

BRUNA ROBERTA DA SILVA PINHEIRO
EDUARDO RODRIGO DA SILVA
JULIANA MENDES DE OLIVEIRA
KÊNIA DE CÁSSIA CASSIMIRO

**ESTUDO TEÓRICO DA INFLUÊNCIA DE ABERTURAS NA
RESISTÊNCIA AO ESFORÇO CORTANTE EM LAJES
ALVEOLARES PRÉ-FABRICADAS**

UNIFAAT – UNIVERSIDADE FACULDADES ATIBAIA

ATIBAIA – SP

2018

BRUNA ROBERTA DA SILVA PINHEIRO
EDUARDO RODRIGO DA SILVA
JULIANA MENDES DE OLIVEIRA
KÊNIA DE CÁSSIA CASSIMIRO

**ESTUDO TEÓRICO DA INFLUÊNCIA DE ABERTURAS NA
RESISTÊNCIA AO ESFORÇO CORTANTE EM LAJES
ALVEOLARES PRÉ-FABRICADAS**

Trabalho apresentado à banca examinadora da
UNIFAAT – Universidade Faculdades Atibaia,
como exigência parcial à obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação
do professor Gregory Lee Pinheiro.

UNIFAAT – UNIVERSIDADE FACULDADES ATIBAIA
ATIBAIA – SP
2018

AGRADECIMENTOS

A Deus e às nossas famílias pela compreensão nos momentos ausentes, e pelo apoio durante esses anos.

Ao professor Gregory Lee Pinheiro, orientador deste trabalho, pela ajuda e atenção dedicada.

À professora Adélia Mara Massulo por corrigir este trabalho com muita paciência e pelo esclarecimento de dúvidas.

Aos nossos colegas de sala e amigos, pela parceria.

“Em engenharia não existem soluções prontas para vencer a batalha entre custos e benefícios. Somente um bom planejamento, baseado nas necessidades específicas de cada obra, na sua localização e nos recursos disponíveis para sua execução é que podem definir a melhor alternativa.”

Portal do Concreto

RESUMO

Com o processo de industrialização da construção civil através da utilização de peças de concreto pré-fabricado, o Brasil e o mundo deram um salto de qualidade nos canteiros de obras. O concreto pré-moldado pode ser definido como sendo aquele preparado, moldado e curado em um local que não seja seu destino final. Dos elementos pré-moldados um dos principais são as lajes alveolares, que apresentam-se como uma solução estrutural avançada para piso e forro, devido ao baixo peso próprio e melhor uso dos materiais, tornando-a economicamente viável. Devido ao processo de fabricação, as Lajes Alveolares Protendidas não possuem armaduras transversais. Desta forma, uma das principais preocupações é a sua capacidade resistente à força cortante, sendo que essa resistência está diretamente relacionada a geometria do alvéolo, traço de concreto e processo de produção. O presente trabalho tem como objetivo principal estudar e calcular a influência de aberturas na resistência ao esforço cortante em lajes alveolares protendidas pré-fabricadas, com a finalidade de fornecer informações que garantam o melhor entendimento do seu uso. Inicialmente abordou-se, através de uma pesquisa bibliográfica, a definição, aplicação, características, e processos de produção das lajes. Em seguida realizou-se a avaliação da resistência ao cisalhamento das lajes alveolares através cálculos, realizando simulações. Para isso foi empregado um modelo de abertura único para 3 lajes, com medida de 40 x 40cm, executada no centro da laje, sendo que foram consideradas diferentes alturas e alturasúteis das seções transversais das lajes. Neste cenário, de acordo cálculos, todas as lajes apresentaram quedas em sua resistência a força cortante.

Palavra chave: lajes alveolares, força cortante, aberturas.

ABSTRACT

With the process of industrialization of civil construction through the use of prefabricated concrete parts, Brazil and the world made a quantum leap in construction sites. The prefabricated concrete can be defined as being prepared, shaped and cured in a location other than its final destination. Of the precast elements, one of the main ones are the hollow core slabs, which present themselves as an advanced structural solution for floor and lining, due to the low own weight and better use of the materials, making it economically viable. Due to the manufacturing process, the Prestressed Slabs do not have transverse reinforcements. Thus, one of the main concerns is its shear resistant capacity, and this resistance is directly related to alveolar geometry, concrete traces and production process. The present work has as main objective to study and to calculate the influence of openings in the resistance to the shear stress in prefabricated hollow core slabs, with the purpose of providing information that guarantees the best understanding of its use. The definition, application, characteristics, and production processes of the slabs were initially approached through a bibliographical research. Then, the shear strength of the hollow core slabs was evaluated through calculations, simulations were carried out. For this, a single opening model was used for 3 slabs measuring 40 x 40cm, executed in the center of the slab, and different heights and heights of the cross sections of the slabs were considered. In this scenario, according to calculations, all slabs showed drops in their resistance to shear force.

Keywords:hollow core slabs, shear force, openings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo laje alveolar	21
Figura 2: Efeito diafragma rígido	21
Figura 3: Detalhe da seção transversal da chave de cisalhamento	23
Figura 4: Aberturas em Vigas – disposições mínimas.....	24
Figura 5: Pista de Concretagem.....	31
Figura 6: Limpeza da pista de concretagem	32
Figura 7: Pista de concretagem após a aplicação do desmoldante	33
Figura 8: Posicionamento das cordoalhas sobre a pista de concretagem	33
Figura 9: Equipamento para protensão	34
Figura 10: Cabos ancorados por cunhas. a) início da pista; b) final da pista.	34
Figura 11: Equipamento de produção de lajes alveolares por moldagem.....	35
Figura 12: Produção do Concreto	35
Figura 13: Lançamento do concreto.....	36
Figura 14: Compactação e moldagem do concreto.....	36
Figura 15: Execução de ranhuras na superfície das lajes.....	37
Figura 16: Execução dos cortes e aberturas.....	38
Figura 17: Processo de cura das lajes	39
Figura 18: Corte das lajes	39
Figura 19: Dimensões das lajes	41
Figura 20: Laje alveolar se abertura e com abertura de 40x40cm	41
Figura 21: Cálculo para a laje 01.....	43
Figura 22: Cálculo para laje 02.....	44
Figura 23: Cálculo para laje 03.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Recomendações sobre aberturas do Manual Munte (2007)	26
Tabela 2- Recomendações sobre aberturas do Manual FIB/FIP(2013)	26
Tabela 3: Recomendações sobre aberturas do Manual ASSAP (1982).....	27
Tabela 4: Recomendações sobre aberturas do Manual PCI (2004).....	27
Tabela 5: Características geométricas das lajes	42
Tabela 6: Características das armaduras.....	43

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Comparativo de resultado laje 01	44
Gráfico 2: Comparativo de resultado laje 02	45
Gráfico 3: Comparativo de resultado laje 03	46

LISTA DE SÍMBOLOS

A_s : Área total das cordoalhas utilizadas na laje;

A_{s1} : Área de armadura de tração;

A_{tot} : Área total do concreto desconsiderando alvéolos;

b : Largura da laje;

b_w : Largura mínima da seção ao longo da altura d ;

d : Altura útil da seção transversal da laje;

$f_{ctk,inf}$: Resistência à tração de projeto do concreto pré-moldado;

F_p : Força de protensão em um único cabo;

H_{LA} : Altura da laje;

K : Coeficiente $k = 1,6 - d \geq 1$;

$N_{p\ total}$: Somatória das forças de protensão das cordoalhas inseridas na laje;

N_{sd} : Força longitudinal na seção devida a protensão ou carregamento (compressão positiva);

V_{Rd} : Resistência de projeto ao cisalhamento;

$\sum b_w$: Soma das larguras das nervuras da laje na região central, onde o valor é mínimo;

ρ_1 : Taxa de armadura da seção alveolar pré-moldada;

$\sigma_{cp,1}$: Tensão de compressão do concreto devida à força de protensão.

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	13
1.1. Justificativa	14
1.2. Objetivos	15
1.3. Metodologia.....	15
2. DESENVOLVIMENTO	17
2.1. Concreto pré-moldado e pré-fabricado.....	17
2.2. Concreto Protendido e Concreto armado	18
2.3. Lajes.....	19
2.3.1. Lajes pré-fabricadas	20
2.3.2. Lajes Alveolares protendidas	21
2.3.3 Aberturas em Lajes Alveolares Protendidas.....	23
2.4. Recomendações sobre aberturas - Normas Técnicas	24
2.4.1. Recomendações sobre aberturas - Manuais Técnicos.....	25
2.5. Produção Lajes Alveolares Protendidas.....	31
4.1. Tipologia das lajes alveolares para efeito de cálculos.....	41
4.2. Características geométricas das lajes	42
4.4. Resultado dos cálculos.....	43
4.5. Análise dos resultados	47
CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ANEXO I.....	55

1- INTRODUÇÃO

Com o processo de industrialização da construção civil através da utilização de peças de concreto pré-fabricado, o Brasil e o mundo deram um salto de qualidade nos canteiros de obras, visto que através de componentes industrializados com alto controle ao longo de sua produção, com materiais de boa qualidade, fornecedores selecionados e mão-de-obra treinada e qualificada, as obras tornaram-se cada vez mais organizadas e seguras (SERRA, 2005).

O concreto pré-moldado pode ser definido como sendo aquele preparado, moldado e curado em um local que não seja seu destino final (PINHEIRO, 2017).

De acordo com El Debs (2000) os pré-moldados contemplam uma construção mais rápida, mais limpa, facilidade na elaboração de projetos, qualidade para os trabalhadores, dentre outras vantagens. No entanto, esta depende de um maior número de maquinários do que a construção convencional, tornando-a mais cara do que a convencional.

Dos elementos pré-moldados um dos principais são as lajes alveolares LAPs, que segundo Pinheiro (2017) apresentam-se como uma solução estrutural avançada para piso e forro, devido ao seu baixo peso próprio e melhor uso dos materiais, tornando-a economicamente viável.

De acordo com a NBR 14.861 (ABNT, 2011), laje alveolar é uma peça de concreto produzida industrialmente, fora do local de utilização definitiva, sob rigorosas condições de controle de qualidade. É caracterizada por armadura longitudinal ativa, que engloba totalmente a armadura inferior de tração necessária e por ausência de armadura transversal de cisalhamento.

As lajes alveolares são originais da Alemanha e representam um dos mais populares elementos pré-fabricados no mundo, em especial na América do Norte e na Europa Ocidental, onde são peças de grande versatilidade, que podem ser aplicadas em qualquer tipo de sistema construtivo (convencional, pré-fabricado, metálico, alvenaria estrutural e outros), para fim habitacional, comercial, industrial e de estacionamento, empregados tanto para a execução de pisos, como na forma de fechamentos ou painéis (EL DEBS, 2000).

