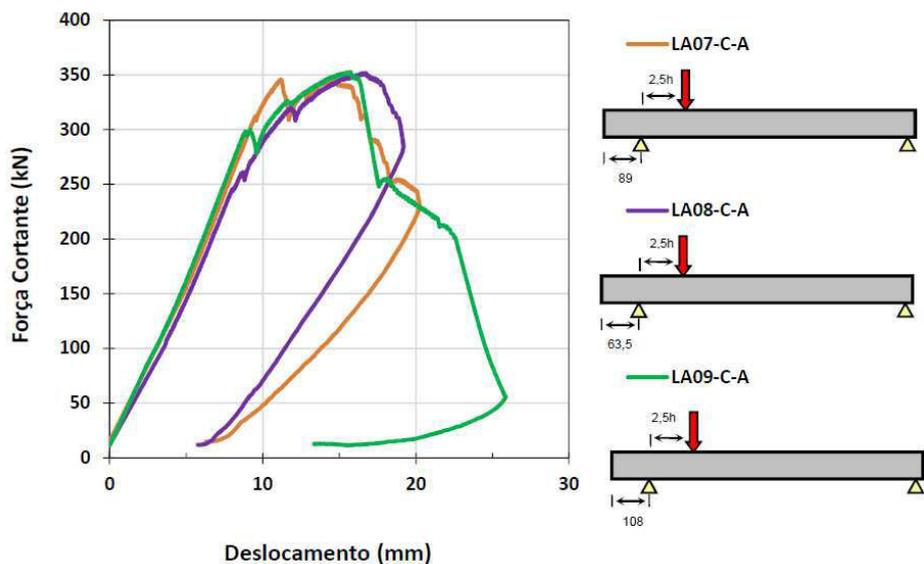


Fonte: MARQUESI (2014)

Algumas lajes, como por exemplo, a LA05, tiveram rupturas de nervuras antes da carga máxima final. Isso pode ser observado no gráfico quando uma queda súbita de carga ocorre, mas logo em seguida o carregamento continua a crescer. Em geral, a ruptura total da laje ocorre muito próxima a eventuais rupturas isoladas de nervuras. (MARQUESI, 2014)

As lajes LA07, LA08 e LA09 tiveram crescimento mais acentuado no valor da carga resistida. As respectivas distâncias entre a extremidade da laje e o apoio foram 63,5cm, 89cm e 108cm (Figura 3.14).

Figura 3.14: Força cortante vs. Deslocamento: LA07, LA08 e LA09



Fonte: MARQUESI (2014)

A seguir, apresentam-se ilustrações das lajes antes e após o ensaio.

A Figura 3.17, que ilustra a ruptura da LA09, mostra a fissura partindo inclinada do apoio e tendendo a ficar horizontal. Com o carregamento já elevado, uma fissura na parte superior da laje ocorreu. Ruptura semelhante a esta aconteceu nas lajes LA07 e LA08.

Figura 3.15: Laje LA04 e sua ruptura



Fonte: MARQUESI (2014)

Figura 3.16: Laje LA06 e sua ruptura



Fonte: MARQUESI (2014)

Figura 3.17: Laje LA09 e sua ruptura



Fonte: MARQUESI (2014)

Segundo Marquesi (2014) no mecanismo de tração diagonal não se observa fissuras de flexão nem escorregamentos de cordoalhas antes da fissura característica (inclinada com ângulo variando de 30 a 35 graus, para essas lajes). Marquesi (2014) observou que após essa fissura, as cordoalhas sofrem um escorregamento da ordem de 5mm nas lajes ensaiadas com comprimentos de apoio curtos (LA02, LA03 e LA04). Para as lajes com esse comprimento maior, menores escorregamentos são notados e sugere-se que um mecanismo pós-fissura crítica seja mobilizado principalmente por causa da boa condição de ancoragem. Observa-se que nas curvas de força cortante por deslocamento apresentadas as lajes com maiores distâncias entre a extremidade da laje e apoio conseguem restabelecer o nível de carregamento, sendo inclusive superior, após quedas súbitas de carga, interpretadas como rupturas de nervuras.

4. MODELO NUMÉRICO DESENVOLVIDO NO ABAQUS®

Este capítulo tem como objetivo mostrar como foi desenvolvido o modelo numérico utilizado para a análise do comportamento de lajes alveolares protendidas quanto à resistência à força cortante.

Para desenvolver o modelo numérico foi utilizado o programa de elementos finitos Abaqus/CAE 6.12-1, disponível no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

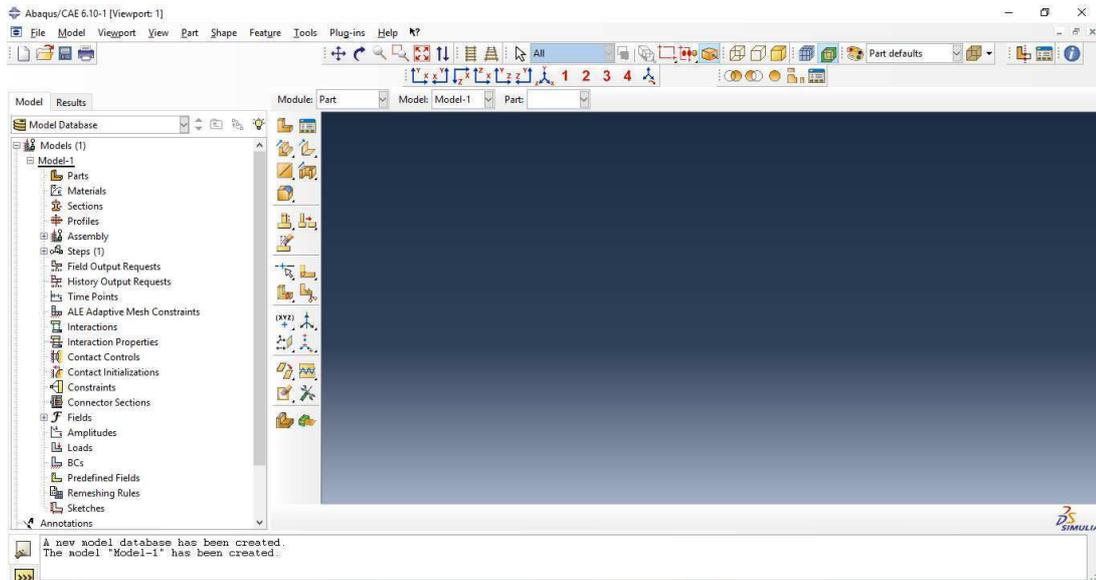
De maneira geral, a simulação numérica foi desenvolvida seguindo-se três passos fundamentais:

- ✓ Concepção do modelo: Aqui foi apresentada a geometria das lajes, definição das malhas de elementos finitos, tipos de elementos a serem utilizados e as propriedades de cada elemento finito;
- ✓ Aplicação dos vínculos e das cargas;
- ✓ Pós-processamento: Nessa fase os resultados obtidos através do programa foram extraídos no formato de gráficos e/ou tabelas. Pretendeu-se num primeiro momento extrair as informações sobre os deslocamentos verticais das lajes para fins de comparações com os resultados experimentais.

O programa Abaqus apresenta diferentes módulos de operação, sendo o Abaqus/CAE 6.12-1 o programa completo com todos os módulos ativos.

A janela *Start Session* surge e a opção *With Standart/Explicit Model* na *Create Model Data base* é selecionada. A janela principal então é aberta. Todo o processo de modelagem passa a ocorrer nesta janela, conforme Figura 4.1.

Figura 4.1: Janela principal do Abaqus



Fonte: Abaqus/CAE 6.12-1

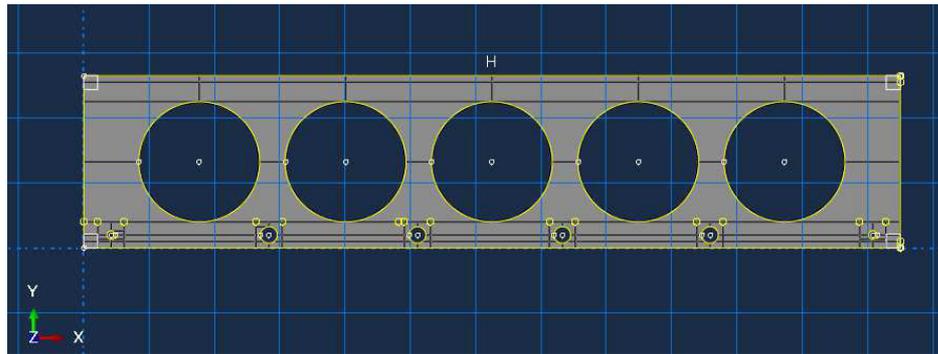
Para dar início a peça, cria-se um modelo virtual com o formato da laje. Na *model tree* clica-se duas vezes sobre o contêiner *Parts*. Altera-se o nome da peça para Laje e *approximate size* para 6000 que corresponde a maior dimensão da peça, as outras opções são aceitas com *default option*.

Todos os valores neste projeto foram colocados no sistema internacional de medidas (SI), já que o programa não pede para especificar unidade de medida, assim deve-se escolher um único sistema no qual irá se desenhar e processar todas as informações.

Para simplificar o modelo da laje a ser simulada as duplas de cordoalhas inferiores foram modeladas como uma única cordoalha com seção transversal de aço equivalente.

Inicia-se o programa na janela *Part*, com as opções *2D*, *deformable* e *shell*, desenhando-se a seção transversal da laje, conforme Figura 4.1. Toma-se como ponto de referência a extremidade inferior esquerda, de modo que fique na origem (0,0).

