

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil*

ARTHUR LIMA ROCHA

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE LAJES ALVEOLARES  
CONTÍNUAS EM PAVIMENTOS CONSIDERANDO O MECANISMO DE  
TRAÇÃO DIAGONAL**

São Carlos  
2023

ARTHUR LIMA ROCHA

DEFESA DE TESE

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE LAJES ALVEOLARES  
CONTÍNUAS EM PAVIMENTOS CONSIDERANDO O MECANISMO DE  
TRAÇÃO DIAGONAL**

Defesa de tese apresentada à  
Universidade Federal de São Carlos,  
como parte dos requisitos para a  
obtenção de Título de Doutor em  
Engenharia.

**Candidato:** Arthur Lima Rocha

**Orientador:** Prof. Dr. Marcelo de Araújo Ferreira

São Carlos  
2023

## ***Epígrafe***

---

“Todas as ciências exatas são dominadas pela ideia da aproximação”

Bertrand Russell

## **Agradecimentos**

---

Ao Professor Marcelo de Araújo Ferreira, pela orientação e apoio, tanto no mundo acadêmico, como na minha carreira profissional.

Aos meus pais, Nivaldo e Anai, e a minha irmã Cláudia, por toda base que me deram durante a vida para eu alcançar todos meus objetivos almejados.

À minha namorada, Vivian, por ter enfrentado comigo e apoiado desde a graduação até toda a jornada deste trabalho.

À empresa Marka Solução Pré-Fabricadas, por doar os elementos utilizados para os ensaios em prazos inimagináveis e por acompanhar todo o processo deste trabalho.

À engenheira Bruna Catoia, a qual foi responsável por garantir que todos os itens necessários para execução dos ensaios estivessem à disposição e pela ajuda na interpretação dos resultados.

A todos meus amigos, distantes ou não, que me ajudaram a concluir esta jornada.

## RESUMO

ROCHA, A. L. **Resistência ao cisalhamento de lajes alveolares contínuas em pavimentos a partir do mecanismo de tração diagonal**. 2023. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023

O sistema de pavimentos em lajes alveolares contínuas com capa estrutural está sendo cada vez mais utilizado na construção civil. Com isso, diferentes tipos de carregamentos ocorrem sobre as lajes, sendo, em muitos casos, ações pontuais de grande intensidade. Com isso, a necessidade de se entender os mecanismos de resistência às tensões de cisalhamento desses tipos de pavimento com elementos compostos se mostra plausível, pois a literatura existente não abrange as situações de continuidade entre os elementos e capa de concreto moldado no local. Para isso, foi feita a verificação a partir de ensaio em situação de continuidade, utilizando a teoria existente. A partir dos dados verificados, lajes alveolares sem capa, com capa e contínuas com capa estrutural submetidas a ações concentradas podem ter o mecanismo de tração diagonal alcançado. Para que isso ocorra, deve-se garantir a não fissuração da região de transferência de protensão, o que é facilitada para situações com continuidade, e detalhes são necessários para manter a ligação entre capa e laje alveolar.

Palavras chaves: Lajes alveolares, ações concentradas, força cortante, continuidade, elemento composto.

## **ABSTRACT**

ROCHA, A. L. **Shear strength of continuous hollow core slab floors using tension shear mechanism.** 2023. Thesis (Doctoral) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023

The use of continuous hollow core slabs with structural topping floors has increased in the past few years in the civil construction. By reason of this use, different types of loads can occur on the hollow core slabs units, such as high intensity point loads. In this way, the necessity to understand the shear strength mechanisms of this kind of floor systems with composite elements is essential, because there is a lack of existent literature about situations with continuity and topping on site. For this, validation was carried out based on a test in a continuous situation, using the existing theory. From the verified data, hollow core slabs without topping, with topping and continuous with structural toppings subjected to point loads can have the tension shear mechanism achieved. For this to occur, one must ensure that the prestressing transmission length does not crack, which is facilitated for situations with continuity and details are necessary to maintain the connection between topping and hollow core slab.

Keywords: Hollow core slabs, point loads, shear force, continuity, composite element.

## Lista de Figuras

---

Figura 1: Seção transversal de uma laje alveolar.....	18
Figura 2: Possibilidades de seções transversais de lajes alveolares .....	19
Figura 3: Equipamentos para produção de lajes alveolares: (a) Extrusora; (b) Moldadora; (c) Forma contendo tubos de aço; (d) Formas com tubo de plástico preenchidos com ar; (e) Uso de isopor para formação dos alvéolos. ....	20
Figura 4: Ligação entre lajes alveolares a partir da chaveta preenchida e capa estrutural de concreto.....	21
Figura 5: Espessura mínima recomendada para a mesa superior sobre o alvéolo...	23
Figura 6: Largura mínima para juntas longitudinais.....	24
Figura 7: Tirantes necessários em pavimentos de laje sem capa .....	25
Figura 8: Laje alveolar com capa de concreto.....	26
Figura 9: Possibilidades de continuidade em lajes alveolares: (a) Continuidade a partir de armaduras na capa estrutural; (b) Continuidade a partir de armadura colocada em alvéolos grauteados.....	29
Figura 10: Sistema estático de lajes alveolares contínuas .....	29
Figura 11: Caminho da compressão em lajes alveolares contínuas .....	29
Figura 12: Mecanismo de resistência em apoio de lajes alveolares com armadura de continuidade negativa na capa estrutural.....	32
Figura 13: Tipo de ruptura que podem ocorrer em elementos sem armadura transversal.....	33
Figura 14: Ruptura por escorregamento da interface .....	33
Figura 15: Tipos de ruptura devido ao vão e carregamento distribuído .....	34
Figura 16: Mecanismos de ruptura dependentes da relação a/d.....	36
Figura 17: Mecanismo de ruptura à força cortante de acordo com a flexão.....	37
Figura 18: Resistência à força cortante em região fissurada .....	38
Figura 19: Mecanismos básicos de transferência de força cortante.....	38
Figura 20: Cálculo da contribuição da protensão ( $V_p$ ) na resistência ao cisalhamento .....	41
Figura 21: Comprimento de transferência na liberação da protensão (1) e no ELU (2) .....	46
Figura 22: Localização do ponto crítico tradicional.....	48
Figura 23: Localização do ponto crítico de acordo com a seção transversal .....	49
Figura 24: Verificação do ponto crítico .....	52
Figura 25: Verificação do ponto crítico para lajes com alvéolos circulares .....	53
Figura 26: Verificação do ponto crítico para lajes com alvéolos poligonais.....	54
Figura 27: Problemas na interface .....	57
Figura 28: Mecanismo de resistência da interface .....	59
Figura 29: Armadura de costura da interface laje - capa.....	60
Figura 30: Possibilidades de armadura de costura na interface laje - capa .....	60
Figura 31: Junta na interface.....	61
Figura 32: Lajes alveolares com esforços de torção .....	63
Figura 33: Distribuição de tensões transversais na seção de uma laje alveolar .....	64
Figura 34: Comportamento de um pavimento em lajes alveolares submetido a uma força concentrada .....	66
Figura 35: Distribuição de cargas concentradas .....	68
Figura 36: Espessura efetiva.....	68
Figura 37: Mecanismo de distribuição transversal de cargas em lajes alveolares ....	69
Figura 38: Superposição de efeitos de cisalhamento e torção .....	71