No contexto da pré-fabricação em concreto, as lajes ou painéis alveolares pretendidos têm ganhado cada vez mais importância e competitividade sendo

utilizadas em diversas tipologias construtivas. As LAPs possuem vazios longitudinais denominados alvéolos, que reduzem o consumo de concreto, implicando em um peso próprio menor em relação a uma laje maciça, porém com características estruturais semelhantes (MARQUESI, 2014).

Segundo Pinheiro (2017) é muito comum a aberturas em lajes alveolares. O sistema de lajes alveolares possui uma ampla flexibilidade em relação a execução de aberturas, que geralmente são utilizadas para a passagem das instalações hidráulicas, elétricas, ar condicionado, combate a incêndio, dentre outros.

Marquesi(2014) e Pinheiro (2017) relatam que devido ao processo de fabricação, as LAPs não possuem armaduras transversais, desta forma, uma das principais preocupações para com este elemento estrutural é a sua capacidade resistente à força cortante, sendo que essa resistência está diretamente relacionada a geometria do alvéolo, traço de concreto e processo de produção.

Assim, se espera elaborar através deste trabalho, um estudo capaz de avaliar a influência de aberturas na resistência ao esforço cortante em lajes alveolares protendidas pré-fabricadas.

1.1. Justificativa

As lajes alveolares têm sido muito utilizadas no Brasil, tendo em vista suas vantagens competitivas comparadas às lajes convencionais. Mesmo com o grande crescimento, pesquisas nacionais, como a de Pinheiro(2017), e internacionais, mostram a necessidade de mais estudos nesta área.

De acordo com a NBR 14.861 (ABNT, 2016), para resistir às tensões de cisalhamento os mecanismos de ruptura de uma laje alveolar podem ocorrer de duas formas: a primeira quando a tensão de cisalhamento supera a resistência à tração diagonal do concreto na nervura do alvéolo e a segunda quando a tensão de cisalhamento se combinam com as tensões de tração oriundas da protensão ou da flexão da peça. A resistência ao esforço cortante nas lajes alveolares pode ser aumentada com a especificação de capa estrutural e/ou preenchimento dos alvéolos.

Este trabalho é justificado pela importância em estudar um elemento que não conta com armadura transversal (somente concreto devido a resistência à tração, ou aço devido à protensão) resistente aos esforços do cisalhamento, além

dacarência de estudos específicos em Lajes Alveolares Protendidas Pré-fabricadas, confirmando a necessidade de fornecer informações que garantam o melhor entendimento do seu uso, segurança, e em especial da influência das aberturas na resistência ao esforço cortante das mesmas.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar e calcular a influência de aberturas na resistência ao esforço cortante em lajes alveolares protendidas pré-fabricadas.

Os objetivos específicos são:

- Realizar o levantamento bibliográfico sobre lajes alveolares protendidas, bem como o seu processo de produção;
- Calcular e analisar como diferentes altura se alturas úteis das seções transversal das LAPs podem influenciar na resistência ao esforço cortante.

1.3. Metodologia

Os estudos foram realizados através de:

- Revisão bibliográfica de artigos científicos no que se refere ao comportamento das LAPs influenciadas pelo preenchimento de alvéolos, inclusão de capa estrutural, definições de vãos de aberturas, entre outras informações revelantes para o estudo envolvendo as recomendações das Normas Técnicas;
- Revisão do estudo teórico e prático do Trabalho Acadêmico de Pinheiro (2017) - Estudo sobre a influência de aberturas e cortes oblíquos na resistência ao esforço cortante em lajes alveolares protendidas pré-fabricadas.
- Análise de anotações técnicas, manuais técnicos, Normas Nacionais e Internacionais com a finalidade de encontrar uma metodologia efetiva e atual para os cálculos de cortes e aberturas em lajes alveolares;
- Desenvolvimento de uma planilha de cálculo onde serão realizadas simulações de aberturas em diferentes alturas e alturas úteis das seções transversal das lajes.

As pesquisas serão baseadas de forma quantitativa, afim de demonstrar o que as aberturas em lajes alveolares protendidas podem causar, aprofundando e

agregando conhecimento aos demais estudos acadêmicos realizados até o momento.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Concreto pré-moldado e pré-fabricado

Segundo Revel (1973) o conceito de pré-moldado está associado a qualquer elemento produzido anteriormente ao seu posicionamento final na obra.

Não se tem uma data específica para o início da pré moldagem, já que o concreto armado nasceu com a pré moldagem de elementos fora do local a ser usado (VASCONCELOS, 2002).

Zanon (2011) afirma que muitas vezes há confusão entre pré-moldados e pré-fabricados, e a principal diferença está no nível de controle de qualidade.

A pré moldagem produzida em grande escala irá resultar na pré-fabricação, que busca a industrialização da construção (EL DEBS, 2000).

A NBR 9062 (ABNT, 2001) define os pré-fabricados como um elemento pré-moldado industrialmente em local temporário de canteiros de obra, ou em instalações permanentes de empresas com esses fins e com o mínimo de mão de obra qualificada. A fabricação dos elementos deve atender às normas técnicas pertinentes e os procedimentos devem ser catalogados e registrados, e estar disponíveis para consultas.

Após moldados, os elementos são submetidos a processos de cura com umidade e temperatura controladas, seguindo as especificações do American Concrete Institute (ACI) (PIGOZZO et al., 2005).

Os pré-moldados possuem condições menos rigorosas de controle de qualidade, enquanto os pré-fabricados necessitam de estrutura, pessoal e instalações laboratoriais permanentes para seguir esse controle de qualidade (RODRIGUES, 1991).

As estruturas em concreto pré-moldado ou pré-fabricado podem ser divididas em leves ou pesados, onde os leves fazem parte de um conjunto estrutural e os pesados fazem parte do sistema integral (BRUMATTI, 2008).

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2003) os elementos estruturais podem ser classificados de acordo com a sua forma geométrica e função estrutural. Os elementos lineares são aqueles em que o comprimento longitudinal é três vezes maior do que a maior dimensão da seção transversal, também conhecidos como barras. Entram nessa classificação vigas, pilares, tirantes e arcos. Já os elementos

de superfície, onde uma dimensão (espessura), é relativamente pequena em relação às demais. Nesta categoria se encaixam: chapas, cascas, pilares-parede e as placas. As placas são elementos de superfície plana sujeitos principalmente a ações contidas em seu plano. As placas de concreto são denominadas lajes.

De acordo com El Debs (2000), os elementos pré-moldados mais comum no Brasil são: lajes e fechamentos, vigas e pilares.

O uso de estruturas em concreto pré-moldado em edificações está relacionado à construção durável, estruturalmente segura e com versatilidade arquitetônica. A indústria de pré-fabricados vem se esforçando para se adequar às demandas da sociedade, no que diz respeito a: economia, eficiência, desempenho técnico, segurança, condições favoráveis de trabalho e sustentabilidade (ACKER, 2002).

2.2. Concreto Protendido e Concreto armado

Segundo Bastos (2015) “o concreto protendido é um refinamento do concreto armado, onde a ideia básica é aplicar tensões prévias de compressão nas regiões da peça que serão tracionadas pela ação do carregamento externo aplicado. Desse modo, as tensões de tração são diminuídas ou até mesmo anuladas pelas tensões de compressão pré-existentes ou pré-aplicadas. Com a protensão contorna-se a característica negativa de baixa resistência do concreto à tração.”

De acordo com Barboza (2008) a principal diferença entre o concreto protendido e o concreto armado é o tipo de armadura que será utilizada, além da interação entre o concreto e a mesma. Dessa forma, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003) no concreto protendido é empregado a armadura ativa, aderida ou não ao concreto, sendo constituída por barras, fios isolados ou cordoalhas, a fim de produzir forças de protensão, ou seja, aplicando um alongamento inicial. Já no concreto armado utiliza-se armadura passiva aderida ao concreto, onde a NBR 6118 (ABNT, 2003) define como qualquer armadura que não seja usada para produzir forças de protensão, ou seja, que não seja previamente alongada.

Existem algumas vantagens e desvantagens da utilização do concreto protendido em relação ao concreto armado.

Segundo Barboza (2008) as vantagens são:

- I. Os controles das deflexões;

II. Aumento de controle de fissuras;

III. Redução nas tensões de tração provocadas pelos esforços cortantes;

IV. Permite vencer vãos maiores que o concreto armado convencional; para o mesmo vão, permite reduzir a altura necessária de vigas e lajes;

V. Facilita o emprego da pré-moldagem, uma vez que a protensão praticamente elimina a fissuração durante o transporte das peças;

VI. Como as tensões introduzidas no ato da protensão, tanto no aço como no concreto, são muito superiores que as correspondentes à situação da peça em serviço, as operações de protensão funcionam como uma prova de carga da estrutura.

Barboza (2008) também cita as seguintes desvantagens na utilização do concreto protendido em relação ao armado:

I. Corrosão da cordoalha de protensão, podendo ocasionar acidentes;

II. Necessidade de um projeto bem elaborado;

III. Custo elevado, por não ser um sistema tão popular.

Segundo Rocha (1972) o objetivo principal do concreto protendido, é criar um processo que permite usar aços de alta resistência à tração, obtendo assim, estruturas mais leves e esbeltas com o uso de concreto de resistência elevada à compressão.

2.3. Lajes

Bastos (2015) define lajes como “elementos planos bidimensionais, que são aqueles onde duas dimensões, o comprimento e a largura, são da mesma ordem de grandeza e muito maiores que a terceira dimensão, a espessura. As lajes são também chamadas elementos de superfície, ou placas”.

Considerando uma estrutura convencional, como laje-viga-pilar, as lajes possuem, de forma geral, dupla função estrutural: transmitir o carregamento aplicado diretamente no piso para as vigas e/ou pilares e funcionar como diafragma rígido, ao distribuir as cargas horizontais atuantes na estrutura de contraventamento, contribuindo para o mesmo (CUNHA, 1998).

As lajes, tanto de concreto protendido quanto concreto armado, podem ser classificadas segundo diferentes critérios (SOUZA e LOPES, 2016). CUNHA (1998) classifica as lajes em 4 categorias: quanto à secção transversal (maciça, nervurada); quanto à execução (moldada in loco, pré-moldada); quanto ao apoio (em

vigas/alvenaria estrutural, em pilares) e quanto à armação (aramada em uma direção, em duas direções).