Figura 4.2: Seção transversal da laje.



Fonte: Abaqus/CAE 6.12-1

Após a criação da seção transversal é dado o comando para extrusão do desenho e para que posteriormente haja facilidade de aplicação da carga e colocação de apoio, criam-se três partições que coincidem com a posição de aplicação da carga e do apoio.

Foram criados também os elementos cordoalhas, concebidos de forma análoga à laje, são desenhados a partir da sua seção transversal.

A partir desta etapa, é necessário a criação dos materiais concreto e aço, primeiramente serão simuladas as lajes considerando o comportamento linear dos materiais e posteriormente será considerado o comportamento não-linear.

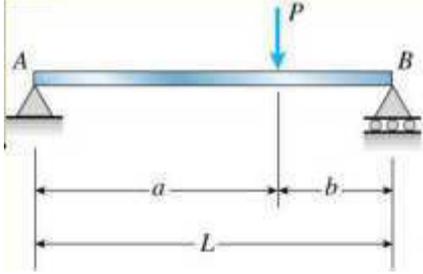
a. Comportamento linear dos materiais

Clicando-se duas vezes no contêiner *Materials* a janela *Edit Materials* se abre. Em seguida modificou-se o nome para aço e selecionou-se *Mechanical > Elasticity > Elastic*; aceitou-se as opções *default* e então foi atribuído para os valores de Módulo de Elasticidade 210.000 (MPa) e para coeficiente *Poisson* 0,2 (NBR 6118:2014).

O mesmo processo foi repetido para criar o material concreto. O módulo de elasticidade real da peça foi obtido a partir das informações do ensaio realizado por Marquesi (2014) representado na Figura 4.3.

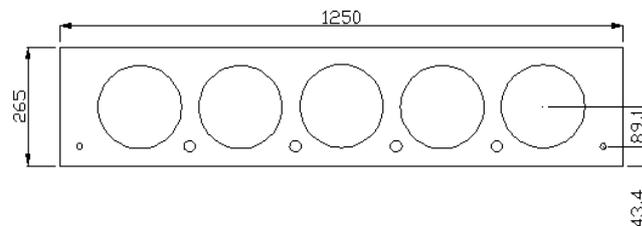
Marquesi (2014) verificou que para este esquema de carregamento a carga máxima resistida pela laje foi de 280.6kN e a flecha máxima foi de 7,5mm. Admitindo o problema da laje como uma viga e conhecendo a fórmula da linha elástica da viga para este carregamento é possível obter o módulo de elasticidade real (E_{real}) da peça objeto deste estudo.

Sendo que a equação da linha elástica para este carregamento é:

	$v = \frac{P \cdot b \cdot a}{6 \cdot E \cdot I \cdot L} (L^2 - b^2 - x^2)$ <p>Onde: E = módulo de elasticidade I = momento de inércia</p>
---	--

A seguir descreve-se os passos para obter o momento de inércia da seção no centro do alvéolo (I_x).

Figura 4.3: Seção da laje alveolar (unidades em mm).



Fonte: MARQUESI (2014)

Segundo Marquesi (2014), a laje possui 10 barras de 12,7mm de diâmetro, ou seja a área de aço A_s é 1010mm^2 . O módulo de elasticidade do concreto E_c dado pelo fabricante da laje é de $11.961,69\text{MPa}$ e para o aço E_s é de 210.000MPa , assim é possível afirmar que:

$$A_{c,eq} = \frac{E_s}{E_c} \cdot A_s$$

$$A_{c,eq} = \frac{210.000}{11.961,69} \cdot 1010 = 17.731,61\text{mm}^2$$

Para obter o momento de inércia da seção no centro do alvéolo (I_x), será necessário calcular o momento de inércia do concreto (I_c). O I_c é obtido pela diferença entre o momento de inércia total da seção (I_{total}) e o momento de inércia do alvéolo (I_{furo}), veja:

$$I_{total} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{1250 \cdot 265^3}{12} = 1938502604,17\text{mm}^4$$

$$I_{furo} = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{\pi \cdot 185^4}{64} = 57498539,35\text{mm}^4$$

$$I_c = I_{total} - 5 \cdot (I_{furo}) = 1651009907,43\text{mm}^4$$

Assim o momento de inércia da seção no centro do alvéolo é:

$$I_x = I_c + A_{c,eq} \cdot d^2 = 1651009907,43 + 17731,61 \cdot (89,10)^2 = 1791777790,21 \text{mm}^4$$

Substituindo os parâmetros calculados anteriormente na equação da linha elástica apresentada, obtém-se o valor para o momento de inércia real (E_{real}) da peça que é igual a 10717,96MPa.

b. Comportamento não-linear dos materiais

Para a simulação do comportamento não-linear do material concreto é necessário a inserção de informações das propriedades do material como: Módulo de Elasticidade, Coeficiente de Poisson, Tensão de Compressão e suas respectivas deformações, assim como a Tensão de Tração e suas respectivas deformações.

O comportamento do concreto após a fissuração é muito incerto devido à redução da inércia ao longo do carregamento e, portanto, deve ser considerada a não-linearidade para o comportamento à tração de maneira cautelosa. (JUNQUEIRA, 2014)

Para isso, devem ser inseridas informações de plasticidade do concreto à compressão e à tração, pois seu comportamento é distinto em relação a cada tipo de solitação. O comportamento à compressão é representado pela curva tensão *versus* deformação do ensaio de compressão axial.

No trabalho de Marquesi (2014) não há registro de ensaios do material para determinação das características do concreto, o que dificultou esta pesquisa, mas para prosseguir com a modelagem estes dados foram obtidos de forma analítica e também conforme descritos na NBR 6118 (2014).

A resistência à compressão do concreto foi dada pelo fabricante das lajes e é de 45Mpa. A resistência à tração na falta de ensaios a tração pode ser obtida conforme NBR 6118 (2014) pela equação:

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot (f_{ck})^{2/3} = 3,84 \text{MPa}$$

O coeficiente de Poisson ν foi tomado como 0,2 (NBR 6118:2003).

O diagrama de tensão *versus* deformação foi obtido a partir das equações propostas na NBR 6118:2014.

Variando-se os valores da deformação, obtém-se os valores das tensões respectivas, conforme Quadro 4.1 e Gráfico 4.1.

$$\sigma_c = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right]$$

Onde:

ε_{c2} é o encurtamento do concreto no início do patamar plástico para concretos até C50 é 2,0‰.

ε_c é a deformação, os valores foram variando para a construção da curva.

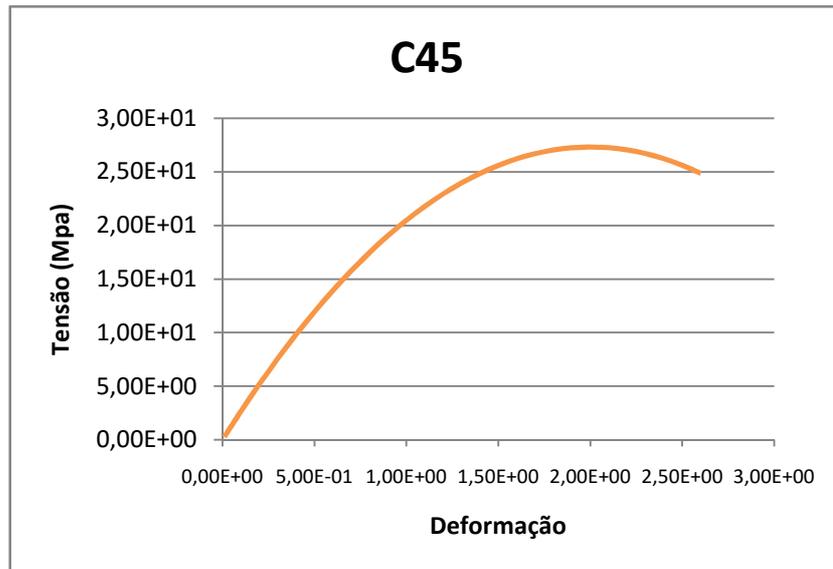
$n = 2$, para $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$

Tabela 4.1: Tensão e respectiva deformação.

Tensão (MPa)	ε_c (‰)
0	0
2,73E-01	1,00E-02
5,191071429	0,2
9,835714286	0,4
13,93392857	0,6
17,48571429	0,8
20,49107143	1
22,95	1,2
24,8625	1,4
26,22857143	1,6
27,04821429	1,8
27,30435268	1,95
27,32142857	2
27,04821429	2,2
26,22857143	2,4
24,8625	2,6

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 4.1: diagrama de tensão *versus* deformação.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para conseguir um comportamento próximo do real para o carregamento em sua totalidade, adicionam-se modelos de comportamento para o material concreto. Para Malm (2006) existem três modelos para concreto passíveis de utilização no Abaqus, sendo eles o *Concrete Smeared Cracking* (análise estática em Abaqus/Standard), *Concrete Damaged Plasticity* (análise tanto estática quanto dinâmica em Abaqus/Standard e Abaqus/Explicit, respectivamente) e *Brittle Cracking* (exclusivamente dinâmica em Abaqus/Explicit). O primeiro e o terceiro utilizam modelo de fissuração distribuída, já o segundo é baseado na teoria de plasticidade (MALM, 2006).

O modelo de plasticidade *Concrete Smeared Cracking* consiste na fissuração distribuída ao longo da malha de elementos finitos, de modo que em sua formulação estão presentes conceitos de Mecânica da Fratura (D'ÁVILA, 2003).