Figura 39: Consideração de seção como um tubo para a cálculo da torção .....	71
Figura 40: Distribuição de carga linear no meio do vão .....	72
Figura 41: Fatores de distribuição de cargas lineares/pontuais no meio do vão (esquerda) e nas laterais (direita) .....	74
Figura 42: Formato assumido das tensões de cisalhamento nas chavetas .....	74
Figura 43: Largura efetiva de lajes alveolares para resistir a ações concentradas em qualquer ponto de seu pavimento .....	75
Figura 44: Tipos de vão de cisalhamento .....	77
Figura 45: Esquema de ensaios de continuidade (vista lateral e frontal) .....	79
Figura 46: Esquema de ensaios de continuidade (vista lateral e frontal) .....	80
Figura 47: Mapa de instrumentação para ensaio. ....	82
Figura 48: Visão do modelo ensaiado. ....	83
Figura 49: Vista da lateral que sofreu ruptura .....	83
Figura 50: Deslocamento vertical das lajes no ensaio do lado esquerdo .....	84
Figura 51: Ações na laje durante o ensaio .....	85
Figura 52: Diagrama de força cortante no instante da ruptura por escorregamento da capa .....	85
Figura 53: Diagrama de momento fletor no instante da ruptura por escorregamento da capa .....	86
Figura 54: Arranjos para ensaio de lajes ao cisalhamento .....	97
Figura 55: Arranjos para ensaio de lajes ao cisalhamento .....	98
Figura 56: Arranjos para ensaio ao cisalhamento de lajes sem capa .....	99
Figura 57: Forma e armação da laje alveolar que receberá capa .....	100
Figura 58: Processo de cura da laje alveolar com capa .....	101
Figura 59: Arranjos para ensaio ao cisalhamento de lajes com capa .....	101
Figura 60: Detalhamento da viga de apoio central do ensaio com armaduras expostas .....	102
Figura 61: Arranjos para ensaio ao cisalhamento de lajes contínuas com capa: (a) Vista da montagem da forma; (b) Vista da posição dos extensômetros; (c) Vista da posição das armaduras anteriormente ao capeamento .....	102
Figura 62: Processo de cura lajes contínuas com capa .....	103
Figura 63: Arranjos para ensaio ao cisalhamento de lajes contínuas com capa: (a) Vista lateral; (b) Vista de topo; (c) Corte AA .....	104
Figura 64: Travamento da viga de apoio central na laje de reação .....	105
Figura 65: Travamento da viga de apoio central na laje de reação .....	105
Figura 66: Ensaio de cisalhamento em laje alveolar .....	106
Figura 67: Seção Teórica e seções reais ensaiadas (medidas em mm): (a) Seção transversal teórica; (b) Seção transversal da laje 1 .....	107
Figura 68: Momento fletor máximo alcançada no ensaio – Laje 1 .....	108
Figura 69: Momento fletor máximo possível no ensaio – Laje 1 sem capa .....	109
Figura 70: Diagrama Força-Deslocamento – Laje 1 .....	110
Figura 71: Força cortante máxima alcançada no ensaio – Laje 1 .....	111
Figura 72: Fissura de Ruptura – Lado Esquerdo– Laje 1 .....	111
Figura 73: Fissura de Ruptura – Lado Direito– Laje 1 .....	112
Figura 74: Ensaio de cisalhamento em laje alveolar com capa .....	113
Figura 75: Seção Teórica e seções reais ensaiadas com medidas em mm: (a) seção transversal teórica; (b) Seção real da laje com capa .....	114
Figura 76: Momento fletor máximo possível no ensaio – Laje com capa .....	115
Figura 77: Momento fletor máximo alcançada no ensaio – Laje com capa .....	116
Figura 78: Rugosidade da superfície superior da laje ensaiada .....	118



Figura 79: Capa de concreto com destacamento prévio .....	119
Figura 80: Diagrama Força-Deslocamento – Laje com capa .....	119
Figura 81: Força cortante máxima alcançada no ensaio – Laje com capa.....	120
Figura 82: Fissura de ruptura – lado direito -laje com capa .....	120
Figura 83: Fissura de ruptura – lado esquerdo -laje com capa .....	121
Figura 84: Ensaio em lajes alveolares contínuas .....	122
Figura 85: Seção Teórica e seções reais ensaiadas com medidas em mm: (a) Seção transversal teórica; (b)seção transversal da laje do Lado A com capa; (c) seção transversal da laje do Lado B com capa .....	123
Figura 86: modelo utilizado para estudo do sistema contínuo .....	125
Figura 87: Momento fletor sem redistribuição de esforços .....	125
Figura 88: Momento fletor com redistribuição de esforços .....	126
Figura x89: Força cortante redistribuição de esforços.....	126
Figura 90: Momento fletor máximo positivo e negativo alcançada no ensaio – Laje contínua .....	127
Figura 91: Momento fletor máximo positivo e negativo alcançada no ensaio – Laje contínua .....	130
Figura 92: Relatório do ensaio de corpos de prova.....	130
Figura 93: Diagrama Força-Deslocamento – Laje com capa e continuidade.....	131
Figura 94: Diagrama Força-Tensão na armadura – Laje B com capa e continuidade .....	132
Figura 95: Diagrama Força-Rotação – Laje com capa e continuidade.....	132
Figura 96: Fissura de Ruptura – Laje A com capa e continuidade .....	133
Figura 97: Fissura de Ruptura – Laje B com capa e continuidade .....	133
Figura 98: Ancoragem das armaduras após ruptura da laje – Laje B com capa e continuidade.....	134
Figura 99: Situação do sistema após ensaio.....	135
Figura 100: Aderência entre concreto da laje e da capa e situação do concreto nas nervuras .....	136
Figura 101: Diagrama Força-Deslocamento com linhas de tendência – laje com capa .....	139
Figura 102: Idealização da tensão de tração devido distorção do sistema .....	140
Figura 103: Início do destacamento da capa – laje com capa e continuidade .....	141
Figura 104: Diagrama Força-Deslocamento com linhas de tendência – laje com capa e continuidade.....	142
Figura 105: Diagrama Força-tensão na armadura com linhas de tendência – laje com capa e continuidade .....	143
Figura 106: Diagrama Força-rotação – laje com capa e continuidade .....	143
Figura 107: Mecanismo secundário – laje com capa e continuidade .....	145
Figura 108: Distribuição de ações em lajes com aberturas.....	146

## ***Lista de Tabelas***

---

Tabela 1: Vantagens e desvantagens no uso de continuidade em lajes alveolares..	31
Tabela 2: Coeficiente de coesão e atrito .....	61
Tabela 3: Coeficiente de adesão e atrito .....	62
Tabela 4: Características da seção transversal da laje ensaiada.....	81
Tabela 5: Resistência teórica da laje alveolar sem capa.....	108
Tabela 6: Resistência teórica da laje alveolar 1 sem capa.....	110
Tabela 7: Resistência teórica da laje alveolar com capa.....	115
Tabela 8: Resistência teórica da laje alveolar com capa ensaiada .....	118
Tabela 9: Resistência teórica da laje alveolar com capa.....	124
Tabela 10: Resistência teórica da laje alveolar com capa e contínua.....	129
Tabela 11: Comparação de Resultado Teóricos x Resultados de Ensaio - Laje sem capa .....	137
Tabela 12: Comparação de Resultado Teóricos x Resultados de Ensaio - Laje com capa .....	139
Tabela 13: Comparação de Resultado Teóricos x Resultados de Ensaio - Laje com capa e continuidade .....	144