2.3.1. Lajes pré-fabricadas

Conforme citado no item 2.1, o Concreto pré-moldado e pré-fabricado, a NBR 9062 (ABNT, 2006) define os pré-fabricados como um elemento pré-moldado industrialmente em local temporário de canteiros de obra, ou em instalações permanentes de empresas com esses fins e com o mínimo de mão de obra qualificada.

Segundo Bastos (2015) citou as seguintes normas para apresentar as características exigíveis para alguns tipos de lajes pré-fabricadas as lajes pré-fabricadas abaixo relacionadas: NBR 14859-1, NBR 14859-2, NBR 14860-1, NBR 14860-2 e NBR 14861 apresentam. Portanto, de acordo com essas normas, as lajes pré-fabricadas podem ser assim definidas:

I. Laje pré-fabricada unidirecional: são as lajes constituídas por nervuras principais longitudinais, dispostas em uma única direção. Podem ser empregadas algumas nervuras transversais, perpendiculares às nervuras principais;

II. Laje pré-fabricada bidirecional: laje nervurada, constituída por nervuras principais nas duas direções;

III. Pré-laje: são placas com espessura de 3 cm a 5 cm e larguras padronizadas, constituídas por concreto estrutural, executadas industrialmente fora do local de utilização definitivo da estrutura, ou mesmo em canteiros de obra. Englobam total ou parcialmente a armadura inferior de tração, integrando a seção de concreto da nervura. As pré-lajes podem ser unidirecionais ou bidirecionais, e as placas podem ser de concreto armado ou de concreto pretendido;

IV. Laje alveolar pretendida: conjunto formado por painéis alveolares pretendidos pré-fabricados, montados por justaposição lateral, eventual capa de concreto estrutural e material de rejuntamento.

Com o crescente desenvolvimento da construção civil, a busca por processos construtivos mais eficientes passou a ser uma questão fundamental. A forte concorrência faz com que as empresas que atuam no setor busquem novas formas e métodos construtivos, com processo modulado, de maior industrialização, como é o caso dos pré-moldados em concreto armado (MILANI et al., 2012).

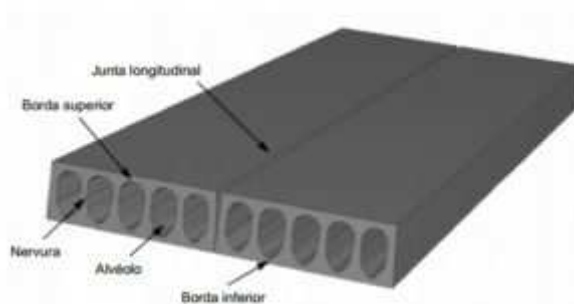
2.3.2. Lajes Alveolares protendidas

Os elementos deste estudo são as lajes alveolares pré-fabricadas protendidas, que de acordo com Costa (2010), são apresentadas como uma solução estrutural avançada para piso e forro, pelo seu baixo peso próprio e melhor uso dos materiais, tornando-a economicamente viável.

Segundo Pinheiro (2017) as lajes alveolares são amplamente utilizados no Brasil e no mundo pelo fato de possuírem montagem rápida e custo competitivo, e por ter um processo de produção altamente mecanizado, garantindo assim uma grande produtividade.

As LAPs são elementos pré-fabricados que possuem vazios contínuos em seu comprimento, resultando uma redução de peso próprio e do custo de fabricação (PINHEIRO, 2017).

Figura 1: Exemplo laje alveolar



Fonte: Engenharia Concreta, 2017.

Esses vazios são gerados pelos alvéolos e o concreto que iria preencher o espaço gerado não possui contribuição significativa para a resistência à flexão, justificando assim sua seção transversal. Os vazios têm a função de reduzir o peso do elemento, além de fornecem espaço físico para a passagem das instalações elétrica e hidráulica (PINHEIRO, 2017).

Após a chegada dos painéis a obra, com o posicionamento das peças, algumas lajes podem apresentar desníveis em relação às outras. Neste caso é realizada a equalização das lajes, através de torniquetes de aço na face superior e travadas com cunhas de madeira na face inferior, torcendo a amarra de arame até que a laje ficasse nivelada (ZANON, 2011).

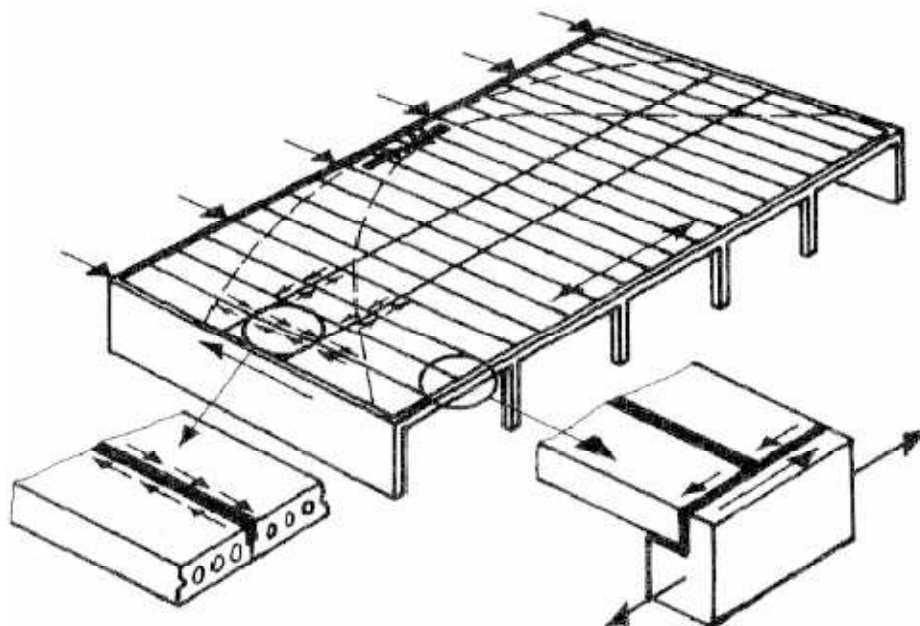
As lajes alveolares podem ser utilizadas com ou sem capeamento dependendo do projeto estrutural, porém a utilização de diversas soluções

estruturais em empreendimentos de grande porte é cada vez mais frequente, devido à celeridade que esta prática agrega ao processo executivo. Quando envolvidos elementos pré-fabricados, a solidarização do sistema estrutural através de capeamentos capazes de distribuir os esforços atuantes se torna necessária (BONI et al., 2015).

De acordo com Pinheiro (2017) o emprego de lajes alveolares com capa estrutural de concreto moldado *in loco* é muito comum. O objetivo do capeamento é formar uma seção composta de maior altura útil que irá aumentar a capacidade resistente à flexão e melhorar o desempenho do elemento como diafragma horizontal na estrutura.

Nos casos de edifícios de múltiplos pavimentos e de altura elevada, as lajes alveolares são capazes de transferir esforços horizontais, tendo importante papel como diafragma rígido (Figura 2) (PINHEIRO, 2017).

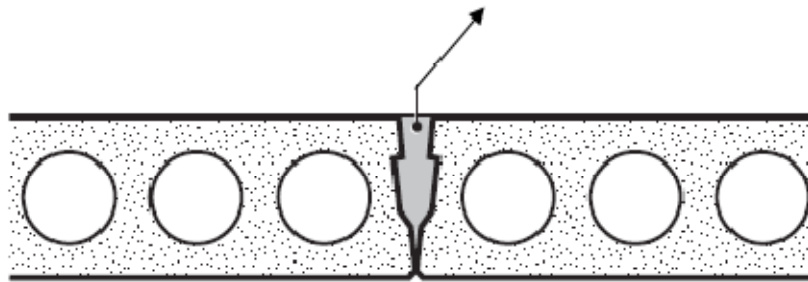
Figura 2: Efeito diafragma rígido



Fonte: FIB (2013).

Com a garantia da aderência entre a capa e a superfície da laje junto ao apoio, a capa moldada *in loco* contribui para o aumento da capacidade da resistência ao cisalhamento, no entanto o principal dispositivo empregado para a transferência de esforços de cisalhamento é a chave de cisalhamento (Figura 3), moldada no local por meio de graute, argamassa ou concreto (PINHEIRO, 2017).

Figura 3: Detalhe da seção transversal da chave de cisalhamento
Chave de Cisalhamento



Fonte: NPCAA adaptado (2003).

Com base em ensaios mecânicos laboratoriais e análises comparativas, nota-se que o emprego do capeamento de concreto, em lajes alveolares pré-fabricadas, bem executado contribui com a melhoria do desempenho do conjunto da estrutura. (PERIOTTO, PINHEIRO e FERREIRA, 2014).

Pinheiro (2017) afirma que ao se garantir a aderência entre a capa e a superfície da laje junto ao apoio, a capa moldada *in loco* pode contribuir para o aumento da capacidade da resistência ao cisalhamento, no entanto o principal dispositivo empregado para a transferência de esforços de cisalhamento é a chave de cisalhamento, moldada no local por meio de graute, argamassa ou concreto.

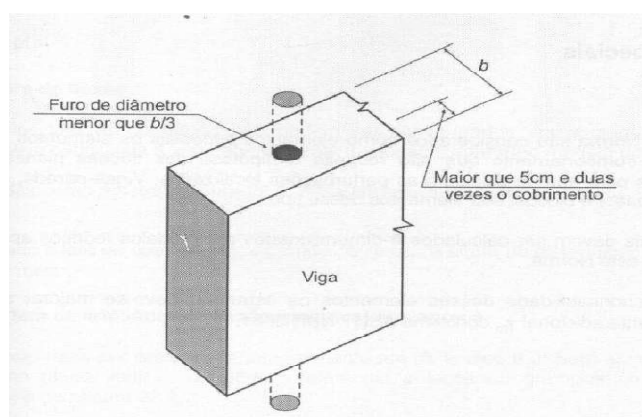
2.3.3 Aberturas em Lajes Alveolares Protendidas

Giugliani (2013) cita que por uma questão de definição, chamam-se de 'furos' os espaços de pequenas dimensões e, por outro lado, 'aberturas', aqueles espaços de dimensões maiores. Um conjunto de furos muito próximos deverá ser avaliado como uma 'abertura'. No caso de vigas de concreto armado, devem ser observadas limitações construtivas mínimas para a existência de aberturas paralelas à sua altura (NBR 6118/2003, item 21.3.3):

- I- Não devem apresentar diâmetro superior a $\frac{1}{3}$ da largura da viga;
- II- A distância mínima do furo à face da viga deve ser de 5 cm ou duas vezes o cobrimento da armadura especificado.