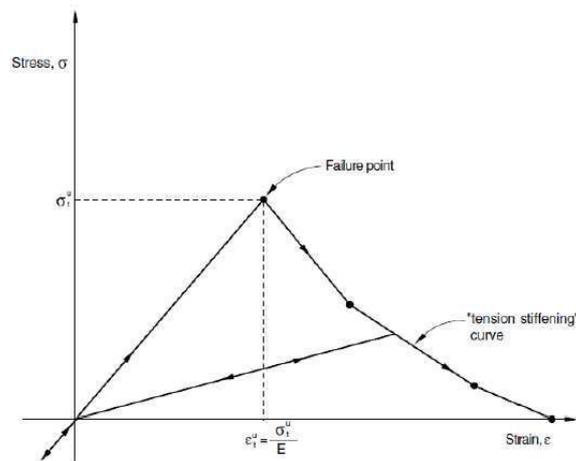
Para d'Ávila (2003), a fissuração de modelos baseados em Mecânica da Fratura é governada predominantemente pela energia de fratura do material. Já os modelos semi-empíricos e os com transferência de tensão têm predominância na resistência à tração do concreto.

Neste trabalho optou-se pelo modelo *Concrete Smeared Cracking*, pois os parâmetros necessários são poucos e podem ser convertidos com base em formulações de algumas referências bibliográficas. Para este modelo foram inseridos os dados da curva tensão versus deformação do concreto.

Após a entrada dos dados à compressão, prossegue-se à inserção dos dados à tração sendo caracterizado na sub-opção *Tension Stiffening*.

Existem dois critérios para se definir o *tension-stiffening* que estão descritos no Manual de Análise do Abaqus (2010). Um deles é o critério da relação tensão-deformação pós-falha no qual se inserem diversos pontos da curva de tensão-deformação do concreto submetido à tração conforme Figura 4.4.

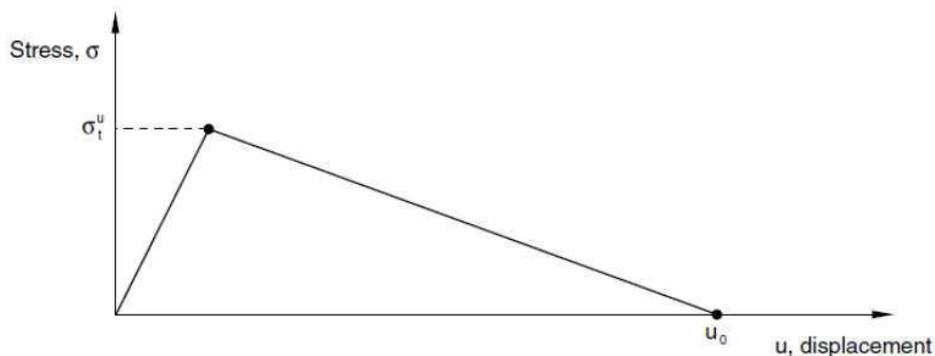
Figura 4.4 – Modelo “tension-stiffening”



Fonte: Abaqus Analysis User's Manual (2010)

O outro critério baseia-se na energia de fraturamento indiretamente pelo parâmetro u_0 que representa o valor de deslocamento em que a deformação pós-fissuração resulta em tensão nula, conforme Figura 4.5.

Figura 4.5 – Modelo de fissuração da Energia de Fratura



Fonte: Abaqus Analysis User's Manual (2010)

Na ausência de dados experimentais, a energia de fratura G_f é determinada, segundo o Código Modelo CEB-FIP 1990, por:

$$G_f = G_{fo} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,7}$$

Onde f_{cm} é a resistência média à compressão do concreto em MPa e G_{fo} é o valor básico da energia de fratura, dado na tabela 4.2 em função do diâmetro do agregado d_{max} .

Tabela 4.2 – Valores básicos da energia de fratura G_{fo} (Nmm/mm²).

D_{max} (mm)	G_{fo} (Nmm/mm ²)
8	0,025
16	0,030
32	0,058

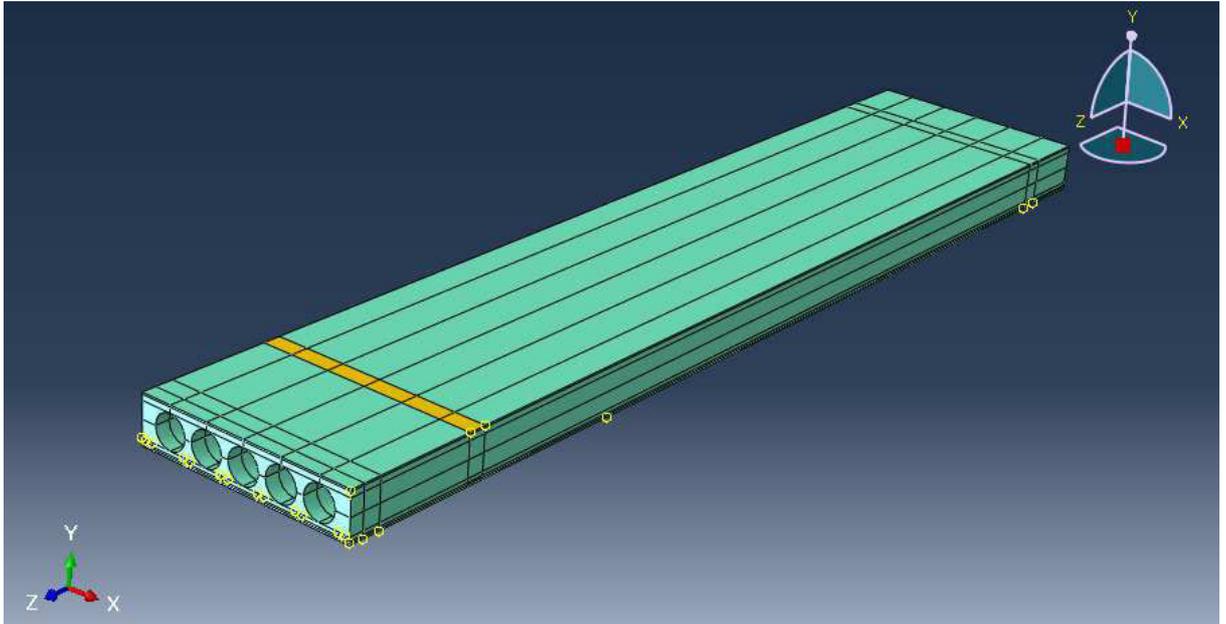
Fonte: CEB-FIP 1990

Este foi o critério escolhido neste trabalho, pois, observando-se a expressão anterior, verifica-se que o modelo necessita de um único parâmetro, a resistência à compressão do concreto, f_{cm} , como dado externo. E o diâmetro do agregado foi adotado como 8 mm, assim o valor da energia de fratura utilizado foi 0,0566.

Após a caracterização dos materiais, para continuar a modelagem deve-se criar seções e atribuí-las de acordo com o material, para tal clica-se no contêiner *Sections* duas vezes, altera-se o nome para a seção aço, aceita-se as opções *default>continue* e na aba *material* seleciona-se o aço. A seção concreto é criada da mesma forma.

Para atribuir o material à seção, em *Parts> Cordoalha >Section Assignments*, a região a ser atribuída a seção é então requisitada, arrastando o mouse pela cordoalha que é selecionada, clica-se em ok e modica-se *Section* para aço. Repete-se o processo para atribuir o concreto a Laje. As peças devem mudar para azul claro indicando que o processo ocorreu. A Figura 4.6 apresenta a laje desenhada com profundidade na *viewport* e os materiais atribuídos.

Figura 4.6: Laje modelada no Abaqus.



Fonte: Abaqus/CAE 6.12-1.

Depois de atribuir a seção em cada peça prossegue-se na montagem do conjunto, posicionando as cordoalhas dentro da laje. Para isso expande-se a guia *Assembly* e clica-se duas vezes em *Instances*. Na janela que se abre seleciona-se *Independente e Auto-offset from others Instances*, seleciona-se “Laje” e clica-se em *Apply*, depois seleciona-se “Cordoalha 1” e clica-se em *Apply*, o processo se repete até todas as peças estarem na mesma *viewport*.

Para posicionar todas as peças em seus devidos locais utiliza-se a ferramenta na *toolbox area > translate instance*.

As cordoalhas foram aderidas ao concreto. Para criar este efeito no modelo clicou-se duas vezes sobre *Constraints*, selecionou-se *type tie* e seleciona-se a região mestra como a cordoalha e região escrava como a região de contato da laje com a cordoalha.

Nos ensaios físicos a laje é biapoiada, para reproduzir tal condição de contorno no programa clicou-se duas vezes sobre o contêiner *Boundary Condition (Bcs)*, modificou-se o nome para condição de contorno, categoria mecânica e tipo *displacement/rotation*. Selecionam-se as laterais inferiores da laje e clica em *done*, a opção U2 (deslocamento vertical restrito) foi marcada. Setas laranja indicam o travamento na direção vertical.

Para distribuir melhor as cargas concentradas no modelo e evitar deformações pontuais foi criado um material mais rígido tanto no ponto de aplicação da carga como nos pontos de apoio.

A seguir, clicou-se em *Create Step* no módulo *Step* e escolheu-se a opção *Static, general* que parece em lista, com *Nlgeom* em *off*, deixando o campo de tempo de período igual a 1 e demais opções aceitas como padrão.

Para este modelo foram criados dois *Steps*, no primeiro foi criada a tensão de protensão e o peso próprio da peça. E no passo seguinte, *Step-02*, foi aplicada a carga do ensaio.