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>6</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>14</b>
<b>1.2 QUESTÕES DE PESQUISA</b> .....	<b>14</b>
<b>1.3 OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
<b>1.4 MÉTODOS DE PESQUISA</b> .....	<b>15</b>
<b>1.5 DELIMITAÇÕES</b> .....	<b>16</b>
<b>1.6 ESTRUTURA DA TESE</b> .....	<b>17</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1 Seção transversal de lajes alveolares</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2 Pavimentos de lajes alveolares sem capa</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3 Pavimentos de lajes alveolares com capa estrutural</b> .....	<b>26</b>
<b>2.4 Pavimentos de lajes alveolares contínuas</b> .....	<b>28</b>
<b>2.5 Mecanismos de ruptura de lajes alveolares</b> .....	<b>32</b>
2.5.1 Mecanismos de ruptura à flexão .....	35
2.5.2 Mecanismos de ruptura ao cisalhamento de lajes alveolares .....	35
2.5.3 Mecanismos de ruptura da interface entre laje alveolar e capa .....	55
2.5.4 Mecanismos de ruptura por torção .....	63
<b>2.6 Ações pontuais</b> .....	<b>65</b>
2.6.1 Método FIB (2019).....	72
2.6.2 Método PCI (2015).....	74
<b>2.7 Interação entre momento e cortante</b> .....	<b>76</b>
<b>3. MODELO E MÉTODOS DE ENSAIO</b> .....	<b>79</b>
<b>3.1 Ensaio de lajes alveolares com continuidade de Santos (2014)</b> .....	<b>80</b>
3.1.1 Esforços solicitantes nas lajes alveolares CONTÍNUAS .....	84
3.1.2 Resistência das lajes alveolares .....	87
3.1.3 Momento fletor resistente .....	87
3.1.4 Momento de fissuração.....	89
3.1.5 Resistência ao cisalhamento na interface .....	90
3.1.6 Resistência à força cortante – flexo-cortante.....	91
3.1.7 Resistência a força cortante – tração diagonal.....	93
3.1.8 Interação entre flexão e cisalhamento .....	95
<b>3.2 Ensaio de resistência ao cisalhamento em lajes alveolares sem capa</b> .....	<b>96</b>
<b>3.3 Ensaio de resistência ao cisalhamento em lajes alveolares com capa</b> .....	<b>99</b>
<b>3.4 Ensaio de resistência ao cisalhamento em lajes alveolares com capa e continuidade</b> .....	<b>101</b>
<b>4. ENSAIO DE LAJE ALVEOLAR SEM CAPA E BIAPOIADA</b> .....	<b>106</b>

<b>5. ENSAIO DE LAJE ALVEOLAR COM CAPA E BIAPOIADA.....</b>	<b>113</b>
<b>6. ENSAIO DE LAJES ALVEOLARES COM CAPA E CONTÍNUAS .....</b>	<b>122</b>
<b>7. ANÁLISES DE RESULTADOS .....</b>	<b>137</b>
<b>7.1 Análise de ensaio de laje alveolar sem capa .....</b>	<b>137</b>
<b>7.2 Análise de ensaio de laje alveolar com capa.....</b>	<b>138</b>
<b>7.3 Análise de ensaio de laje alveolar com capa e continuidade.....</b>	<b>141</b>
<b>8. CONCLUSÃO.....</b>	<b>147</b>
<b>8.1 – Propostas para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>148</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>149</b>
<b>Apêndice A – Dimensionamento da laje alveolar protendida teórica .....</b>	<b>153</b>
<b>Apêndice B – Cálculo da força cortante resistente teórica e real.....</b>	<b>167</b>

# 1. INTRODUÇÃO

As lajes alveolares são um dos elementos pré-fabricados mais utilizados na construção civil atual. Ela oferece a possibilidade de montagem de grandes pavimentos com velocidade, segurança, controle e otimização de materiais e com bastante eficiência. Sendo assim, sua utilização é recorrente em diferentes tipos de obra, com diversas possibilidades de carregamentos e solicitações.

Nos últimos anos, o uso de lajes alveolares em locais com grandes cargas concentradas vem aumentando, sendo, então, necessário entender os mecanismos resistentes desse elemento pré-fabricado. Para esse tipo de ação, mostra-se como prioridade a compreensão dos mecanismos de resistência à força cortante, pois a maioria das lajes não apresentam armadura transversal. Também para essas situações, a interação entre os elementos adjacentes torna-se importante, pois essa interação é responsável pelo comportamento em conjunto do pavimento.

No Brasil, os pavimentos em lajes alveolares são cobertos com uma capa de concreto, na qual são colocadas armaduras negativas que provocam a continuidade entre os elementos pré-fabricados. Com a utilização dessa capa, o funcionamento do elemento laje e do pavimento é melhorado.

Contudo, não há estudos suficientes para se entender o funcionamento de lajes submetidas a ações concentradas e o modo pelo que ocorre o trabalho em conjunto do pavimento quando ele é contínuo e com capa estrutural.

A literatura mostra como é o comportamento de pavimentos de lajes alveolares biapoiadas sem capa, com capa e com continuidade, e os mecanismos de resistência à força cortante para situações de cargas distribuídas uniformemente. Com isso, é constatada a lacuna de conhecimento sobre o assunto de ações concentradas.

Este trabalho se embasou nas referências bibliográficas, ensaios realizados por Santos (2014) e novos ensaios realizados para entender o comportamento de lajes alveolares sem capa, com capa e com capa e continuidade, quando submetidas a ações concentradas.

A partir dessas informações, foi possível observar a possibilidade de se atingir o mecanismo de tração diagonal nessas lajes desde que não se fissure por flexão a

região de transferência de protensão e garanta, para situações onde há a seção composta, a ligação entre a laje e a capa.

Observou-se também que, para situações com continuidade, além de diminuir as tensões de tração na região de transferência de protensão nas lajes alveolares, há a presença de mecanismos secundários, os quais evitam a ruptura total do sistema.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Pavimentos em lajes alveolares são utilizados em estruturas pré-fabricadas por serem um produto industrializado, otimizado, capaz de vencer grandes vãos e com grande resistência a ações de utilização. Com isso, as empresas os veem como uma alternativa viável para construção de pátios industriais, centro de distribuição, entre outros estabelecimentos.

Como nessas tipologias de edificação a presença de ações pontuais elevadas ocorrem com bastante frequência (maquinário, equipamentos de transporte de carga, estocagem, entre outros), os desempenhos, tanto do pavimento como um todo, como das unidades de lajes alveolares devem ser verificados.

No Brasil, a utilização de capa estrutural possibilita maior interação entre lajes alveolares quanto à resistência às ações concentradas. Contudo, a utilização de ligações negativas, possibilitadas devido à maior facilidade em realizá-las junto à capa, gera uma modificação nas deformações dos elementos, modificando também a distribuição de esforços nas lajes.

Este estudo se justifica, pois há a necessidade de se entender e discretizar os mecanismos resistentes de lajes alveolares quando elas apresentam ligações negativas sobre seus apoios e estão submetidas a ações pontuais, para melhor dimensioná-las, trazendo segurança e economia para o pavimento.

## **1.2 QUESTÕES DE PESQUISA**

Com o intuito de entender a resistência à tensões de cisalhamento de lajes alveolares contínuas submetidas a ações concentradas, levantam-se as seguintes questões a serem respondidas:

- Ao se utilizar continuidade em lajes alveolares, qual é a modificação que ocorre na região da ligação entre as lajes?
- Essa ligação modifica a resistência da interface entre laje e capa estrutural?
- Essa ligação modifica a resistência ao cisalhamento de lajes alveolares?
- Existindo ações concentradas próximas de apoio de lajes alveolares contínuas, é necessário levar em consideração a interação entre momento fletor e força cortante nas verificações?

### 1.3 OBJETIVOS

Analisar e descrever o comportamento de pavimento feito com lajes alveolares contínuas e capa estrutural submetido a cargas concentradas, verificando sua resistência às tensões de cisalhamento a partir do mecanismo de tração diagonal.

### 1.4 MÉTODOS DE PESQUISA

Para o presente trabalho, o método utilizado para alcançar os objetivos descritos é o hipotético-dedutivo. Segundo Santos (2004), este método se inicia pela percepção da falta de conhecimento, procurando então, a partir de formulação de hipóteses, encontrar respostas que corroboram ou não com o que foi suposto.

Sendo o objetivo deste trabalho verificar os mecanismos existentes de resistência à força cortante em lajes alveolares contínuas com capa estrutural submetidas a cargas pontuais, este estudo adota as seguintes fases de pesquisa:

**1ª Fase – Fundamentação Teórica:** Nesta fase, foram compiladas, através da literatura, todas as informações necessárias para o desenvolvimento do estudo. Foi realizado o aprofundamento no conhecimento existente sobre os mecanismos de resistência ao cisalhamento de lajes alveolares (flexo-cortante e tração diagonal) sem armadura transversal. Foram também pesquisadas as modificações no padrão de esforços internos em pavimentos de lajes alveolares quando submetidas a cargas pontuais. Além disso, foi detalhado o funcionamento composto de lajes alveolares com capa estrutural armada sobre seus apoios, causando a continuidade delas. Nesta

parte da fundamentação teórica, foram estudadas as modificações que ocorrem nos mecanismos resistentes ao cisalhamento devido à continuidade da laje, avaliando também a resistência da interface do concreto pré-fabricado da laje e o da capa estrutural, além da interação que pode ocorrer entre flexão e cisalhamento.