No caso de vários furos, estes devem estar espaçados de, no mínimo, 5 cm ou o valor do diâmetro do furo, devendo manter pelo menos um estribo nesta região.

Figura 4: Aberturas em Vigas – disposições mínimas



Fonte: NBR 6118/2003

Tanto para o caso de vigas como de lajes, a seção remanescente de concreto, descontada a área do furo ou da abertura, deverá ser verificada quanto a sua capacidade de resistência ao cisalhamento e à flexão, a partir das solicitações previstas pelo cálculo (GIUGLIANI, 2013).

Essas passagens são basicamente destinadas a abrigar as instalações, equipamentos ou até mesmo outros elementos estruturais. Os tipos de aberturas e recortes podem ser executados conforme as especificações de fabricação e projeto, onde os métodos executivos e limites permitidos variam conforme norma técnica, manual técnico e fabricante (PINHEIRO, 2017).

2.4. Recomendações sobre aberturas - Normas Técnicas

A ABNT NBR 6118 (2003) dispõe sobre este assunto nos itens 21.3, 13.2.5 e 13.2.6, abordando os aspectos inerentes a furos, aberturas e canalizações em elementos de concreto armado. Qualquer estrutura que apresenta, em suas exigências de projeto, a necessidade de furos ou aberturas, deverá ser projetada e detalhada para absorverem as alterações do fluxo de tensões que ocorrem no entorno destes locais, prevendo-se armaduras especiais para estes casos, além daquelas necessárias para a estabilidade do elemento em função das solicitações atuantes.

Em alguns tipos de lajes, como lisas ou cogumelos, o efeito na resistência e na deformação de elementos estruturais que possuam furos e aberturas deve ser

verificado, e não devem ser ultrapassados os limites previstos. Já as demais lajes não necessitam dessa verificação, porém devem ser armadas em duas direções e atender as seguintes condições: as dimensões da abertura devem corresponder no máximo a 1/10 do vão menor; a distância entre a face de uma abertura e uma borda livre da laje deve ser igual ou maior que 1/4 do vão, na direção considerada; a distância entre faces de aberturas adjacentes deve ser maior que a metade do menor vão.

Segundo a ABNT NBR 9062 (2006) projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado é admissível a utilização de elementos na obra fora das tolerâncias definidas, desde que não comprometam o desempenho estrutural, arquitetônico, ou a durabilidade da obra como um todo. É preciso que seja comprovado o desempenho do elemento estrutural por parte do responsável pelo projeto estrutural.

A ABNT NBR 14861:2011 dispõe que as aberturas e recortes em lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido (item 8.9 – Requisitos e Procedimentos) devem ser definidas em fase de projeto. As especificações devem constar no projeto de fabricação das lajes, e caso haja a necessidade de execução de aberturas e recortes, em uma fase posterior a de projeto e produção, em outras palavras, durante a obra, as modificações devem ser encaminhadas para avaliação do projetista. As aberturas ainda possuem tolerâncias para a variação de formato, sendo admissível um desvio de ± 20 mm em relação às dimensões definidas em projeto. No entanto, para o caso de lajes com cortes em diagonal (oblíquos), as tolerâncias podem sofrer variações em relação ao especificado pela norma.

Segundo o item 14.4.4 da ABNT NBR 14861:2011, quando forem realizadas aberturas no concreto em seu estado fresco, deve-se assegurar que o concreto vizinho ao serviço não seja danificado. Por exemplo: ao danificar as paredes dos alvéolos junto aos recortes, também pode-se afetar a ancoragem das cordoalhas, que por sua vez podem ser reduzidas em uma situação mais desfavorável dos dois lados da abertura.

2.4.1. Recomendações sobre aberturas - Manuais Técnicos

- **MUNTE** – Empresa que atuou no mercado nacional, instalada no país em 1975.

Suas recomendações, propostas no manual MUNTE de Projetos em Pré-Fabricados de concreto (2ª edição publicada pela editora PINI em 2007, baseado na NBR 9062 e nos procedimentos da Munte) contemplam as aberturas e recortes em lajes alveolares. Conforme a tabela 1.

Tabela 1- Recomendações sobre aberturas do Manual Munte (2007)

MANUAL MUNTE (2007)		
	LM 20	LM 26,5
Máximo recorte em qualquer reforço	$L \leq 20\text{cm}$	$L \leq 25\text{cm}$
Recorte com reforço na laje	$L < L \leq 30\text{cm}$	$25 < L \leq 34\text{cm}$
Recorte com reforço na laje e apoio no pilar	$L > 41\text{cm}$	$L > 41\text{cm}$
Mínima faixa lateral junto ao pilar	$X \geq 30\text{ cm}$	$X \geq 35\text{ cm}$

Fonte: PINHEIRO, 2017

FIB/FIP - Fédération Internationale du Béton/International Federation for Structural Concrete, entidade europeia inaugurada em 1952, que faz observações sobre aberturas e furos em lajes alveolares.

Segundo o manual da FIB/FIP: 1992 furos de pequena dimensão, menores que 300/400 mm, devem ser executados na laje durante o seu processo de fabricação com o concreto no estado fresco. A dimensão permitida para os furos depende do diâmetro dos alvéolos e da quantidade de cordoalhas retiradas, de modo a não comprometer a resistência da laje, de acordo com a tabela 2.

Tabela 2- Recomendações sobre aberturas do Manual FIB/FIP(2013)

MANUAL FIB/FIP (2013)		
Local da abertura/furo	Dimensão do furo: comprimento vs largura	
	Altura da laje [mm] 180 - 300	Altura da laje [mm] 400
Quina	600/400	600/300
Frontal	600/400	600/200

Lateral	1000/400	1000/300
Central (circular)	< 20mm	Φ 135
Central (retangular)	1000/400	1000/200

Fonte: PINHEIRO, 2017.

- **ASSAP** - Association of Manufactures of Prestresses Hollow Core Floors) uma associação italiana fundada em 1982.

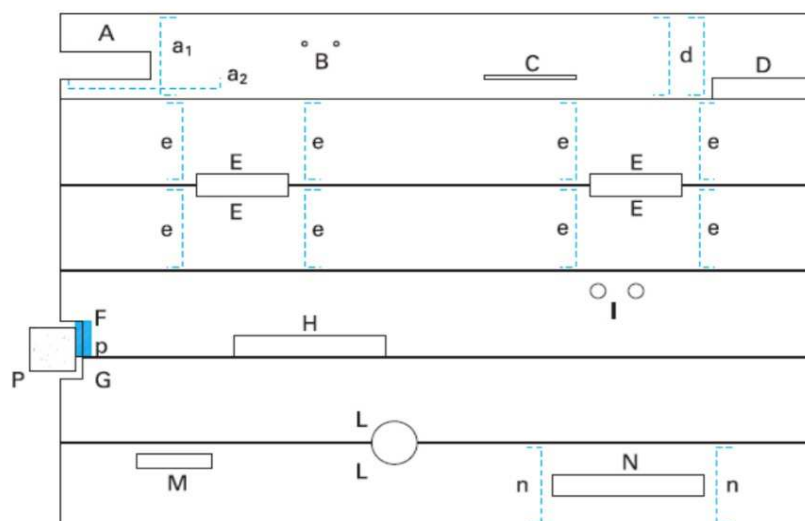
A recomendação da ASSAP é de que a execução de cortes e aberturas devem ocorrer imediatamente após a concretagem do elemento, ou seja, com o concreto ainda em seu estado fresco. Ainda é necessário prever os pontos de içamento da laje, de modo algumas precauções devem ser tomadas em relação a aberturas em lajes.

Tabela 3: Recomendações sobre aberturas do Manual ASSAP (1982)

MANUAL ASSAP (1982)	
Local da abertura	Comprimento ou largura máxima
Extremidades	40 cm
Ao corpo da laje	60 cm (comprimento)

Fonte: PINHEIRO, 2017.

Tabela 4: Recomendações sobre aberturas do Manual PCI (2004)



Fonte: PINHEIRO, 2017.

De acordo com Pinheiro, 2017, algumas precauções devem ser tomadas em relação a aberturas em lajes:

- Corte A – pode ter aberturas de até 40 cm de extensão, e deve estar a uma distância de no mínimo 30 cm da lateral da laje.

- Quando seu comprimento for maior que 50 cm, há a necessidade de reforço com armadura transversal em (a1) e longitudinal (a2). É necessário ainda realizar a verificação ao esforço cortante.

- Abertura B - quando sua largura envolver apenas um alvéolo, não há problemas.

- Ranhura C – quando sua largura envolver apenas um alvéolo, não há contra indicações.

- Corte D – não deve ser maior, em largura, do que 40 cm, necessidade de reforço com armadura transversal em (d). A verificação ao esforço cortante é indispensável.

- Abertura E – a abertura de cada metade recortada nunca deve ser maior que 40 cm. Reforço com armadura transversal em (e) e verificação da capacidade de suporte de carga são indispensáveis.

- Corte F – é destinado ao encaixe de pilar pré-fabricado (P). Os cortes grandes (F) devem apoiar-se em suportes metálicos fixados no pilar.

- Corte G – quando a abertura for menor que 40x40 cm, não há verificações, com exceção da verificação ao esforço cortante.

- Corte H – quando a largura for ≤ 20 cm, não é necessário verificações especiais, exceto o cálculo da capacidade de carga.

- Abertura I – aberturas executadas in loco são muito comuns para a passagem das instalações e é indispensável a verificação devido ao corte de cabos.

- Abertura (metade de abertura) L – o raio não deve ser maior que 40 cm. Necessidade de verificar a capacidade de carga.

- Abertura M e N – a largura não deve ser maior que 30 cm. Necessidade de verificar a capacidade de carga. Se o comprimento for superior a 60 cm, é necessário o reforço com armadura transversal. Estas aberturas também podem ser feitas in loco.

- **AIDEPLA** - Asociación para La investigación y desarrollo de las Placas Alveolares - Associação espanhola pertencente a ANDECE (Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón) responsável pelo desenvolvimento do pré-fabricado no país.

De acordo com a recomendação da AIDEPLA, a execução de cortes e aberturas devem ocorrer somente quando não houver outra opção, haja visto o alto custo de execução. De preferência as aberturas e cortes devem ser feitos no momento após o corte.

- **PCI** - Precast/Prestressed Concrete Institute.