Para a leitura dos resultados desejados, criou-se um *Set Point* no ponto correspondente ao ponto de aplicação da carga na parte superior da laje. Alerta-se ao detalhe de sempre nomear os *Sets* que vão sendo criados manualmente ou automaticamente, de forma lógica cuja finalidade é facilitar a procura posteriormente, seja para definir a saída de resultados do *Field Output* (será comentado a seguir) ou para deletá-la com facilidade quando houver tal necessidade.

Na lateral esquerda da tela há uma “árvore” de opções iniciando-se por *Modell*. Ao clicar no ícone “+” ao lado, abrem-se as demais opções dentro de *Modell* uma dessas opções é a *Assembly* que, ao abri-la é possível ver a opção *Sets*, que é o local onde se encontram todos os *Sets* que foram criados desde o começo da concepção. Ao clicar em um desses, o elemento correspondente a esse *Set* fica evidenciado na cor vermelha no desenho que se encontra ao lado. Procura-se o *Set* correspondente ao ponto onde é aplicada a carga ou o apoio.

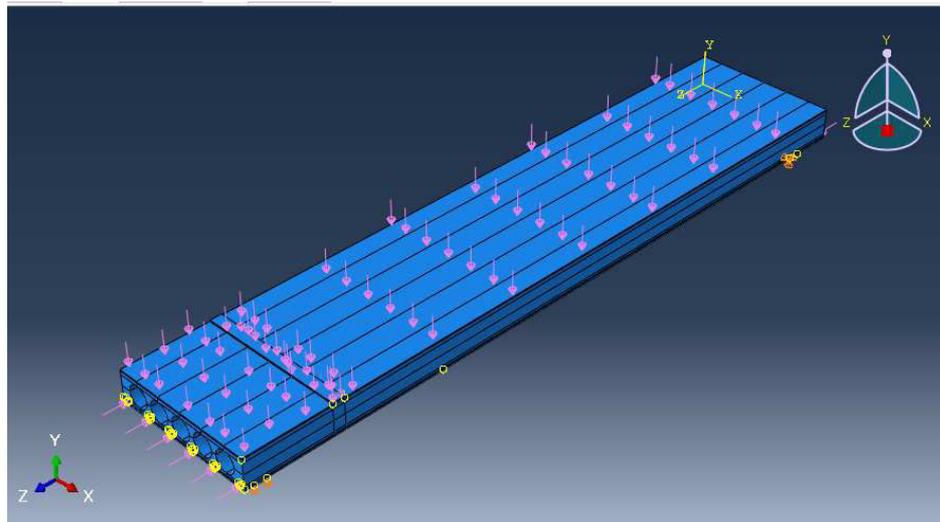
Ao encontrar o *Set* desejado, ou algum outro que se queira renomear ou executar outra ação qualquer, clica-se com o botão direito do *mouse* e então seleciona-se a opção *Rename*. Dentre essas opções existe o *edit*, que possibilita a alteração do *Set*, isto é, basta selecionar o novo local desse *Set*, podendo ser um ponto, aresta, face, etc. Por fim ainda existe a opção *delete* caso houver necessidade de exclusão desse elemento.

Prossegue-se, então com a criação da saída de dados (*Field Output*). Solicita-se um *output* para a variável deslocamento relacionando-a ao *Set Point* correspondente ao ponto de aplicação da carga.

Também dividiu-se a peça de acordo com os vãos das cordoalhas e alvéolos para facilitar a criação da malha posteriormente. Para divisão da peça contou-se com o auxílio da ferramenta *PartitionCell: Define Cutting Plane > Point and Normal*. Para utilizá-la clicou-se duas vezes sobre o contêiner “Laje” em *Parts*, a ferramenta encontra-se na *toolbox area*. Para o correto posicionamento da região de aplicação da carga utilizou-se também a ferramenta *Create a Datum point from offset* em *Tools > Datum*.

Com a peça dividida aplica-se então o carregamento. Para isso seleciona-se *Loads*, força mecânica do tipo pressão na região do plano superior da laje. A força de protensão foi aplicada como uma força de compressão, as forças aplicadas são mostradas pelo software conforme a Figura 4.7.

Figura 4.7: Forças aplicadas na peça



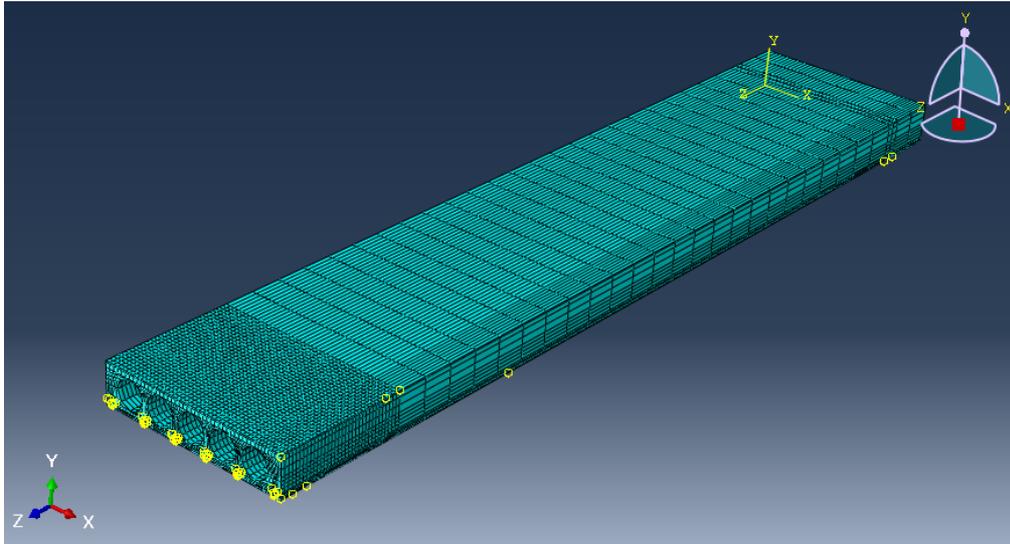
Fonte: Abaqus/CAE 6.12-1.

Ainda nesse mesmo módulo, pode-se inserir as condições de contorno, clica-se na opção *Create Boundary Conditions* e seleciona-se *Displacement/Rotation*, depois seleciona-se o ponto onde se deseja colocar o apoio.

Após toda a montagem do problema, geometria, carregamentos e condições de contorno, segue-se com a criação da malha de elementos finitos.

Para aplicação da malha seleciona-se o contêiner *Mesh* na expansão de “laje” em *Assembly > Instance > “Laje”*. Com um duplo clique a laje na viewport deve se tornar verde. A cor apresentada na laje é de acordo com um dos três possíveis casos de malha a serem geradas. Caso a cor amarela ou vermelha apareça, deve-se dividir a região em partes mais simples como explicado anteriormente. Com a peça toda verde então selecionou-se na barra de menu *Seed > Instance* a peça inteira. Define-se um tamanho para que a malha tenha um certo refino na região de maior interesse na análise, ou seja, mais próximas do ponto de aplicação da carga e o apoio. Então aciona-se o ícone *Mesh Part Instance*, o que gera a malha conforme Figura 4.8.

Figura 4.8: Malha gerada para o modelo.

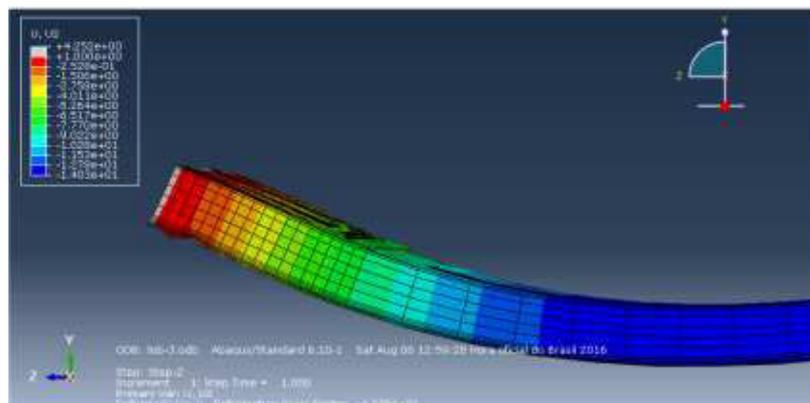


Fonte: Abaqus/CAE 6.12-1.

Nesse momento todos os passos para a montagem do problema estão completos restando simular o modelo e obter os resultados.

O módulo *Job* é acionado e então clica-se na opção *Submit*. O programa pode demorar algum tempo até que a simulação se complete e, após o fim do processo, clica-se em *Results* o que faz com que o software abra automaticamente o módulo *Visualization*. Nesta parte é possível visualizar diversos resultados requeridos anteriormente, nesse caso, queremos o deslocamento vertical da laje. Obtém-se, então as curvas de níveis de faixas de deslocamento vertical conforme Figuras 4.9.

Figura 4.9: Curvas de deslocamento vertical gerada pelo software



Fonte: Abaqus/CAE 6.12-1

O programa não informa as dimensões, pois essas dependem das dimensões de entrada, isto é, como foi adotado o Sistema Internacional de medidas, os valores de deslocamento fornecidos pelo programa computacional Abaqus estão em milímetros.

O “tempo” aqui não representa uma unidade em segundos, minutos ou horas, mas o incremento do que foi definido como carregamento, podendo ser incremento de momento, deslocamento, pressão, carga concentrada, ou qualquer outra variável definida previamente. Nesse caso, como o *Time period* foi definido como 1 em ambos *Steps*, os incrementos variam de 0 a 1, sendo 0 nenhuma carga aplicada e 1 a carga total aplicada, simbolizando o fim da simulação.