**2ª Fase – Verificação teórica de ensaios já realizados:** A partir dos ensaios realizados por Santos (2014), foi feita a verificação de tensões nos pontos críticos das lajes estudadas. Esta fase tem como intuito entender quais foram os mecanismos degradados durante o teste, fornecendo subsídio para melhor instrumentação a ser feita nos protótipos utilizados na terceira fase do estudo.

**3ª Fase – Ensaio de modelos em escala real:** Nesta etapa, foram ensaiadas lajes alveolares com 4735 mm de comprimento, sendo todas lajes com altura de 265 mm e com seção transversal poligonal. Foi realizado um ensaio de laje sem capa, um ensaio de laje com capa de 50 mm de espessura e um ensaio de lajes contínuas com capa estrutural também com 50 mm. Os ensaios consistiram em verificar a resistência à força cortante das lajes a partir de carga concentrada próxima ao apoio e também a resistência de todo o sistema estrutural. A instrumentação foi feita a partir da literatura clássica e das verificações feitas na segunda fase deste estudo.

**4ª Fase – Análise de Resultados e Conclusão:** Com as informações coletadas na segunda e terceira fase deste trabalho, foi analisado o comportamento das lajes contínuas com capa estrutural em relação à sua resistência à força cortante decorrente de cargas pontuais. Nesta fase, são verificadas as hipóteses levantadas em relação à resistência das lajes, confirmando ou não sua validade. A partir das questões apresentadas, é feita a conclusão do estudo.

## 1.5 DELIMITAÇÕES

Delimita-se o estudo das lajes alveolares contínuas submetidas a ações transversais concentradas:

- Lajes alveolares pré-fabricadas com espessura de 265 mm;



- Utilização de capa de concreto com no mínimo 50 mm de espessura;
- Utilização da armadura total necessária para a continuidade;
- Continuidade entre apenas duas lajes alveolares;
- Lajes com alvéolos poligonais.

## **1.6 ESTRUTURA DA TESE**

O trabalho apresenta a verificação da resistência à força cortante de lajes alveolares contínuas submetidas a cargas pontuais, sendo que a divisão dos capítulos é dada a seguir:

Capítulo 1: Introdução ao assunto, justificando-o e estabelecendo seus objetivos. Nele, mostrou-se a metodologia utilizada para seu desenvolvimento e suas delimitações.

Capítulo 2: Refere-se ao aprofundamento teórico. Nele, foram detalhados os mecanismos de resistência à força cortante de lajes alveolares com capa estrutural, continuidade de lajes alveolares, interface entre concreto moldado no local e concreto pré-fabricado, ações pontuais em lajes e interação entre momento fletor e força cortante. Tais assuntos dão base para formulação de hipóteses a serem estudadas.

Capítulo 3: Nesse capítulo, estudou-se o ensaio realizado por Santos (2014), fazendo todas as verificações obtidas a partir da revisão bibliográfica. Com os resultados, fez-se a formulação de hipóteses sobre os mecanismos resistentes e apresentou-se o método de ensaio utilizado neste estudo.

Capítulo 4: Foram mostrados os resultados obtidos nos ensaios de lajes alveolares biapoiadas sem capa submetidas a ações concentradas.

Capítulo 5: Foram mostrados os resultados obtidos nos ensaios de lajes alveolares biapoiadas com capa submetidas a ações concentradas.

Capítulo 6: Foram mostrados os resultados obtidos nos ensaios de lajes alveolares contínuas com capa submetidas a ações concentradas.

Capítulo 7: Com os resultados obtidos, foram feitas as análises dos resultados e respondidas as questões da pesquisa.

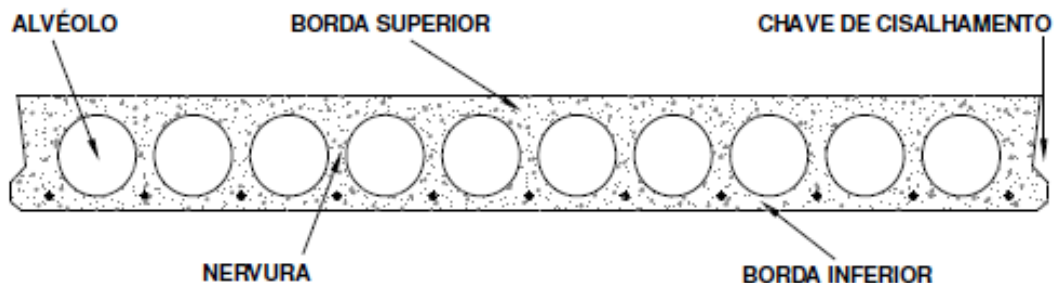
Capítulo 8: Refere-se à conclusão encontrada a partir de todo o estudo.

Por fim, serão apresentados as referências bibliográficas e os apêndices.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As lajes alveolares são elementos pré-moldados (ou pré-fabricados) com armaduras longitudinais pré-tracionadas e, em sua grande maioria, sem armaduras transversais. Tais lajes apresentam alvéolos contínuos que diminuem seu peso e seu custo (PCI, 2015). De acordo com a FIB (2019), a seção transversal de uma laje alveolar tem 30 a 50% de sua área retirada devido aos alvéolos, sendo então criadas nervuras externas e internas, as quais ligam a mesa (borda) superior e inferior da laje (Figura 1). Os alvéolos podem apresentar diferentes geometrias de acordo com o método de produção empregado (Figura 2). Por toda a lateral da laje alveolar, em seu sentido longitudinal, há a necessidade de criação de uma chave de cisalhamento para que, após a montagem das lajes, elas possam ter comportamento estrutural em conjunto.

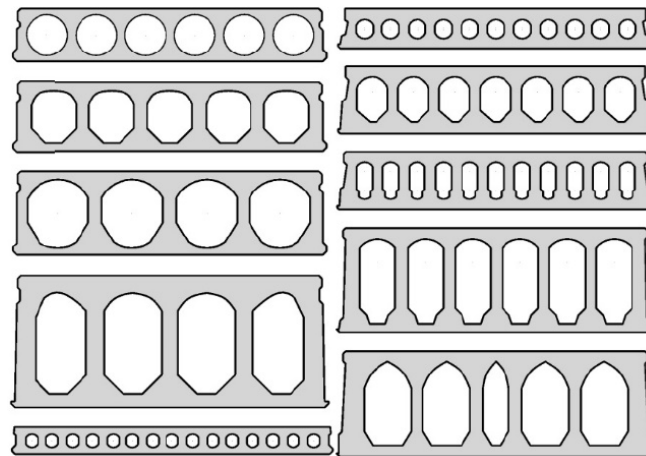
Figura 1: Seção transversal de uma laje alveolar



Fonte: Santos (2014)

As lajes alveolares, que foram desenvolvidas nos anos 1950 nos Estados Unidos, são agora as mais utilizadas na Europa, representando de 40 a 60% do mercado de lajes pré-fabricadas. No Brasil, a utilização de lajes alveolares se intensificou a partir da publicação da norma ABNT NBR 14861:2011, segundo Marin (2019). Esse sucesso se deve tanto à grande eficiência de seu dimensionamento, métodos de produção, diferentes alturas das unidades, capacidade resistente, acabamento da superfície e eficiência estrutural, como a outras características: uso otimizado de materiais, esbeltez, velocidade de construção e consciência ambiental (FIB, 2019).

Figura 2: Possibilidades de seções transversais de lajes alveolares



Fonte: FIB (2019)

Lajes alveolares são utilizadas principalmente em coberturas e pisos de edificações com vãos entre 5 e 20 metros, sendo eles prédios de escritórios, hospitais, escolas, *shoppings centers*, estacionamentos, indústrias, entre outros. Na Europa, utiliza-se também em residências graças ao custo e à rápida montagem. As unidades são protendidas usando camadas de fios ou cordoalhas, mas, para pequenos vãos, podem ser armadas. As lajes alveolares podem também ser utilizadas como painéis verticais. Os painéis de lajes alveolares são simetricamente protendidos com duas camadas de fios ou cordoalhas (FIB, 2019).