A recomendação do PCI é de que a execução de aberturas em lajes de piso ou forro sejam feitas na fábrica e que furos de até 8” (25,4 mm) sejam executados em obra, e ao executar os furos em obra, deve-se evitar o corte das cordoalhas protendidas.

Tabela 5: Recomendações sobre aberturas do Manual PCI (2004)

MANUAL PCI (2004)	
Local da abertura	Posição da abertura
Região central do vão	0.25ℓ - Laterais ≥3/8ℓ - Apoios ℓ = vão entre apoios
Aberturas próximas ao apoio	<3/8ℓ - Apoios

Fonte: PINHEIRO, 2017.

Quando a abertura não ultrapassar uma distância de 0,125 ℓ ou 1200mm, do apoio ao centro da laje, seu efeito na resistência à flexão pode ser desconsiderado.

Recomenda-se ainda que a execução das aberturas seja feita de maneira que sua maior dimensão esteja paralela à maior dimensão da laje, sendo assim, será retirado o menor número possível de nervuras e cordoalhas protendidas.

- **SESOC/NZCS** - Structural Engineering Society of New Zealand/New Zealand Concrete Society - Nova Zelândia.

A SESOC/NZCS recomenda em seu manual de desempenho de lajes alveolares em situação sísmica, é de que a execução de aberturas em lajes é permitida para possibilitar a passagem de instalações e evitar o conflito com outras estruturas, onde execução de aberturas deve ser feita somente com o conhecimento do projetista e da empresa de pré-fabricados.

2.4.2 Recomendações sobre aberturas – Fabricantes

- **CONCRETECH** - Indústria norte americana de pré-fabricados CONCRETECH (Concrete Technology Corporation).

Através do guia de especificações para lajes alveolares pré-fabricadas protendidas, as especificações para a execução de aberturas em LAPs são que os grandes furos e aberturas devem ser executados em fábrica, mediante especificação em projeto, para aberturas superiores a 8 polegadas (203,2 mm) de diâmetro ou de largura, e as aberturas e cortes inferiores a estas dimensões devem ser executados no local da obra. O valor máximo para a abertura em uma laje de 4' 0" (1219,2 mm) é de 1' 10" (558,8 mm), já aberturas superiores a 558,8 mm é necessário o uso de uma laje de comprimento menor em relação às outras lajes, formando desse modo uma abertura no pavimento.

- **HOLLOWCORE** - Indústria australiana de pré-fabricados HOLLOWCORE (Hollow Core Concrete Pty. Ltd.), no mercado desde 1988.

Através do guia de especificações para lajes alveolares pré-fabricadas protendidas, os modelos mais comuns de aberturas são os furos executados no canteiro de obras, que não devem possuir mais do que 120 mm de diâmetro (para lajes de altura nominal 205 e 220 mm) e 160 mm de diâmetro (para lajes de altura nominal 300 e 400 mm), e são executados por meio de furação na região do alvéolo. No geral em torno de 65% da seção da laje pode ser furada sem sofrer nenhum dano estrutural significativo. Para a execução das aberturas, estas devem ser previstas na fase de projeto para que a redução do número de nervuras e cordoalhas da seção sejam levados em consideração.

- **BISON** - Indústria do Reino Unido de pré-fabricados BISON (Bison Concrete Products Ltd.), no mercado desde 1919.

Através do guia de especificações para lajes alveolares pré-fabricadas protendidas, as aberturas, quando realizadas, devem possuir verificação em projeto da capacidade de suporte das lajes, e em caso de grandes aberturas apoios metálicos são indicados. Os furos com diâmetro inferior a 60mm podem ser executados na obra, evitando atingir a armadura. Os furos com diâmetro inferior a 60mm podem ser executados na obra, para que a armadura não seja atingida.

- **CONSOLIS** - Indústria europeia CONSOLIS (High-performance Precast Concrete Solutions).

As recomendações para as dimensões de furos e aberturas em lajes alveolares são feitas através do guia de especificações técnicas, onde as aberturas devem possuir as mesmas dimensões apresentadas pelo manual FIB/FIP (2013), e geralmente são executadas na fábrica e com o concreto em seu estado fresco. Em caso de grandes aberturas, deve-se usar apoios metálicos ou vigas de concreto (MANUAL CONSOLIS *apud* PINHEIRO, 2017).

2.5. Produção Lajes Alveolares Protendidas

Todo o processo de produção das lajes alveolares protendidas (LAP) apresentado neste tópico foi retirado da tese de Mestrado e Doutorado de PINHEIRO (2014) e PINHEIRO (2017), respectivamente.

O processo de produção das lajes alveolares protendidas envolvem várias etapas, e a primeira delas é a preparação da pista de concretagem. A pista de concretagem é um dispositivo de concreto onde a sua face superior é revestida em aço e com trilhos para a movimentação dos equipamentos de fabricação e corte das lajes. Ainda é necessário que seja possível o posicionamento, protensão e desprotensão de armaduras usadas nas lajes, conforme a Figura 5 (PINHEIRO, 2017).

Figura 5- Pista de Concretagem



Fonte: PINHEIRO, 2017.

Antes de iniciar o processo de produção das lajes, a pista de concretagem deve passar pela etapa de limpeza, que tem como objetivo eliminar qualquer tipo de resíduo sólido ou líquido que pode comprometer a qualidade visual e estrutural do elemento. Esta etapa é realizada por meio de um equipamento, conforme a Figura 6 (PINHEIRO, 2017).

Figura 6- Limpeza da pista de concretagem



Fonte: PINHEIRO, 2017.

Após a limpeza da pista de concretagem, é aplicado um agente desmoldante oleoso de origem vegetal em toda a sua extensão. Esta etapa também é realizada por meio de um equipamento, conforme a Figura 7 (PINHEIRO, 2017).

Figura 7- Pista de concretagem após a aplicação do desmoldante



Fonte: PINHEIRO, 2017.

As lajes alveolares em questão possuem como armadura cordoalhas que são posicionadas sobre a pista de concretagem com o auxílio de um equipamento elétrico, conforme a Figura 8 (PINHEIRO, 2017).

Figura 8: Posicionamento das cordoalhas sobre a pista de concretagem



Fonte: PINHEIRO, 2017.

Após serem posicionadas, as cordoalhas são protendidas (tensionadas) por um equipamento hidráulico, constituído por um macaco automático de protensão (MAP) ligado a uma unidade motriz (UM) que possui um indicador de tensão, conforme a Figura 9 (PINHEIRO, 2017).

Figura 9: Equipamento para protensão



Fonte: PINHEIRO, 2017.

Em seguida é realizada a ancoragem das cordoalhas por meio de cunhas de ancoragem que são presas a cabeceira da pista, conforme a Figura 10 (PINHEIRO, 2017).

Figura 10: Cabos ancorados por cunhas. a) início da pista; b) final da pista



a) b)

Fonte: PINHEIRO, 2017.

Após as etapas iniciais de preparação da concretagem, iniciou-se o processo de moldagem. Este processo de produção consiste na alimentação do equipamento de moldagem(moldadeira), com o concreto produzido na central de mistura da própria fábrica. Por ser alimentado em fluxo contínuo este equipamento faz a confecção de uma peça única sobre armadura protendida devidamente posicionada ao longo da pista de concretagem, conforme a Figura 11 (PINHEIRO, 2017).

Figura 11: Equipamento de produção de lajes alveolares por moldagem

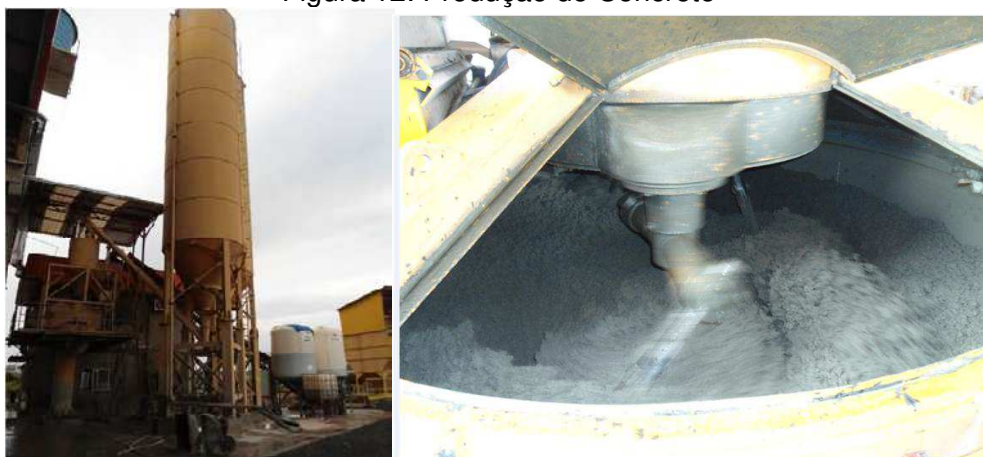


Fonte: PINHEIRO, 2017.

Após a mistura do concreto na central dosadora, o material é lançado na parte superior da máquina, conforme a Figura 12 e a Figura 13.

Outro processo de fabricação que também pode ser utilizado é por extrusão, que consiste em empurrar o concreto abatimento abaixo para a pista de concretagem através de uma máquina que forma alvéolos por meio da compactação de concreto através de tubos helicoidais (PINHEIRO, 2014).

Figura 12: Produção do Concreto



Fonte: PINHEIRO, 2017.

Figura 13: Lançamento do concreto



Fonte: PINHEIRO, 2017.

A moldagem é feita por meio da compactação de um concreto com baixo abatimento sobre a pista de concretagem através de compactadores e vibradores que formaram a seção da laje em camadas distintas, conforme a Figura 14 (PINHEIRO, 2017).

Figura 14: Compactação e moldagem do concreto



Fonte: PINHEIRO, 2017

Durante a moldagem das lajes, suas superfícies são escovadas com a finalidade de garantir uma ponte de aderência com capa estrutural, conforme a Figura 15 (PINHEIRO, 2017).

Figura 15: Execução de ranhuras na superfície das lajes



Fonte: PINHEIRO, 2017

Após a etapa de moldagem, as lajes passam pelo processo de medição, e posteriormente marcação dos locais de corte e abertura (PINHEIRO, 2017).

A execução dos cortes e aberturas consiste em romper o concreto, no estado fresco da laje, utilizando uma régua, trena e colher de pedreiro, a fim de evitar a danificação da estrutura do elemento, conforme a Figura 16 (PINHEIRO, 2017).