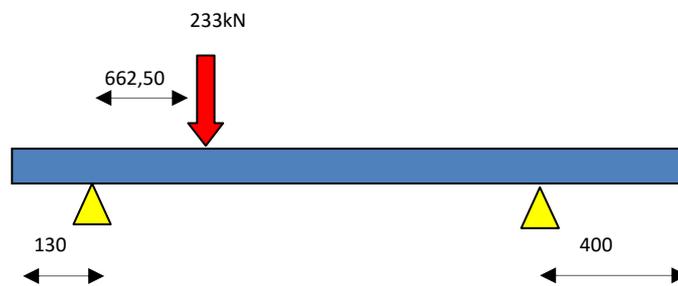
No módulo *Visualization*, clica-se na opção *Create XY Data* e então *ODB field output*. Seleciona-se a opção *position* para *Unique Nodal*, e na lista de variáveis checa-se a caixa de U2 dentro da variável U. No método de seleção, escolhe-se *Node Sets* e então seleciona-se o *Set Point* correspondente ao criado no ponto de aplicação da carga (aqui torna-se fácil encontrar o *Set* já que foi renomeado previamente). A seguir clica-se em *plot* e então aparece o resultado em forma de gráfico.

Para obter os dados do resultado, retira-se uma tabela que represente essa reta. Em *XY Data Manager* Seleciona-se o *Field Data* que se encontra numa lista, e clica-se em editar. Desta forma é aberta a janela com os valores de tempo e deslocamento (X, Y) . Esses dados também podem ser exportados para uma planilha em Excel.

5. RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES

Para a validação do modelo numérico desenvolvido foram simuladas as lajes com o mesmo esquema de carregamento das lajes ensaiadas por Marquesi (2014) na etapa A do seu estudo. Um exemplo de esquema de carregamento está representado na Figura 5.1 que apresenta as características do ensaio da laje LA02-C-A.

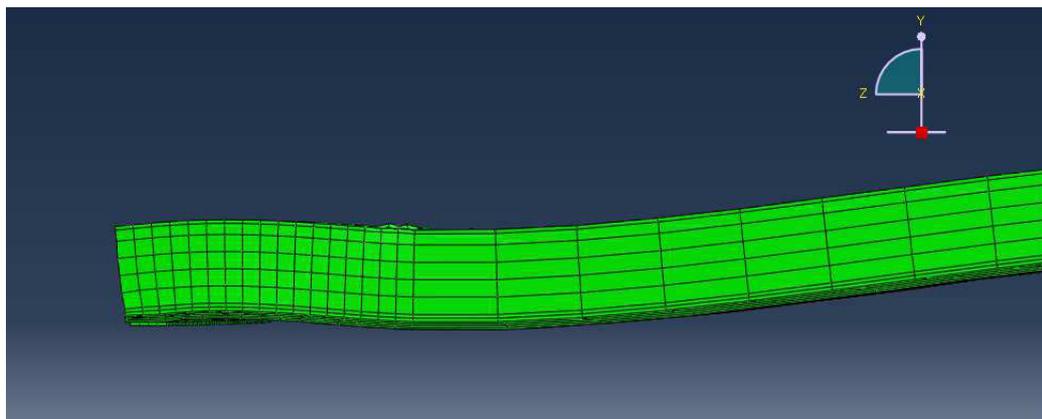
Figura 5.1: Esquema de carregamento para laje LA02-C-A (unidades de medida em mm)



Fonte: adaptado de Marquesi (2014)

O programa pode demorar algum tempo (minutos ou horas) até que a simulação se complete e, após o fim do processo é possível visualizar a laje deformada (Figura 5.2).

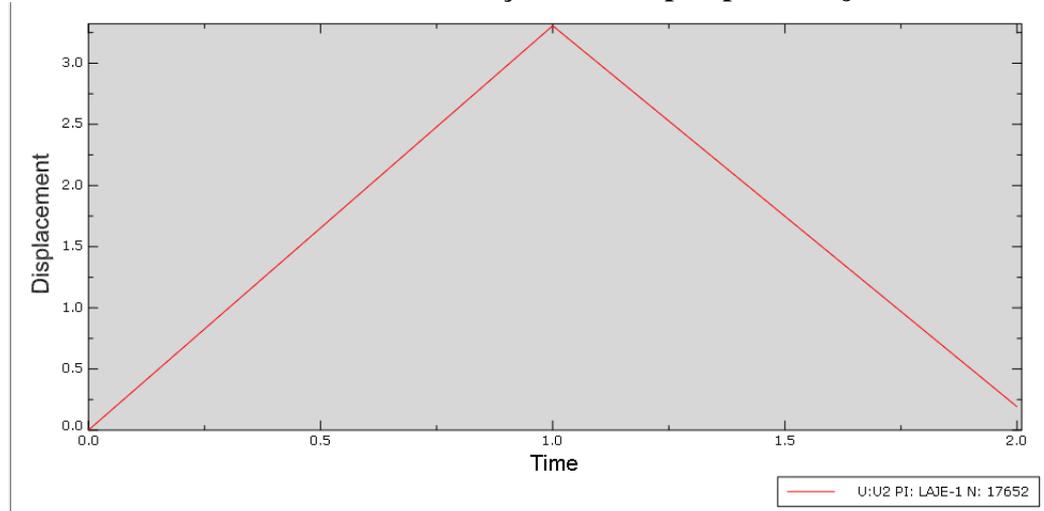
Figura 5.2: Laje LA02-C-A deformada após a simulação



Fonte: Abaqus/CAE 6.12-1.

Após o processamento pelo programa Abaqus o resultado obtido foi extraído no formato de gráfico (Gráfico 5.1) do deslocamento em função do tempo. Como citado anteriormente o tempo aqui representa o incremento de carga em cada Step.

Gráfico 5.1: deslocamento em função do “tempo” para a laje LA02-C-A



Fonte: Abaqus/CAE 6.12-1.

Neste caso o Step-01 (tempo 0-1) representa a ação do peso próprio e a aplicação da protensão na laje, o que gera uma contra-flecha conforme esperado. E os valores para o Step-02 (tempo 1-2) é a aplicação da carga do experimento, gerando o deslocamento vertical.

Para a análise dos resultados a contra-flecha gerada pela ação das cargas aplicadas no Step-01 (peso próprio e protensão) foram desconsideradas da flecha final, pois o objetivo é avaliar o deslocamento gerado pela ação da carga aplicada em cada ensaio.

Foram então simuladas as demais lajes da etapa A do experimento realizado por Marquesi (2014). Organizando os valores obtidos de deslocamento e força por “tempo”, confecciona-se a Tabela 5.1 e 5.2 com os valores de força em função do deslocamento.

5.1. RESULTADOS PARA ANÁLISE COM COMPORTAMENTO LINEAR DOS MATERIAIS

Após a simulação de todas as lajes da etapa A dos experimentos de Marquesi (2014) os resultados foram organizados nas Tabelas 5.1 e 5.2. A partir de cada incremento de carga aplicado foi calculado a respectiva força cortante e feita a leitura do deslocamento vertical no mesmo ponto em que foi feita a verificação nos experimentos.

Tabela 5.1: Resultado das simulações para as lajes LA02 a LA05

LA02-C-A		LA03-C-A		LA04-C-A		LA05-C-A	
Força kN	Deslocamento (mm)						
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
20,5	0,31	25,2	0,96	25,5	0,31	27,6	0,33
41	0,62	50,3	1,91	50,8	0,63	55,3	0,65
61,5	0,93	75,5	2,87	76,3	0,94	83	0,98
82	1,25	100,5	3,83	101,7	1,25	110,6	1,30
102,4	1,56	125,7	4,78	127,1	1,57	138,3	1,63
122,9	1,87	150,5	5,74	152,6	1,88	165,9	1,96
143,4	2,18	176	6,70	178	2,19	193,1	2,28
163,9	2,49	201,2	7,65	203,4	2,50	221,2	2,61
184,4	2,80	226,3	8,61	228,8	2,82	248,8	2,93
204,9	3,11	251,5	9,57	254,3	3,13	276,5	3,26

Fonte: Elaborada pelo autor

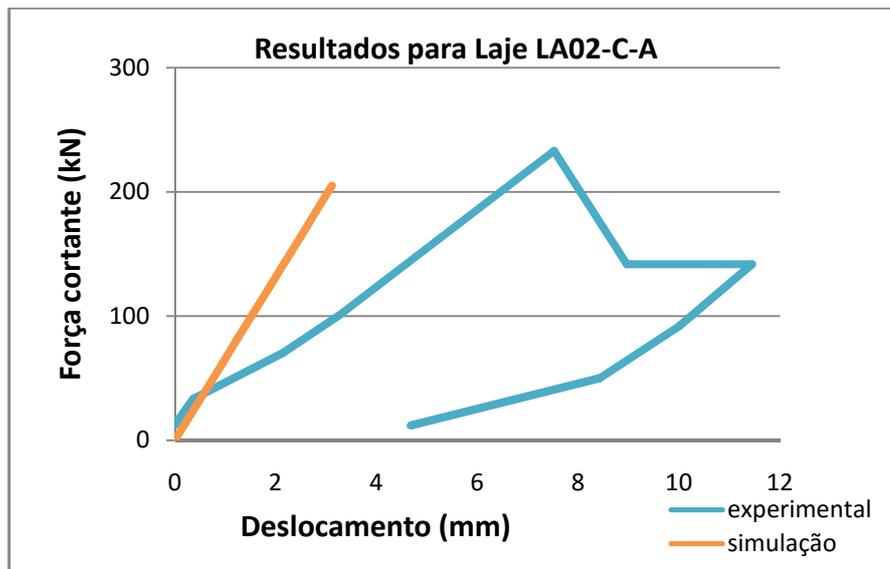
Tabela 5.2: Resultado das simulações para lajes LA06 a LA09