As lajes são feitas em longas linhas de produção com largura que variam de 0,6 metros a 2,5 metros (preferencialmente 1,2m – 4 pés), usando equipamentos com formas deslizantes que formam os alvéolos (sendo elas as extrusoras e as moldadoras), ou a partir de formas com moldes para os vazios (alvéolos) feitos com tubos metálicos, tubos de plástico preenchidos com ar, água ou isopor (Figura 3).

De acordo com Petrucelli (2009), a produção consiste em se concluir oito etapas, sendo elas:

1. Preparo da pista, através da limpeza e aplicação do desmoldante;
2. Posicionamento dos cabos de protensão;
3. Lançamento do concreto e produção da laje;
4. Marcação dos painéis (pré-cortes) e possíveis recortes na pista;
5. Endurecimento e cura;
6. Liberação da protensão e corte das lajes;
7. Içamento e estocagem;

8. Recorte e acabamentos (quando necessários).

Na produção, deve-se tomar cuidado entre a etapa um e dois, evitando que a armadura de protensão entre em contato com o desmoldante, para que não ocorra o escorregamento da armadura protendida. É possível existir uma nova fase entre as etapas quatro e cinco, quando há a necessidade de se preencher alguns alvéolos para aumento de resistência à força cortante.

Figura 3: Equipamentos para produção de lajes alveolares: (a) Extrusora; (b) Moldadora; (c) Forma contendo tubos de aço; (d) Formas com tubo de plástico preenchidos com ar; (e) Uso de isopor para formação dos alvéolos.

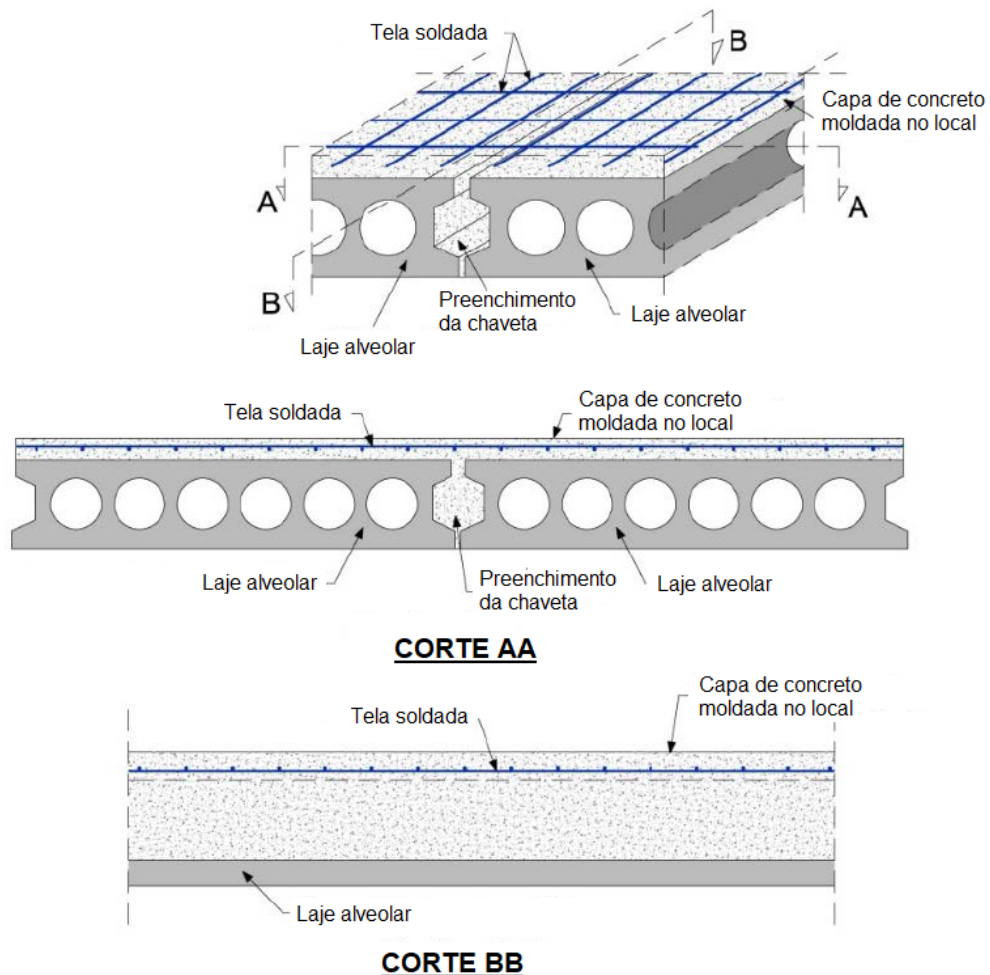


Fonte: Santos (2014)

A utilização de armaduras transversais é dificultada ou inviabilizada devido ao meio de produção das lajes alveolares, sendo assim a resistência à força cortante depende exclusivamente do concreto e da protensão.

Após serem produzidas, as lajes alveolares são estocadas e, então, levadas e montadas em seu destino, onde existirá uma quantidade determinada de elementos necessários para a formação de um pavimento. O pavimento feito por vários elementos pode trabalhar em conjunto, desde que exista a ligação entre as lajes a partir da concretagem dos espaços existentes entre elementos adjacentes (chavetas). Tanto a eficiência das lajes quanto o trabalho em conjunto podem ser melhorados a partir da utilização de uma capa de concreto estrutural sobre toda a superfície superior das lajes alveolares (Figura 4).

Figura 4: Ligação entre lajes alveolares a partir da chaveta preenchida e capa estrutural de concreto.



Fonte: Adaptada FIB (2019)

A maneira como são utilizadas as lajes alveolares dependerá da idealização do projeto. A partir das ações que incidem no pavimento e as escolhas feitas pelo

projetista para a utilização das lajes alveolares, devem ser levadas em consideração, para seu melhor dimensionamento, as características do sistema estrutural. Sendo assim, é necessário entender como o sistema completo de pavimentos constituídos de lajes alveolares funcionam.

Neste trabalho, tem-se o foco em estudar pavimentos de lajes alveolares contínuos a partir de armaduras colocadas na capa estrutural submetidos a ações pontuais. Contudo, é necessário entender as possibilidades de dimensionamento para se conhecer os mecanismos que regem a resistência desse tipo de elemento pré-fabricado. Assim, serão vistas as situações com lajes alveolares sem capa biapoiadas, lajes alveolares com capa biapoiadas e lajes alveolares com capa e continuidade.

## 2.1 SEÇÃO TRANSVERSAL DE LAJES ALVEOLARES

As lajes pré-fabricadas são dimensionadas para resistir a todas as ações impostas a elas. Para isso, os elementos devem apresentar dimensões mínimas em sua seção transversal. De acordo com a ABNR:NBR 14861:2022, para a mesa superior e inferior de lajes alveolares, recomenda-se que a dimensão mínima seja o maior valor entre os obtidos a partir das seguintes equações:

$$h_f \geq \begin{cases} \sqrt{2} \cdot h \\ 17mm \\ d_g + 5mm \end{cases} \quad \text{Equação 1}$$

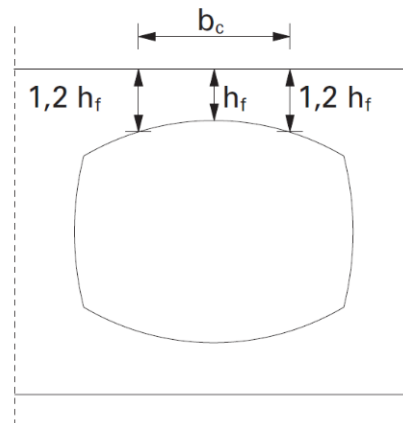
No qual

$h$ : altura da laje sem capa, em mm

$d_g$ : diâmetro máximo do agregado em mm

A EN 1168:2005 e a ABNT:NBR14861:2022 apresentam para as mesas superiores a recomendação de que sua espessura seja maior que 0,25 vezes  $b_c$ , sendo  $b_c$  a distância horizontal entre pontos do alvéolo nos quais as espessuras sejam maiores ou iguais a 1,2 vezes a espessura mínima. Estes parâmetros são ilustrados na Figura 5.