Figura 16: Execução dos cortes e aberturas



Fonte: PINHEIRO, 2017

As Lajes Alveolares Protendidas geralmente possuem apenas armadura longitudinal protendida devido ao seu processo de fabricação que não permite a inserção de armaduras transversais, tais como estribos, para esforço cortante (SCHULTZ, 2010 *apud* PINHEIRO, 2017).

Em função da ausência de armadura transversal para resistir à força cortante, em algumas situações as lajes alveolares resistem ao momento fletor, mas não resistem ao esforço cortante, causando rupturas. O preenchimento de alvéolos com concreto nas extremidades da laje pode ser adotado como uma solução, aumentando a resistência ao esforço cortante por meio do aumento da área e da largura mínima da seção transversal de concreto da laje na região próxima aos apoios (PINHEIRO, 2017). Este processo consiste em romper a parte superior das lajes para proporcionar um acesso para o preenchimento. Para o rompimento pode ser utilizada uma régua de madeira para evitar a danificação da estrutura do elemento. O preenchimento pode ser feito com concreto de abatimento mais elevado (PINHEIRO, 2014).

Após finalizar os cortes e aberturas (e possíveis preenchimentos), as lajes são submetidas ao processo de cura por meio do uso de lona, com o objetivo de evitar a perda de umidade e calor ao ambiente e desse modo propiciar a liberação da protensão da pista dentro do tempo previsto (aproximadamente 12 horas), conforme a Figura 17 (PINHEIRO, 2017).

Figura 17: Processo de cura das lajes



Fonte: PINHEIRO, 2017

As lajes são submetidas a cura por um período de 12 horas, e após receber a liberação do laboratório e desprotender a pista de concretagem, é realizado o corte das lajes por meio de uma serra, conforme a Figura 18 (PINHEIRO, 2017).

Figura 18: Corte das lajes



Fonte: PINHEIRO, 2017

4. CÁLCULOS

Modelo de cálculo recomendado pela ABNT NBR 6118:2014.

A norma brasileira NBR 6118:2003 apresenta uma expressão para a verificação da resistência ao cisalhamento de lajes alveolares.

Segundo Catoia (2011), os cálculos teóricos das lajes alveolares frequentemente consideram a presença da capa de concreto, com espessura média em torno de 50mm, formando uma seção composta. Entretanto para efeito de cálculo deste trabalho, não estamos considerando o capeamento nas lajes alveolares em questão, tendo em vista o objetivo efetivo de distinguir os valores de influencias na força cortante, após aberturas nas lajes alveolares.

Modelo de cálculo segundo a ABNT NBR 6118-2014:

$$V_{Rd} = [0,25 f_{ctk,inf} * k * (1,2 + 40\rho_1) * 0,15\sigma_{cp,1}]$$

Sendo:

V_{Rd} : Resistência de projeto ao cisalhamento;

$f_{ctk,inf}$: Resistência à tração de projeto do concreto pré-moldado $f_{ct} =$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 * f_{ct,m}$$

ρ_1 : Taxa de armadura da seção alveolar pré-moldada $\rho_1 = \frac{A_s}{\sum b_{w,1}d}$

$\sigma_{cp,1}$: Tensão de compressão do concreto devida à força de protensão

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c}$$

K : Coeficiente $k = 1,6 - d \geq 1$;

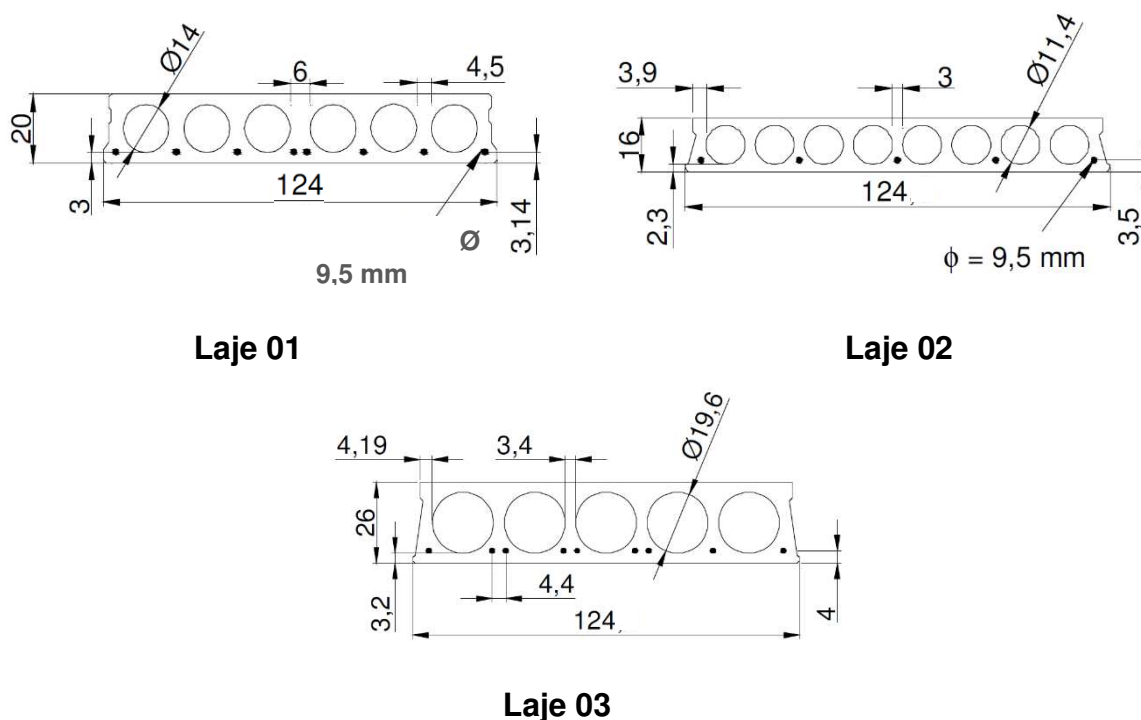
A_{s1} : Área de armadura de tração;

b_w : Largura mínima da seção ao longo da altura d ;

N_{sd} : Força longitudinal na seção devida a protensão ou carregamento (compressão positiva).

4.1. Tipologia das lajes alveolares para efeito de cálculos

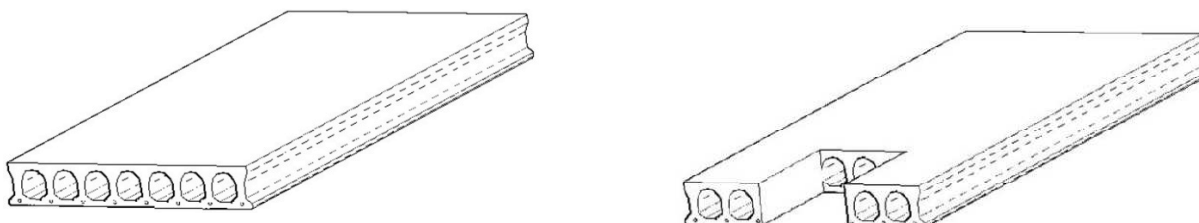
Figura 19: Dimensões das Lajes



Fonte: Elaborado pelos Autores.

Para avaliar a resistência ao cisalhamento das lajes alveolares desta pesquisa, os dimensionamentos das lajes serão padronizados no que se refere as dimensões de largura, sendo alterado as alturas, alvéolos e armaduras. Foi empregado também um modelo de abertura único para todas as medidas acima citadas, sendo esta com medida de 40 x 40cm, executada no centro da laje.

Figura 20: Lajes alveolares sem abertura e com abertura de 40x40cm



Fonte: PINHEIRO, 2017.

4.2. Características geométricas das lajes

Neste item serão apresentadas as características geométricas das lajes sem capa, podendo ser observados pela tabela 5. Considerando a comparação da laje com e sem abertura.

Tabela 5: Características geométricas das lajes

Laje	H_{LA} (m)	b (cm)	A_{tot} (m ²)	$\sum b_w$ (m)	d (m)
Laje 01 Sem abertura	0,200	124	0,1363	0,324	0,18725
Laje 01 Com Abertura	0,200	124	0,1022	0,262	0,18725
Laje 02 Sem abertura	0,160	124	0,1290	0,347	0,1357
Laje 02 Com Abertura	0,160	124	0,0650	0,2807	0,1357
Laje 03 Sem abertura	0,260	124	0,1750	0,261	0,2153
Laje 03 Com Abertura	0,260	124	0,1110	0,2111	0,2153

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Sendo:

H_{LA} : Altura da laje;

b: Largura da laje;

A_{tot} : Área total do concreto desconsiderando alvéolos;

$\sum b_w$: Soma das larguras das nervuras da laje na região central, onde o valor é mínimo;

d: Altura útil da seção transversal da laje.

4.3. Características das armaduras

Na tabela 6, consta as características das armaduras das peças utilizadas nos cálculos deste trabalho. A NBR 7483:2004 recomenda para cálculo estrutural a utilização do valor nominal da área da armadura ativa. Sendo assim, foram utilizados os valores nominais fornecidos pelos devidos fabricantes.

Tabela 6: Características das armaduras

Laje	Nº de Cordoalhas	ϕ Cordoalhas (mm)	F_p por Cabo (kN)	N_p Total (kN)	A_s (m ²)
Laje 01 Sem abertura	8,000	9,5	83,2	665,6	0,000448
Laje 01 Com Abertura	6,000	9,5	83,2	499,2	0,000336
Laje 02 Sem abertura	5,000	9,5	81,03	405,15	0,000278
Laje 02 Com Abertura	4,000	9,5	81,03	324,12	0,000222
Laje 03 Sem abertura	9,000	12,7	148,04	1332,4	0,000913
Laje 03 Com Abertura	5,000	12,7	148,04	1184,4	0,000507

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Sendo:

F_p : Força de protensão em um único cabo;

$N_{p\ total}$: Somatória das forças de protensão das cordoalhas inseridas na laje;

A_s : Área total das cordoalhas utilizadas na laje.