LA06-C-A		LA07-C-A		LA08-C-A		LA09-C-A	
Força kN	Deslocamento (mm)						
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
28,5	0,34	35,5	0,42	36,1	0,41	36,3	0,41
57,1	0,69	71	0,83	72,3	0,83	72,5	0,82
85,7	1,03	106,5	1,25	108,4	1,24	108,8	1,23
114,2	1,37	141,9	1,67	144,6	1,65	145	1,64
142,8	1,72	177,5	2,08	180,7	2,07	181,3	2,05
171,4	2,06	212,9	2,50	216,9	2,48	217,6	2,46
199,9	2,40	248,4	2,92	253	2,90	253,8	2,87
228,5	2,75	283,9	3,33	289,2	3,31	290,1	3,27
257	3,09	319,4	3,75	325,4	3,72	326,3	3,68
285,6	3,43	354,9	4,17	361,5	4,14	362,6	4,09

Fonte: Elaborada pelo autor

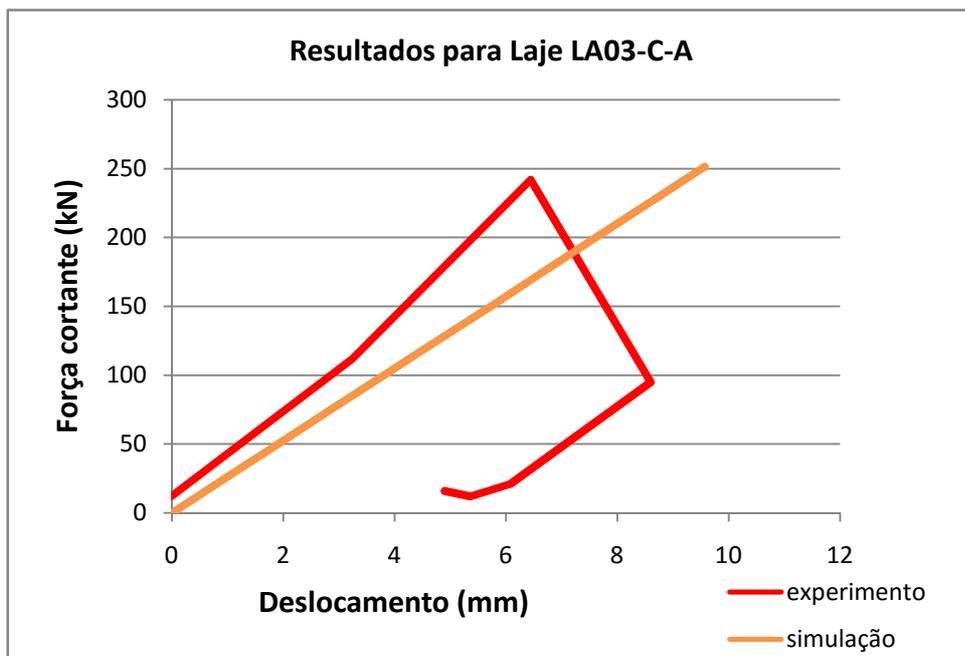
Assim, foi possível comparar os resultados obtidos na simulação com os experimentos realizados através da plotagem da aproximação de ambas as curvas no mesmo plano cartesiano. Foram então gerados os Gráficos 5.2 a 5.9.

Gráfico 5.2: Força Cortante *versus* deslocamento para laje LA02-C-A



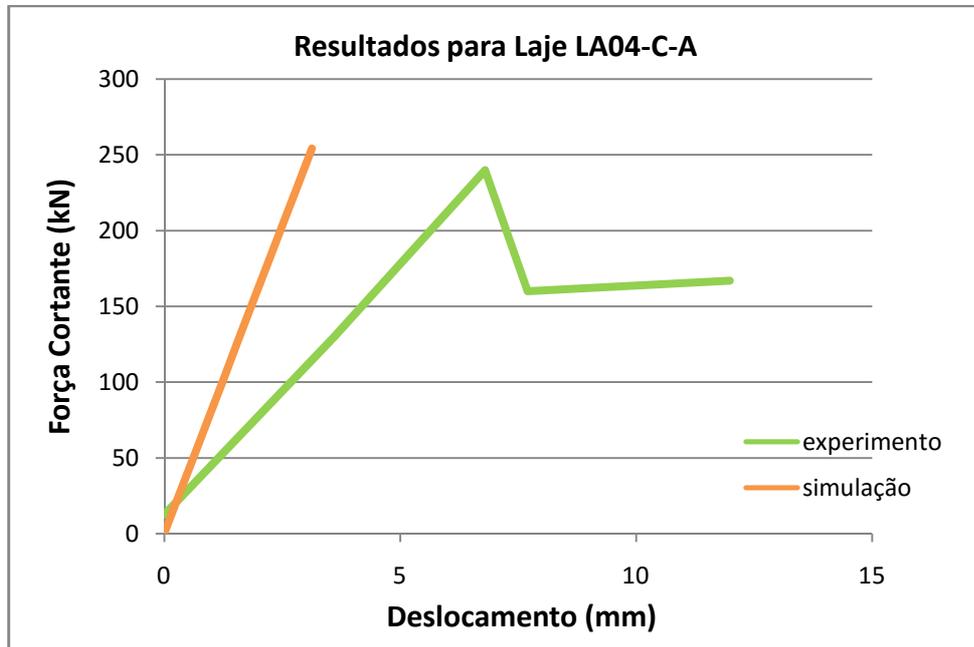
Fonte: Adaptado de Marquesi (2014)

Gráfico 5.3: Força Cortante *versus* deslocamento para laje LA03-C-A



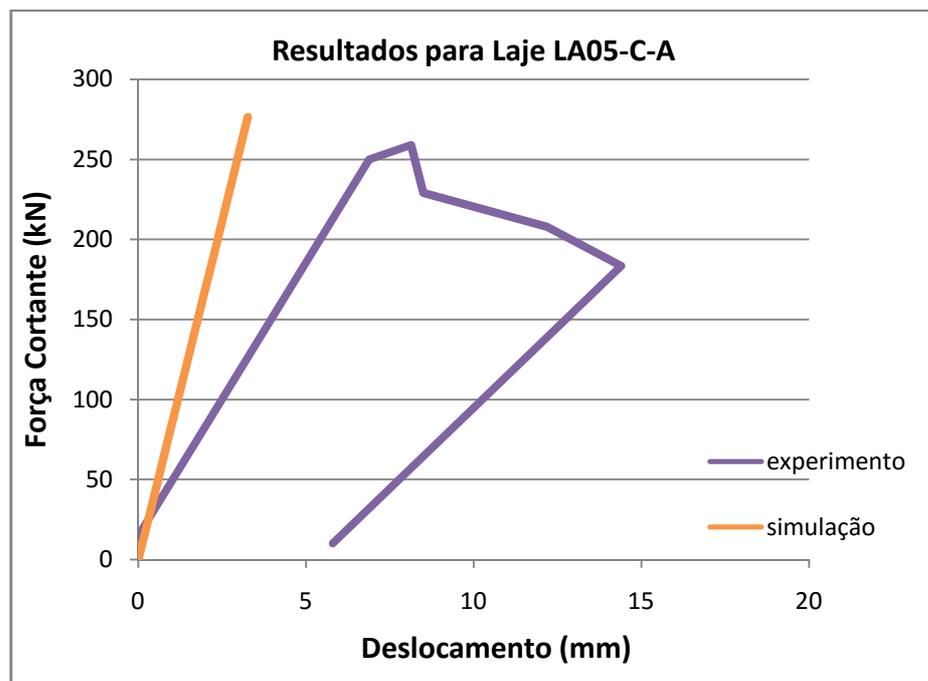
Fonte: Adaptado de Marquesi (2014)

Gráfico 5.4: Força Cortante *versus* deslocamento para laje LA04-C-A



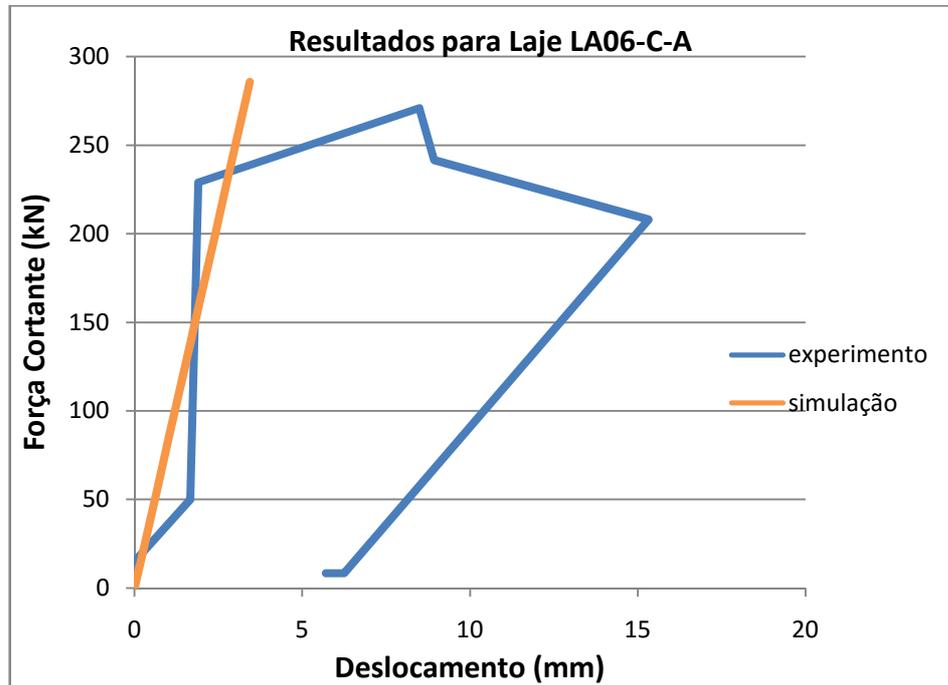
Fonte: Adaptado de Marquesi (2014)