Figura 5: Espessura mínima recomendada para a mesa superior sobre o alvéolo



Fonte: EN 1168:2005

Para qualquer nervura, a ABNT:NBR 14861:2022 recomenda que a dimensão mínima seja o maior valor entre os obtidos a partir das seguintes equações:

$$b_w \geq \begin{cases} \sqrt{2 \cdot h} \\ 20 \text{ mm} \\ d_g + 5 \text{ mm} \\ h/10 \end{cases} \quad \text{Equação 2}$$

Nas quais:

$h$ : altura da laje sem capa, em mm

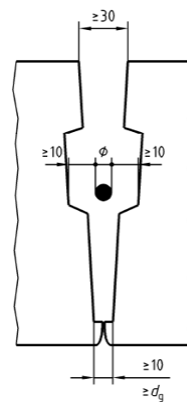
$d_g$ : diâmetro máximo do agregado em mm

A distribuição das cordoalhas deve ser feita de modo a garantir os requisitos de cobertura mínima das armaduras segundo a ABNT NBR 9062, e de modo que haja simetria no seu posicionamento ao longo da seção transversal, garantindo a uniformidade da força de protensão, não gerando fissura longitudinal. A distância mínima entre fios ou cordoalhas deve seguir os requisitos da ABNT NBR 6118. Convém que a distância máxima entre fios ou cordoalhas não ultrapasse 400 mm ou  $2h$ , sendo  $h$  a altura da laje (ABNT NBR 14861, 2022).

Já as laterais das lajes alveolares podem assumir diferentes perfis. Contudo, é recomendável a presença de chaves de cisalhamento de acordo com a ABNT NBR 9062:2017. Para que as lajes alveolares possam funcionar em conjunto, a largura das juntas longitudinais, que serão concretadas ou grauteadas, deve:

- Ter no mínimo 30 mm na parte superior da junta;
  - Ter 10 mm ou o tamanho do agregado utilizado na parte inferior da junta;
  - Caso existam barras colocadas nas juntas longitudinais, a largura da junta no nível de colocação da barra deve ter valor maior ou igual a (Figura 6):
    - ✓ 20 mm + diâmetro da armadura
- ou
- ✓ 2 vezes o diâmetro do maior agregado ( $d_g$ ) + diâmetro da armadura

Figura 6: Largura mínima para juntas longitudinais



Fonte: FIB (2019)

## 2.2 PAVIMENTOS DE LAJES ALVEOLARES SEM CAPA

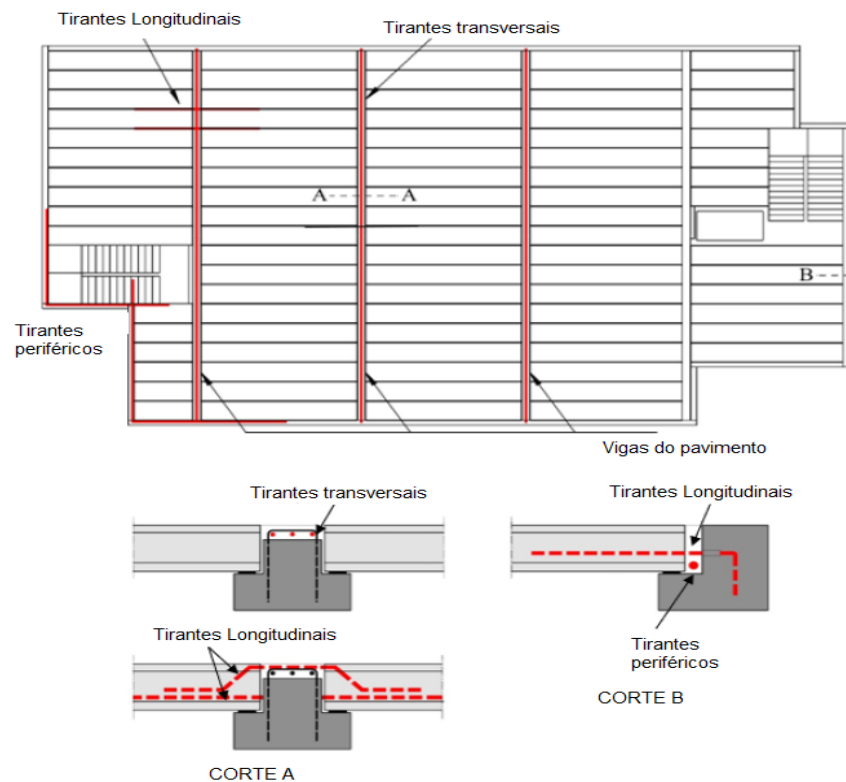
Muito utilizadas na Europa e Estados Unidos, as lajes alveolares sem capa devem formar os pavimentos realizando suas principais funções: resistir às ações impostas, distribuir transversalmente as ações verticais nela existentes, funcionar como diafragma para ações horizontais e resistir a possíveis incêndios. Nesses pavimentos, unidades individuais de lajes alveolares devem ser montadas e ligadas, possibilitando exercer tais funções (FIB, 2019).

Ao se utilizar pavimentos com lajes alveolares sem capa, é necessário garantir a resistência às ações de cada unidade de laje e o funcionamento de todas as unidades em conjunto. Para a garantia do funcionamento em conjunto, tirantes devem ser utilizados nas ligações entre os elementos pré-fabricados. Tais tirantes são



armaduras passivas colocadas nas direções transversais e longitudinais nos espaços entre os elementos pré-fabricados. O papel dessas armaduras não é apenas transmitir forças normais entre os elementos devido a ações horizontais, mas também amarrar todas as ligações entre as lajes e a estrutura. Os tirantes são divididos em duas categorias: tirantes internos (longitudinais e transversais) e periféricos (Figura 7).

Figura 7: Tirantes necessários em pavimentos de laje sem capa



Fonte: FIB (2019)

Os tirantes periféricos são barras contínuas colocadas em todo contorno do pavimento. Já os tirantes internos são colocados tanto na direção longitudinal, quanto na direção transversal. Os tirantes longitudinais asseguram o equilíbrio devido às forças horizontais que agem nos elementos internos da estrutura e garantem o apoio das lajes sobre as vigas. Já os tirantes transversais garantem a coesão entre todas as lajes, prevenindo que elas se distanciem e prevenindo o colapso progressivo (FIB, 2019).

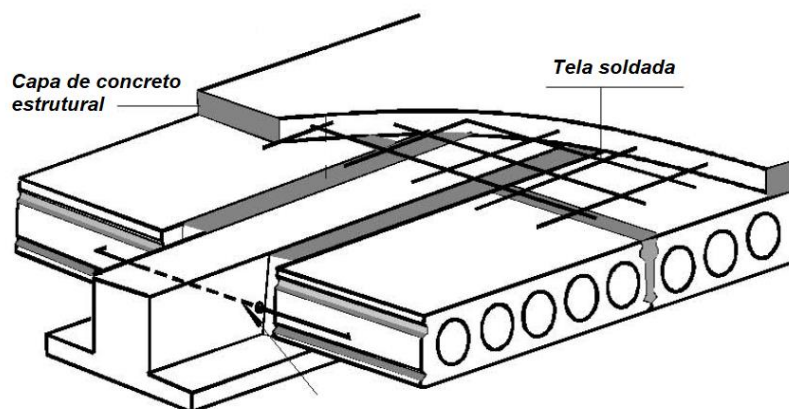
Como uma maneira de melhorar tanto a eficiência do elemento laje alveolar, como de todo o pavimento, a capa estrutural de concreto é empregada com esse

intuito. Para que essa capa melhore o desempenho do pavimento, ela deve ter ancoragem e aderência o suficiente com os elementos pré-fabricados. Sendo assim, a interface entre a laje alveolar e a capa deve ser devidamente estudada para que ambos os elementos possam trabalhar em conjunto.