4.4. Resultado dos cálculos

Cálculo para laje 01

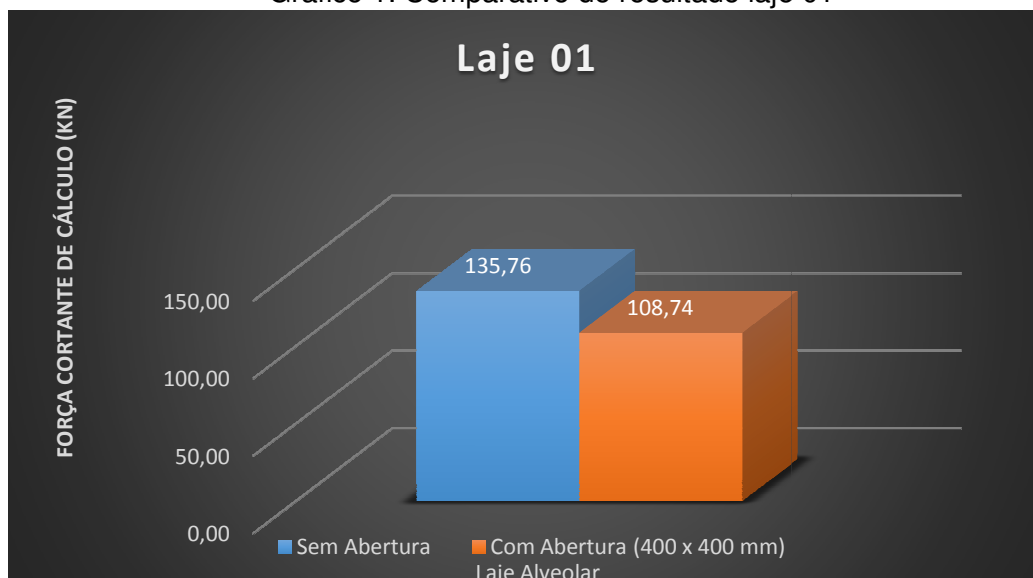
A seguir será apresentado o resultado da comparação entre a mesma laje executando uma abertura de 40x40 cm em uma delas, definindo a variação na resistência ao cisalhamento.

Figura 21: Cálculo para a laje 01

Sem Abertura		Com Abertura	
$V_{Rd 1} =$	135,76	$V_{Rd 1} =$	108,74
$f_{ck}(Ensaio) (MPa) =$	50	$f_{ck}(Ensaio) (MPa) =$	50
$f_{ct,m} =$	4,072	$f_{ct,m} =$	4,072
$f_{ct} = f_{ctk,inf}$	2850,14 Kn/m ²	$f_{ct} = f_{ctk,inf}$	2850,14 Kn/m ²
$K =$	1,413	$K =$	1,413
$\rho_1 =$	0,00738	$\rho_1 =$	0,00685
$\sigma_{cp,1} =$	4883,35	$\sigma_{cp,1} =$	4884,54

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Gráfico 1: Comparativo de resultado laje 01



Fonte: Elaborado pelos Autores.

De acordo com o gráfico 01, a laje alveolar com uma abertura de 40x40 cm, apresentou aproximadamente uma queda de 20% em sua resistência à força cortante.

Cálculo para laje 02

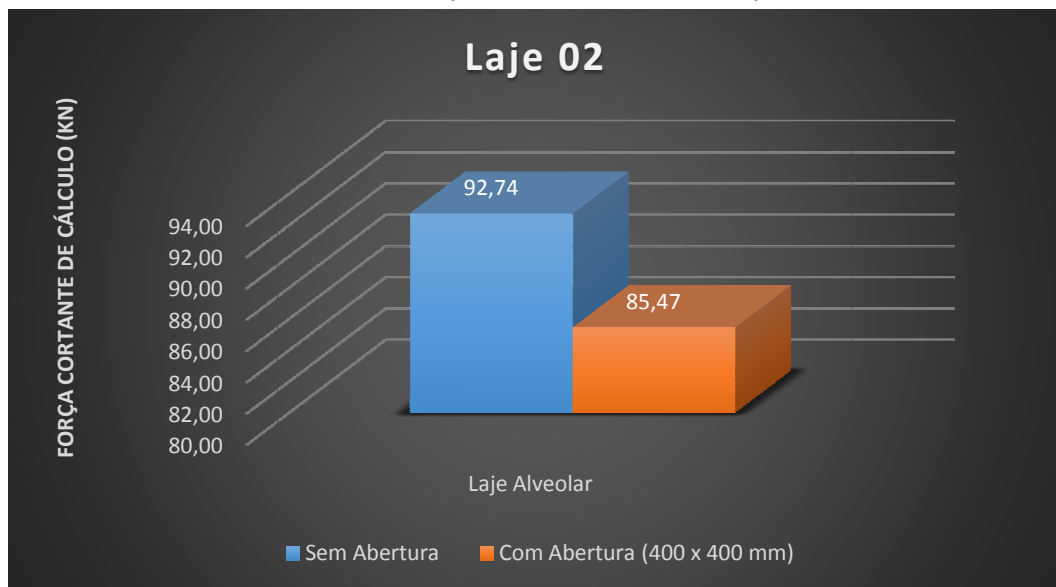
A seguir será apresentado o resultado da comparação entre a mesma laje executando uma abertura de 40x40 cm em uma delas, definindo a variação na resistência ao cisalhamento.

Figura 22: Cálculo para laje 02

Sem Abertura		Com Abertura	
$V_{Rd\ 2} =$	92,74	$V_{Rd\ 2} =$	85,47
$f_{ck}(Ensaio) (MPa) =$	50	$f_{ck}(Ensaio) (MPa) =$	50
$f_{ct,m} =$	4,072	$f_{ct,m} =$	4,071626425
$f_{ct} = f_{ctk,inf}$	2850,14 Kn/m ²	$f_{ct} = f_{ctk,inf}$	2850,14 Kn/m ²
$K =$	1,4643	$K =$	1,4643
$\rho_1 =$	0,00590	$\rho_1 =$	0,00584
$\sigma_{cp,1} =$	3140,70	$\sigma_{cp,1} =$	4986,46

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Gráfico 2: Comparativo de resultado laje 02



Fonte: Elaborado pelos Autores.

De acordo com o gráfico 1, a laje alveolar com uma abertura de 40 x 40 cm, apresentou aproximadamente uma queda de 8% em sua resistência à força cortante.

Cálculo para laje 03

A seguir será apresentado o resultado da comparação entre a mesma laje executando uma abertura de 40x40 cm em uma delas, definindo a variação na resistência ao cisalhamento.

Figura 23: Cálculo para laje 03

Sem Abertura		Com Abertura	
$V_{Rd\ 3} =$	182,69	$V_{Rd\ 3} =$	158,08
$f_{ck}(Ensaio) (MPa) =$	50	$f_{ck}(Ensaio) (MPa) =$	50
$f_{ct,m} =$	4,072	$f_{ct,m} =$	4,072
$f_{ct} = f_{ctk,inf}$	2850,14 Kn/m ²	$f_{ct} = f_{ctk,inf}$	2850,14 Kn/m ²
$K =$	1,6000	$K =$	1,6000
$\rho_1 =$	0,01625	$\rho_1 =$	0,01116
$\sigma_{cp,1} =$	7613,71	$\sigma_{cp,1} =$	10669,91

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Gráfico 3: Comparativo de resultado laje 03



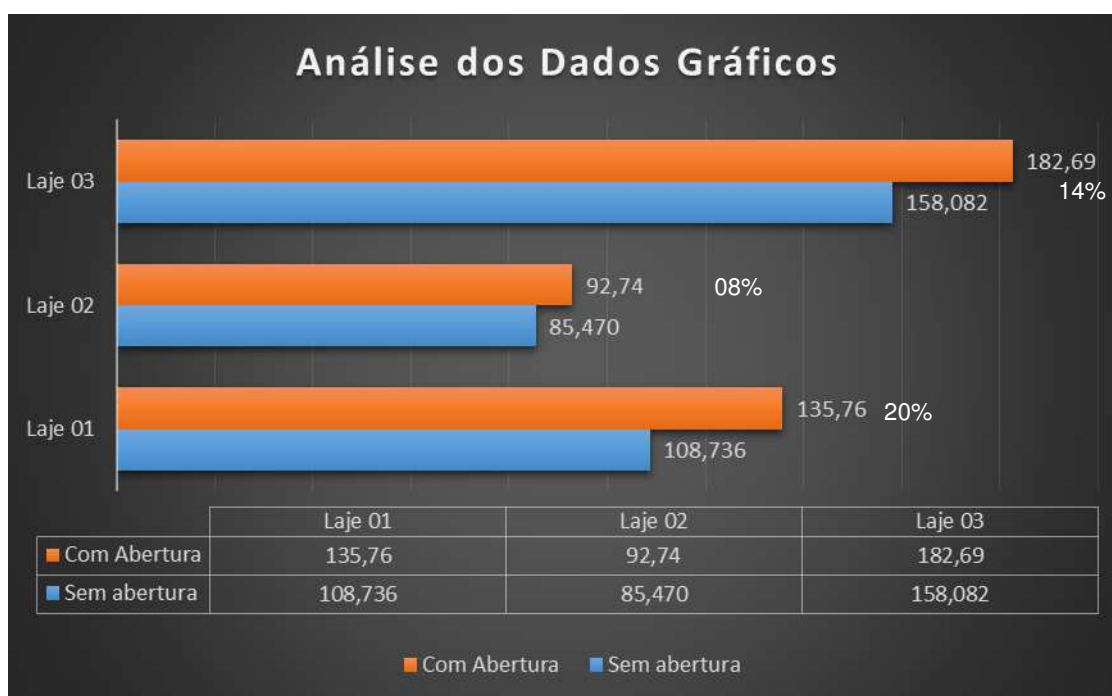
Fonte: Elaborado pelos Autores.

De acordo com o gráfico 2, a laje alveolar com uma abertura de 40 x 40 cm, apresentou aproximadamente uma queda de 14% em sua resistência à força cortante.

4.5. Análise dos resultados

Esse item traz a análise dos resultados dos cálculos realizados, bem como suas comparações, entre as lajes com e sem abertura.

Gráfico 4: Comparativo de resultado geral



Fonte: Elaborado pelos Autores.

O principal objetivo desta análise gráfica é avaliar de uma maneira geral a influência de aberturas em lajes alveolares por meio de cálculos que visam definir os valores de resistência ao esforço cortante.

Ao todo foram calculadas três lajes alturas diferentes de lajes alveolares, onde para cada modelo foram calculados com e sem aberturas. Com alturas de 16cm, 20cm e 26cm, medidas estas mais usuais em obras em concreto pré-fabricado. Dos modelos com abertura, foi desenvolvido e definido uma abertura de 400 x 400mm (usualmente adotada em obras em concreto pré-fabricado), localizada na parte frontal, centralizada.

De acordo com o gráfico 4, pode-se analisar que todas as lajes 01, 02 e 03, houveram perdas nos valores de resistência ao esforço cortante. Estas perdas de uma maneira geral ocorrem devida as reduções de área do concreto e perda das áreas de armadura. As perdas da área de concreto são iguais para todas as lajes, tendo em vista que a abertura é de 40cm na face da laje alveolar, porém os valores

da área de armadura são variáveis conforme o dimensionamento de cada uma delas, e é nisso que consiste as variações para mais ou para menos nos valores de forças cortantes. Ao cortar uma armadura na abertura, toda a sua protensão se perde, e isso causa uma grande diferença no cálculo de resistência ao esforço cortante.