Gráfico 5.5: Força Cortante *versus* deslocamento para laje LA05-C-A



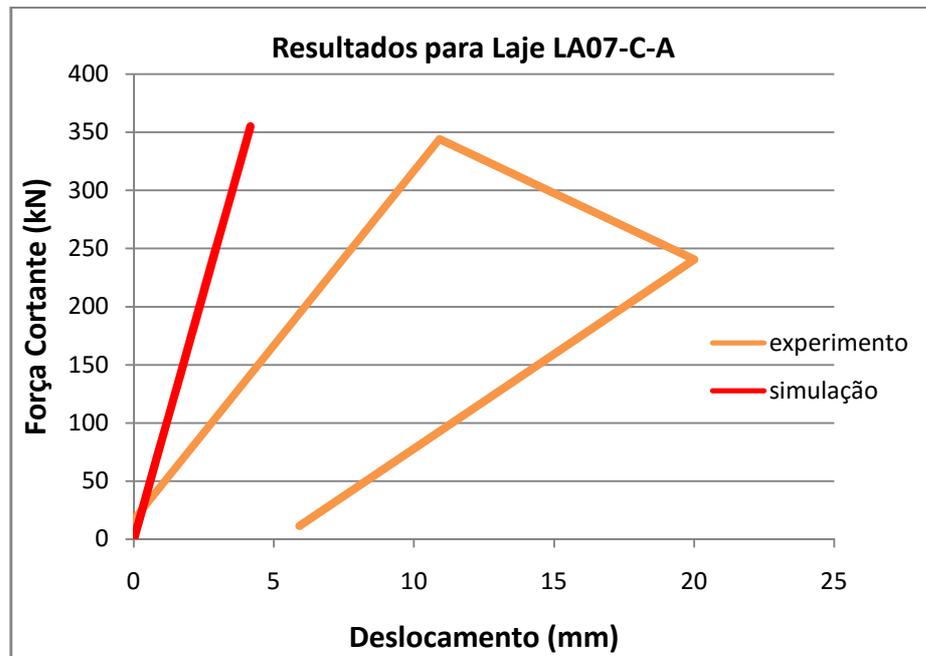
Fonte: Adaptado de Marquesi (2014)

Gráfico 5.6: Força Cortante versus deslocamento para laje LA06-C-A



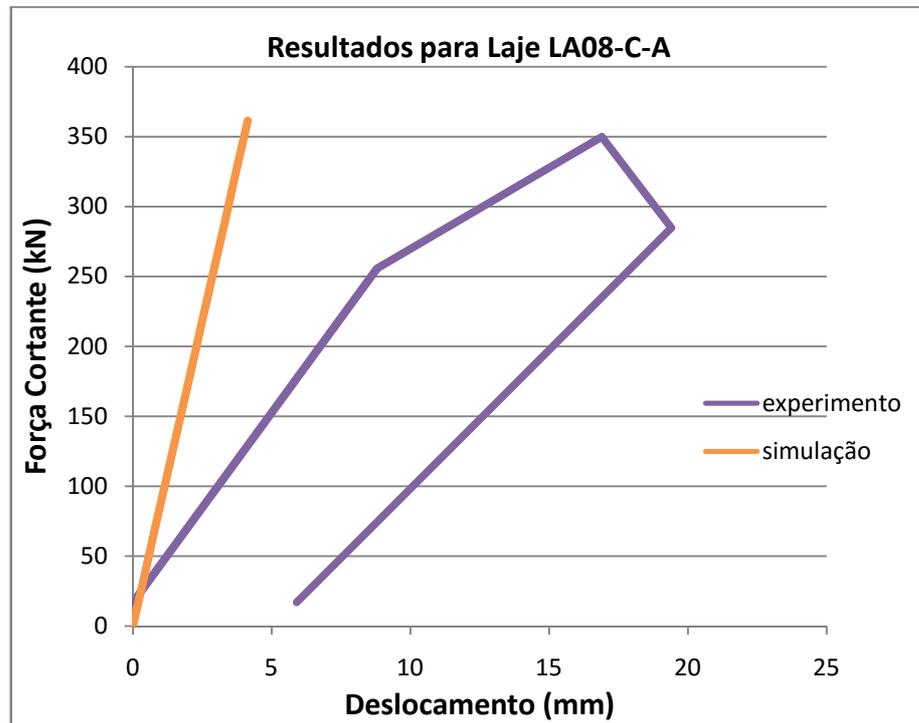
Fonte: Adaptado de Marquesi (2014)

Gráfico 5.7: Força Cortante versus deslocamento para laje LA07-C-A



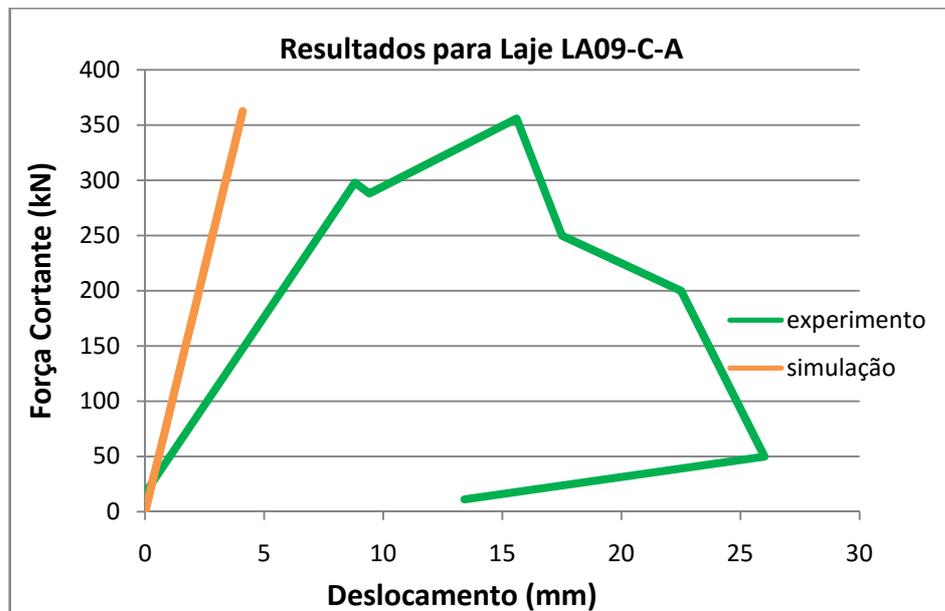
Fonte: Adaptado de Marquesi (2014)

Gráfico 5.8: Força Cortante *versus* deslocamento para laje LA08-C-A



Fonte: Adaptado de Marquesi (2014)

Gráfico 5.9: Força Cortante *versus* deslocamento para laje LA09-C-A



Fonte: Adaptado de Marquesi (2014)

Com base nos gráficos apresentados observa-se uma diferença razoável entre as curvas numéricas e experimentais, mesmo na fase linear. Atribui-se essa diferença a os seguintes fatores:

- poucos dados disponíveis do trabalho de Marquesi (2014);
- o módulo de elasticidade do concreto foi obtido com base na sua resistência à compressão. Único dado fornecido no trabalho citado. Acredita-se que o valor usado nas simulações esteja acima do real;

5.2. RESULTADOS PARA ANÁLISE COM COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR DOS MATERIAIS

Para a simulação considerando o comportamento não linear dos materiais foi utilizado o modelo *Concrete Smeared Cracking* para concreto e elastoplasticidade para o aço.

Após várias tentativas de fazer o modelo numérico convergir não se obteve sucesso. Notou-se que o *software* pareceu não interpretar o modelo de *Tension Stiffening* por motivos desconhecidos já que, sejam quais fossem os dados adotados para fissuração, o programa cessava a simulação no momento em que o concreto iniciava o processo de fissuração, ocorrendo instabilidade numérica.

Continuou-se a pesquisar sobre formas de como resolver o problema da não convergência. Segundo o Manual de Análise do Abaqus (2010), para se evitar erros prematuros em análises difíceis, basta que se alterem os valores de I0 e IR para 8 e 10 respectivamente. Tais variáveis encontram-se, dentro do módulo *Step*, seguindo os passos: *Other, General Solution Controls, Edit*, clica-se em *Specify* e, na aba *Time Incrementation* Clica-se na *checkbox Discontinuous analysis*. Ao clica-la, automaticamente os valores de I0 e IR se alteram para os valores recomendados anteriormente (8 e 10). Entretanto, mesmo com essas alterações não houve convergência dos resultados.

A convergência dos resultados de uma solução não-linear depende de muitos resultados numéricos, o que percebeu-se é que o *software* cessava a simulação com a carga em torno de 30% da carga total prevista.

Novamente, o que pode ter agravado o problema de não convergência, é que os dados para a caracterização dos materiais foram todos adotados a partir da literatura disponível, a única informação que Marquesi (2014) trouxe foi a resistência à compressão nominal do concreto (C45).