### 2.3 PAVIMENTOS DE LAJES ALVEOLARES COM CAPA ESTRUTURAL

De acordo com FIB (2019), a capacidade estrutural de lajes alveolares pode ser melhorada a partir da adição de uma camada de concreto armado estrutural na face superior do elemento (Figura 8). Garantindo que essa capa estrutural esteja completamente ancorada e aderida à laje alveolar em sua interface, os dois concretos (pré-fabricado e moldado no local) podem ser dimensionados como monolíticos.

Figura 8: Laje alveolar com capa de concreto



Fonte: Adaptada FIB (2019)

Os principais benefícios da seção composta são: o aumento da resistência à flexão, que, de acordo com a pesquisa realizada por Derkowski e Surma (2015) pode chegar a 25%, e aumento da rigidez do elemento em aproximadamente 15%. De acordo com o ASSAP (2002), também há o aumento da distribuição transversal de ações concentradas e a melhoria no desempenho de diafragma rígido do pavimento.

Derkowski e Surma (2015) apresentam que a resistência ao cisalhamento aumenta aproximadamente 35% em situação em que os apoios são rígidos.

Entretanto, é explicitado pela FIB (2019) que essa resistência pouco é aumentada pela adição de capa estrutural. Também é mostrado que quanto maior o vão das lajes, menor é a melhoria trazida pela composição laje alveolar e capa, pois o peso próprio da capa de concreto anula a capacidade adicional que ela fornece.

Além dos motivos já levantados, há uma série de razões do porquê utilizar a capa estrutural, sendo algumas delas (FIB, 2019):

- Garantir a resistência a ações horizontais;
- Melhorar o desempenho acústico do pavimento;
- Melhorar as características dinâmicas do pavimento (vibrações);
- Ajustar diferenças devido à contra-flecha de lajes, nivelando o pavimento como um todo;
- Fazer a amarração entre lajes e vigas, assegurando o apoio da laje e possivelmente aumentando sua capacidade resistente;
- Resistir a possíveis momentos negativos quando utilizada continuidade;
- Melhorar a impermeabilidade do pavimento.

Deve-se levar em consideração que as melhorias provocadas pela utilização da capa estrutural só ocorrem após a sua cura. Sendo assim, é necessária a verificação das lajes alveolares em situação transitória, resistindo aos esforços apenas com sua seção pré-fabricada.

Como padrão, é utilizada espessura da capa de concreto igual ou maior que 50 mm quando nela é colocada armadura (tela soldada, armadura de continuidade, entre outros). Na Europa, a espessura da capa varia de 80 a 100 mm, contudo, é dito que espessuras grandes de capa estrutural devem ser evitadas, sendo preferíveis lajes alveolares com maiores alturas. Foi verificado que espessuras de capa maiores que 50 mm em lajes com altura menor que 200 mm e espessuras de capas maiores que 0,25 vezes a altura das lajes maiores que 200 mm podem apresentar maior possibilidade de fissuração na interface horizontal, causando a delaminação dos materiais (término do funcionamento composto da seção).

Como recomendação, a resistência à compressão do concreto utilizado para o capeamento varia de 25 a 30 MPa. Com isso, deve-se levar em consideração a

diferença dos módulos de elasticidade dos materiais para o estudo da seção composta.

Ao se utilizar lajes alveolares com capa de concreto estrutural, existe a possibilidade de restrição de rotações nos seus apoios a partir da utilização de armaduras na mesma direção das lajes, produzindo-se, assim, a continuidade delas. No Brasil, essa situação de projeto é muito utilizada, sendo então necessário conhecer seu funcionamento.

## 2.4 PAVIMENTOS DE LAJES ALVEOLARES CONTÍNUAS

A utilização de lajes alveolares contínuas teve início na década de 1970, impulsionados pelo seu uso em edificações residenciais, comerciais e estacionamentos, onde soluções de estruturas “monolíticas” eram alcançadas a partir da realização da capa *in loco*. Até então, os projetos em lajes alveolares eram idealizados com seus elementos simplesmente apoiados (FIB, 2000).

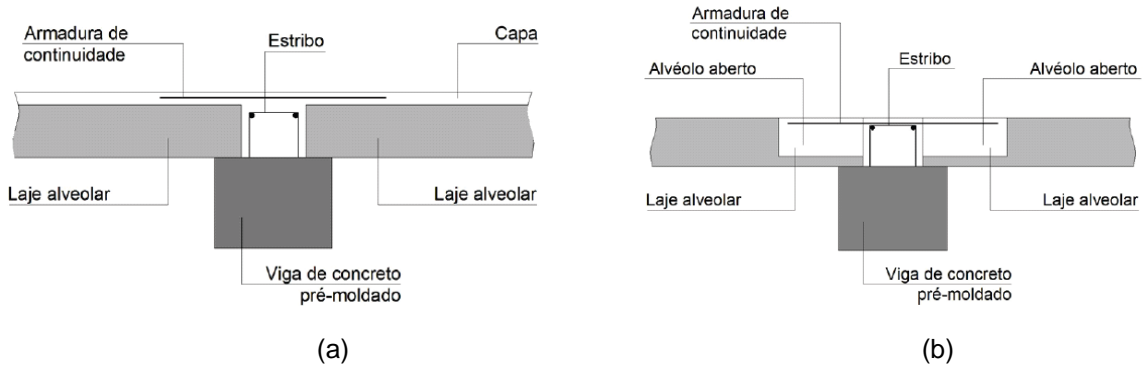
A continuidade de lajes alveolares pode ser alcançada a partir da colocação de armaduras passivas nas juntas grauteadas (chaveta), na capa estrutural ou a partir de armaduras colocadas em alvéolos grauteados (PCI, 2015), desde que essas armaduras estejam em uma posição favorável (Figura 9).

No Brasil, é utilizada majoritariamente a armadura negativa na capa de concreto para se ter continuidade em lajes alveolares (Camillo, 2012). Nessa situação, a armadura fica sobre as lajes alveolares, resistindo às tensões de tração devido ao momento fletor e restringindo a rotação da laje. Já na parte inferior da laje, em região de continuidade, devem ser verificadas as tensões de compressão tanto devido ao momento fletor, quanto devido à força de protensão que está sendo implantada no comprimento de transferência (Figura 10).

Com a utilização da continuidade, as tensões internas são melhoradas, sobretudo devido à presença de compressão na parte inferior da laje, como mostra a Figura 11 (ASSAP, 2002).

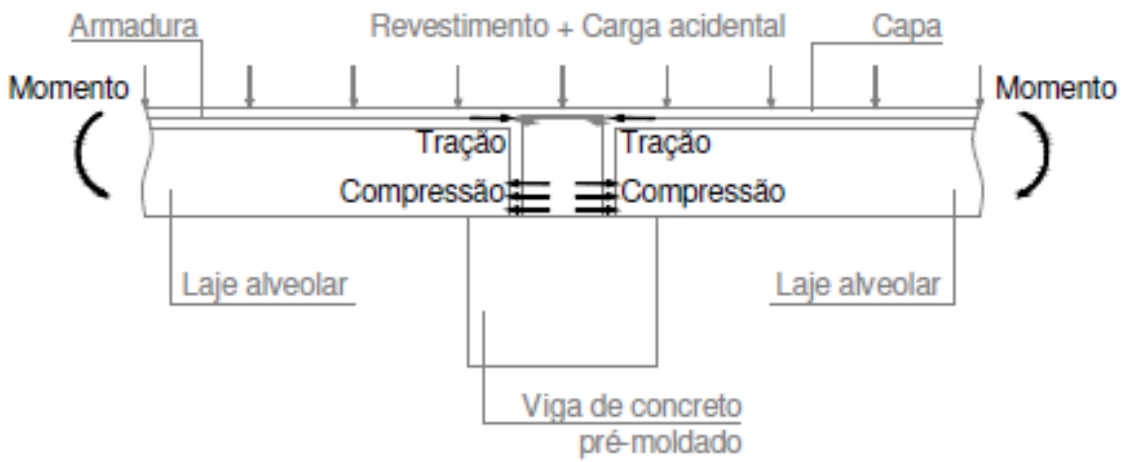
A biela de compressão que ocorre nas lajes alveolares contínuas não evita a abertura de fissuras na parte superior devido ao momento fletor negativo. Contudo, ela evita que as fissuras devido aos momentos fletores positivo e negativo se juntem.