Os valores de resistência ao esforço cortante da Laje 01 apresentaram perda de 20%, comparada com a mesma laje sem abertura.

Os valores de resistência ao esforço cortante da Laje 02 apresentaram perda de 08%, comparada com a mesma laje sem abertura.

Os valores de resistência ao esforço cortante da Laje 03 apresentaram perda de 14%, comparada com a mesma laje sem abertura.

Para todos os casos, as aberturas centrais de 400 x 400mm, nas lajes de diversas alturas, causaram perda na capacidade de resistência ao esforço cortante. Os cálculos foram elaborados segundo formulação contida na ABNT NBR 14861:2011.

CONCLUSÕES

Foi estudado neste trabalho o comportamento de lajes alveolares protendidas pré-moldadas com aberturas. Elaborado cálculos a partir de ensaios e experimentos anteriormente executados em teses e artigos.

Apesar do uso de lajes alveolares ter aumentado significativamente nesses últimos 20 anos, devido a sua praticidade de uso e preço competitivo, ainda não existem normatizações específicas nem referências técnicas que respondam a todas as especificidades do projeto destes elementos.

Ao avaliarmos a influência das aberturas em lajes alveolares a partir do levantamento da literatura que em sua maioria apresentaram, ensaios experimentais, análises gráficas comparativas de diferentes tipos de lajes e desejo por possíveis soluções para diminuir as perdas ocasionadas pelas aberturas, observa-se que as normas pré-estabelecidas para cálculo de lajes alveolares são de grande valia para a prospecção de possíveis propriedades geradas por diferentes tipos de aberturas nas LAPs.

A NBR-14861:2002 é específica para lajes alveolares pré-fabricadas, mas aborda apenas aspectos gerais do produto. Sendo assim existe uma grande necessidade de uma normatização técnica que defina os parâmetros que permitam o desenvolvimento de um programa de certificações das lajes alveolares no Brasil.

Portanto, concluiu-se ao executar uma abertura em lajes, com uma dimensão de 400 x 400mm (usualmente adotada em obras) ocorre uma perda de sua capacidade de resistência ao esforço cortante, que varia entre 8% a 20%. Para solucionar estas perdas de resistências, dentro do que foi ensaiado e já estudado, o procedimento que alcançou um resultado com um padrão satisfatório foi o preenchimento de alvéolos, devido ao aumento de resistência ao cisalhamento. Apesar da evidente melhoria na resistência da laje ao cisalhamento, o preenchimento de alvéolos deve sempre ser feito com cautela, uma vez que é difícil garantir boa aderência entre a laje e o concreto de preenchimento.

O maior problema está relacionado com as condições de produção das lajes alveolares protendidas, já que até o presente momento não existe uma tecnologia padronizada para o preenchimento adequado dos alvéolos. Sendo assim, caso o

preenchimento seja feito em obra, seria interessante realizar ensaios experimentais a fim de garantir a segurança dos elementos, tendo em vista a dificuldade e os riscos oferecidos na execução desse processo.

A análise do melhor material a ser empregado no preenchimento e um aspecto a ser considerado, o desenvolvimento de procedimentos e padronizações poderá proporcionar um grande avanço para com a qualidade dos preenchimentos e para com a segurança de sua aplicabilidade

Com os cálculos realizados conclui-se que a equação recomendada pelo NBR 6118:2003 fornece resultados satisfatórios para determinação da resistência ao cisalhamento para lajes alveolares protendidas.

De forma geral esse estudo mostra que as aberturas em lajes alveolares pré-fabricadas são necessárias e estão sendo realizadas diariamente nas mais diversas obras, seja para passagem das instalações hidráulicas, elétricas, ar condicionado ou simplesmente por algum detalhe arquitetônico requerido. É possível concluir que a execução de aberturas em lajes alveolares protendidas pré-fabricadas gera uma perda significativa na resistência ao esforço cortante. Mesmo sabendo que ainda não temos normatização técnica para isso, nosso dever como engenheiros responsáveis é calcular como minimizar as perdas de resistência que essas aberturas causarão, evitando o corte das cordoalhas protendidas e realizando-o no centro das extremidades da laje. Além disso, encontrar formas de aumentar a resistência perdida como o preenchimento dos alvéolos e o aumento na área das cordoalhas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKER, A. V. Manual de sistemas pré-fabricados de concreto. Tradução: Marcelo Ferreira (ABCIC-2002). 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2001.

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

BARBOZA, M. R. Concepção e análise de estruturas de edifícios em concreto armado. Bauru: UNESP - Relatório Final de Iniciação Científica n. 07., 2008.

BASTOS, P.S.S. Lajes de Concreto. Bauru: UNESP – Notas de Aula: Estruturas de Concreto I, 2015.

BISON PRECAST FLOORING SPECIFICATION, 2007.

BONI, R.; ROCHA, R.; ALMEIDA, T.; BRITZ, C.; HELENE, P. Boas práticas envolvidas em capeamento de lajes alveolares: Caso Parque da Cidade-SP, São Paulo: Outubro, 2015.

BRUMATTI, D. O. Uso de Pré-moldados: estudo e viabilidade. Vitória: UFMG, 2008.

CATOIA, B. Lajes alveolares protendidas: cisalhamento em região fissurada por flexão. Tese de doutorado - Departamento de Engenharia de Estruturas – USP: São Carlos, 2011.

COSTA, O.O. (2010). Avaliação de desempenho de elementos de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos: São Carlos, 2010.

CUNHA, A. J. P.; SOUZA, V. C. M. Lajes em concreto armado e protendido. 2. ed. Niterói: EDUFF, 1998.

EL DEBS, M.K. Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações. São Carlos: EESCUSP, Universidade de São Paulo, 2000.

FEDERATION INTERNATIONALE de la PRÉCONTAİNTE, FIP. Guide to good practice: quality assurance of Hollow core slabs. London, England. 1992.

GIUGLIANI, E. Aberturas em elementos estruturais de concreto. Curso de Engenharia Civil: Concreto Armado III – Curso de Engenharia Civil. Porto Alegre: PUCRS, 2013.

MARQUESI, M. L. G. Contribuição ao estudo dos mecanismos resistentes à força cortante em Lajes Alveolares Protendidas. UFSCAR: São Carlos, 2014.

NATIONAL PRECAST CONCRETE ASSOCIATION AUSTRALIA – NPCAA. Hollow Core Flooring – Technical Manual. Australia, 2003.

MILANI, C.J.; BOESING, R.; PHILIPPSEN, R. A.; MILOTI, L.A. Processo produtivo de elementos pré-moldados de concreto armado: detecção de manifestações patológicas. Artigos e Ensaio. USP, 2012.

NEW ZEALAND SOCIETY FOR EARTHQUAKE ENGINEERING/NEW ZEALAND CONCRETE SOCIETY/ STRUCTURAL ENGINEERING SOCIETY OF NEW ZEALAND - Seismic Performance of Hollow Core Floor Systems Guidelines for Design Assessment and Retrofit. New Zealand, 2009.

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE (PCI) Design Handbook 6th edition. Chicago, Illinois 2004.

PERIOTTO, B.C.; PINHEIRO, L. M.; FERREIRA, M. A. Emprego do capeamento estrutural para melhoria do desempenho de Lajes Alveolares Protendidas. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Volume 8. Nº 02. UFSCAR: São Carlos, 2014.

PIGOZZO, B. N.; SERRA, S.M.B.; FERREIRA, M. A. A industrialização na construção e o estudo de uma rede de empresas em obra de pré-fabricados em concreto armado. Bauru: XII SIMPEP, 2005.

PINHEIRO, G. L. Estudo da influência do preenchimento de alvéolos em lajes alveolares submetidas à força cortante. São Carlos: UFSC, 2014.

PINHEIRO, G. L. Estudo sobre a influência de aberturas e cortes oblíquos na resistência ao esforço cortante em lajes alveolares protendidas pré-fabricadas. São Carlos: UFSC, 2017.

REVEL, M. (1973). La prefabricacion em la construccion, 1.ed. Bilbao: Urmo.

ROCHA, A. M. (1972). Novo curso prático de concreto armado. Vol. 5: Concreto protendido. Rio de Janeiro: Científica.

RODRIGUES, P. P. F. Controle de qualidade na indústria de pré-fabricados. São Paulo: EPUSP, 1991. Boletim Técnico n. 49.

SERRA, S.M.B.; FERREIRA, M. A.; PIGOZZO, B. N. Evolução dos Pré-fabricados de Concreto. 1º Encontro Nacional de Pesquisa Projeto Produção em Concreto Armado. São Carlos: 2005.

SOUZA, C.G.S.; LOPES, R.C. Estudo comparativo entre laje maciça convencional e lajes nervuradas. Goiânia: UFGO, 2016.

VASCONCELOS, A. C. O Concreto no Brasil - pré-fabricação, monumentos, fundações. Volume III. São Paulo: Studio Nobel, 2002.

ZANON, E.B. Lajes Alveolares Protendidas Pré-Fabricadas e Maciças de Concreto Armado Moldadas in Loco: Comparativo dos Processos de Execução. Porto Alegre: UFRS, 2011.

ANEXO I

Modelo de cálculo segundo a ABNT NBR 14861:2011:

$$V_{RK} = [0,25 f_{ctk,inf} * k * (1,2 + 40\rho_1) * 0,15\sigma_{cp,1}]$$

$$f_{ct} = f_{ctk,inf} = 0,7$$

$$f_{ct} = f_{ctk,inf} = (0,7 * 50) \\ * 1000$$

$$K = 1,6 - d \geq 1, \text{ com } d \text{ em metros}$$

$$K = 1,6 - 0,18725m$$

$$K = 1,413$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{A_c}$$

$$\rho_1 = 0,000448 \text{ kN/m}^2$$

$$\rho_1$$

$$\sigma_{cp,1} = \frac{N_p}{A_c}$$

$$\sigma_{cp,1} = 666 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cp,1}$$

$$V_{RK} = [0,25 f_{ctk,inf} * k * (1,2 + 40\rho_1) * 0,15\sigma_{cp,1}]$$

$$V_{RK} = [0,25 * 2.850,14 * 1,413 * (1,2 + 40 * 0,00738) * 0,15 * 4.883,35] * 0,324$$

$$V_{RK}$$