Outra possível causa para a não convergência é que as lajes alveolares não tem armadura passiva, somente as cordoalhas para protensão, e assim a ruptura se torna um tanto quanto frágil, após a formação da fissura da tração diagonal. E como todas as lajes do trabalho experimental romperam dessa forma, uma vez que os ensaios eram de cisalhamento, a convergência nesses casos ainda é mais difícil.

6. CONCLUSÕES

Com base no desenvolvimento do presente trabalho, podem-se extrair as seguintes considerações finais:

Comparando-se os gráficos obtidos nas simulações com os experimentais observou-se uma diferença razoável entre as curvas, mesmo na fase linear. Conforme exposto na explanação do modelo numérico desenvolvido, houveram muitas considerações de simplificação para os materiais devido a falta de determinados ensaios laboratoriais necessários à perfeita caracterização dos materiais.

A simulação numérica é uma ferramenta valiosa, porém, para utilizá-la satisfatoriamente precisa-se de dados experimentais mais detalhados e específicos, como: ensaios de resistência à compressão e tração do concreto e do aço.

O comportamento ao cisalhamento, com ruptura por tração diagonal, sem fissuração anterior é difícil de representar, e de garantir a convergência do modelo numérico.

O estudo do software ABAQUS, usado no presente trabalho, ainda está em fase inicial no Departamento de Engenharia Civil da UEM, e muitos problemas na sua utilização ainda deverão ser resolvidos.

Sugerem-se para trabalhos futuros os seguintes tópicos:

Aprofundamento nas análises do programa computacional Abaqus/CAE, por meio de pesquisas em artigos, dissertações, teses e manuais disponíveis especificamente sobre a análise de convergência dos resultados.

Estudo sobre o comportamento à tração do concreto dentro do *software*, fazendo-se testes de corpos de prova virtuais, vigas simplificadas, dentre outros, e, comparação dos resultados numéricos com ensaios experimentais.

Estudos do comportamento do concreto utilizando outros modelos disponíveis no *software* como: *Brittle Cracking* e o *Concrete Damaged Plasticity*.

Desenvolvimento de estudos do contato entre a cordoalha e o concreto após a aplicação da tensão de protensão, assim como, estudos sobre a transferência da tensão de protensão por toda a peça.

7. REFERÊNCIAS

ANTUNES, C. F. M. **Resistência ao cisalhamento de lajes alveolares preenchidas: uma análise exploratória**. 146f. Dissertação – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118:2013** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14861**: Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIATION OF MANUFACTURERS OF PRESTRESSED HOLLOW CORE FLOORS – ASSAP(2002). **The hollow core floor design and applications**. Verona– Italy.

BROO H.; LUNDGREN K. **Finite Element Analyses of Hollow Core Units Subjected to Shear and Torsion**. Chalmers University Of Technology. Göteborg, Sweden 2002.

BRUNESI , E.;BOLOGNINI D.;NASCIMBENE R. **Evaluation Of The Shear Capacity Of Precast-Prestressed Hollow Core Slabs: Numerical And Experimental Comparisons**. Materials and Structures , 2015.

CAMILLO, C. A. **Continuidade de painéis de laje alveolar em edifícios**. Dissertação. 162f. Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

CASSOL PRÉ-FABRICADOS. **Cassol pré-fabricados**: Produtos – Lajes alveolares. Disponível em: <<http://www2.cassol.ind.br/media-center/download/>>. Acesso em: 20 ago. 2014.

CASSOL PRÉ-FABRICADOS. **Cassol pré-fabricados:** Produtos – Lajes alveolares. Disponível em: < <http://www2.cassol.ind.br/produtos-2/paineis-alveolares/>>. Acesso em: 26 jul. 2015.

CATOIA, B. **Lajes alveolares protendidas: Cisalhamento em região fissurada por flexão.** 2011. 325f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

COSTA, Olivia **Oliviera.** **Avaliação de desempenho de elementos de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas.** 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

ELLIOTT, K.S. (2005). **I Workshop Internacional: Design and construction of precast concrete structures.** Sao Carlos, UFSCar – NETPRE.

FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAÎTE - FIP (1992). **Guide to good practice: quality assurance of hollow core slab.** London, England.

FEDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. FIB (CEB-FIB) – **Guide to good practice: Special design considerations for precast prestressed hollow core floors.** Lausanne, 2000.

FERNANDES, Neilton Santos. **Lajes Alveolares Pré-Fabricadas em Concreto Protendido.** 111 f. Dissertação - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

FUSCO. P. B. **Estruturas de Concreto – Solicitações Tangenciais.** 1^a ed. São Paulo. Pini. 2008.

GHOSH, S. K.; HAWKINS, N. M. **Shear strength of hollow core slabs.** PCI Journal 51 (1). 2006.

GIRHAMMAR, U. A.; PAJARI, M. **Tests and analysis on shear of composite slabs of hollow core units and concrete topping.** Constructionan Building Materials. V. 22, 2008.

GIRIBOLA, Maryana. **Revista Construção Mercado**. Construção – Laje alveolar. Sistema tem peso reduzido e permite melhor produtividade na obra – Conheça seus principais componentes. Edição 149. Dezembro, 2013. Disponível em: <<http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/149/sistema-tem-peso-reduzido-e-permite-melhor-produtividade-na-obra-301958-1.aspx>>. Acesso em: 08 ago. 2014.

GUTSTEIN, Daniela. **Projeto De Estruturas De Barragens De Gravidade De Concreto Por Meio De Métodos Computacionais: Visão Geral E Metodologia**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

HOOGENBOOM, P.C.J. **Analysis of hollow-core slab floors**, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, The Netherlands, HERON, Vol.50, n. 3, 2005.

JUNQUEIRA, Renan Gustavo. **Estudo Do Comportamento De Viga De Concreto Armado Convencional e de Viga Reforçada Com Manta de Prfc Usando-de o Mef**. Monografia Universidade Estadual de Maringá. MARINGÁ, 2014.

LINDSTROM, G. (2007). FIB 2007. Draft.

MARQUESI, M. L. G. **Contribuição ao Estudo dos Mecanismos Resistentes à Força Cortante em Lajes Alveolares Protendidas**. f.144. Dissertação - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.2014.

MARQUESI, M. L. G.; STUCCHI, F. R.; FUJII, G. UNGARETTI, M. C. **Shear Analysis and Experimental Research Program on Anchorage Criteria in RC Slabs: Comparisons between Fib MC 2010 and NBR 61168**. In: IV INTERNATIONAL fib CONGRESS 2014, MUMBAI, 2014.

MELO, C.E.E. (2004). **Manual Munte de projetos pre-fabricados de concreto**. São Paulo: Pini.

OH, B. H., KIM, E. S. **Realistic Evaluation of Transfer Lengths in Pretensioned Prestressed Concrete Member.** ACI Structural Journal v. 97 n.1 p. 821- 830, November 2000.

NAKAMURA, Juliana. **Revista Construção Mercado.** Construção – Estrutura industrializada. Pré-fabricados de concreto já são largamente empregados em projetos com alto grau de repetição e amplos vãos livres. Mas uso em edifícios altos, especialmente residenciais, ainda é restrito. Edição 149. Dezembro, 2013. Disponível em: <<http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/149/artigo301998-1.aspx>>. Acesso em: 11 ago. 2014.

PAJARI, M. (2004). **Pure torsion tests on single hollow core slabs.** VTT Technical Research Centre of Finland. Research Notes 2273.

PETRUCELLI, Natalia Savietto. **Considerações sobre projeto e fabricação de lajes alveolares protendidas.** Dissertação. 106 p. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2009.

PCI – Precast/Prestressed Concrete Institute. **Manual for the design of hollow core slabs.** 2ª ed. Chicago, 1998.

PRETUBO. Disponível em: <http://www.pretubo.com.br/index.php?pp=produtos&pp_sub=estruturas>. Acesso em 24 jul.2015.

REVISTA AEC WEB. Disponível em: http://www.aecweb.com.br/emp/cont/m/moldadoras-wch-fabricam-lajes-de-6-a-40-cm-de-altura-com-alta-productividade_8129_7028. Acesso em 24 jul. 2015.

SHERWOOD, E. G., **One-Way Shear Behavior of Large, Lightly-Reinforced Concrete Beams and Slabs,** PhD dissertation, University of Toronto, Toronto, Ontario Canada, 546 pp. 2008.

TEIXEIRA e SILVA, S.T.; ARAÚJO, D.L.; ANTUNES C. F. M. **Resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas**. Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2009.

TEIXEIRA, Rafael Rodrigues. **Modelagem Por Elementos Finitos Para Análise De Tensões E Deformações Por Fluência No Concreto Compactado Com Rolo**, 214 f., Dissertação. Universidade Federal do Paraná, 2006.

VENTURINI, Jamila. **Revista Equipe de Obra**. Materiais e ferramentas – Lajes alveolares. Lajes alveolares pré-fabricadas contêm furos longitudinais que as deixam mais leves, diminuindo a carga sobre a estrutura. Edição 37. Julho, 2011. Disponível em: <<http://equipedebra.pini.com.br/construcao-reforma/37/lajes-alveolares-220682-1.aspx>>. Acesso em: 20 ago. 2014.

WALRAVEN, J.C.; MERCX, W.P.M. (1983). **The bearing capacity of prestressed hollow core slabs**. HERON. Delft University of Technology. v.28, n.3, 1983.

YANG, L. Design of Prestressed Hollow Core Slabs with Reference to Web Shear Failure. *Journal of Structural Engineering*. [s. L.], p. 2675-2696. Set. 1994.