Figura 9: Possibilidades de continuidade em lajes alveolares: (a) Continuidade a partir de armaduras na capa estrutural; (b) Continuidade a partir de armadura colocada em alvéolos grauteados



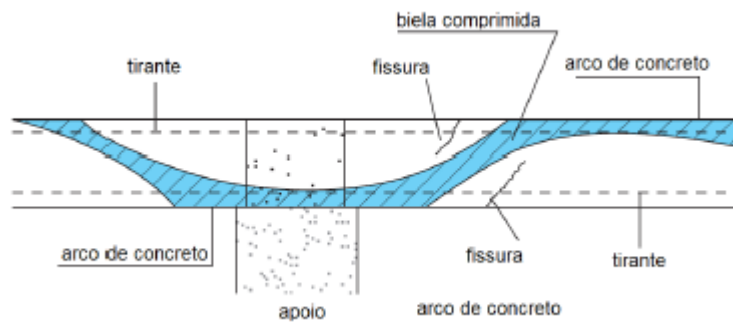
Fonte: Santos et al. (2013)

Figura 10: Sistema estático de lajes alveolares contínuas



Fonte: Adaptada de Elliott (2002)

Figura 11: Caminho da compressão em lajes alveolares contínuas



Fonte: Adaptada de ASSAP (2002)

O uso da continuidade em lajes alveolares se dá graças à melhoria no desempenho do pavimento criada por ela. Segundo Elliott (2002), além de se aumentar a resistência e rigidez à flexão, ela ainda ajuda a:

- Melhorar o desempenho em relação a vibrações do pavimento;
- Promover o funcionamento do pavimento como diafragma;
- Auxiliar na estabilidade horizontal;
- Aproxima o pavimento ao funcionamento monolítico.

Entretanto, o PCI (2015) apresenta a visão de que é difícil justificar economicamente a utilização de armadura passiva como elemento resistente para pavimentos em lajes alveolares. Isso acontece, pois as lajes alveolares apresentam armaduras ativas, as quais são muito mais eficientes do que a armadura de continuidade colocada.

O ASSAP (2002) apresenta as vantagens e desvantagens da utilização de pavimentos contínuos com lajes alveolares (Tabela 1). Essa tabela foi elaborada a partir da realidade europeia. Torna-se necessário, então, fazer algumas alterações em relação à realidade brasileira.

Como mostrado por Camillo (2012), o alto custo da armadura adicional não ocorre na realidade brasileira, além de já ser padronizada a utilização de capa de concreto em estruturas pré-fabricadas. Também foi demonstrado que a limitação da protensão na parte inferior da laje praticamente não ocorre, mesmo com o aumento da compressão em razão do momento fletor negativo.

Entretanto, ao se utilizar armaduras passivas na continuidade, existirá a fissura na região da ligação, fazendo com que parte do momento negativo seja redistribuído para o momento positivo. De acordo com o ASSAP (2002), o momento fletor negativo redistribuído pode ser de no mínimo 70% do momento negativo teórico, enquanto na ABNT NBR 6118:2014, tais valores são limitados em 90% para estruturas de nós móveis e 75% para outros casos.

De acordo com a ABNT NBR 14861:2022, se a redistribuição for maior do que 15% (momento negativo redistribuído for menor que 85% do momento negativo teórico), não se pode considerar a utilização de seção composta para verificação de resistência à força cortante de lajes alveolares, tendo, então, que se garantir a eficiência da laje apenas com a seção transversal da laje simples.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens no uso de continuidade em lajes alveolares

<b>Necessidades de projeto</b>	<b>Vantagens da continuidade</b>	<b>Desvantagens da Continuidade</b>
1- Controle dos deslocamentos e resistência ao momento fletor e ao cortante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Com a mesma altura da laje alveolar e a mesma armadura ativa, é possível obter momentos resistentes até 30% maiores;</li> <li>- A resistência ao cisalhamento depende do número de alvéolos preenchidos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto custo de armadura adicional (até 3kg/m<sup>2</sup>) e de concreto moldado no local (até 20 l/m<sup>2</sup>);</li> <li>- É necessário usar armadura ativa até mesmo no topo das lajes e alguns alvéolos podem ser abertos;</li> <li>- É necessário verificar a protensão máxima nas lajes na face inferior para evitar compressão excessiva devida ao momento negativo.</li> </ul>
2- Resistência ao fogo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Com a mesma altura da laje alveolar e a mesma armadura ativa é possível aumentar cerca de 30%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ver item 1</li> </ul>
3 - Ação sísmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento no valor de "q" devido ao aumento na ductilidade da estrutura e também na energia de dissipação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ver item 1</li> </ul>
4 - Consideração da fluência devida às cargas de longa duração	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Para a mesma altura da laje alveolar, os deslocamentos diminuem de duas a cinco vezes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ver item 1</li> </ul>
5 - Eliminação de fissuras visíveis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- É atendida em todos os casos, exigindo-se cuidado com relação ao número, diâmetro e distância entre as armaduras para resistir ao momento fletor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ver item 1</li> </ul>
6 - Aumento da rigidez da viga de apoio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- É obtido pela consideração da largura colaborante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ver item 1</li> </ul>
7 - Lajes alveolares apoiadas em vigas moldadas no local, com mesma altura das lajes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aplicação possível</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ver item 1;</li> <li>- A seção transversal da laje requer uma largura da nervura (cerca de 400 mm) para diminuir as tensões de fendilhamento</li> </ul>

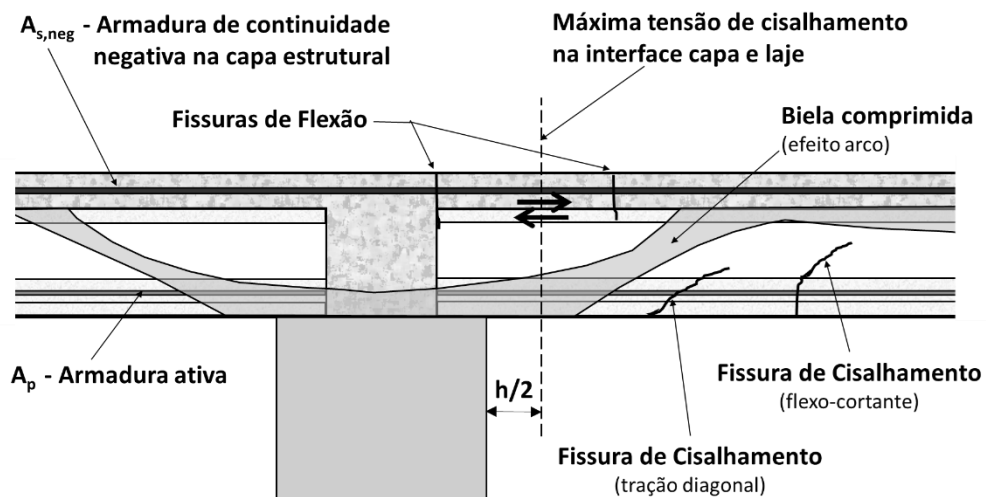
Fonte: ASSAP (2002)

Além da verificação da redistribuição, de acordo com a ABNT NBR 14861:2022, para que seja garantida a resistência a força cortante da laje alveolar considerando a seção composta e contínua, devem-se garantir mais dois pontos:

- máxima tensão de cisalhamento na interface entre a capa e a laje menor que a tensão resistente;
- armaduras de continuidades confinadas na região da ligação.

Garantidas essas limitações, o comportamento da ligação pode ser considerado como mostrado na Figura 12.

Figura 12: Mecanismo de resistência em apoio de lajes alveolares com armadura de continuidade negativa na capa estrutural



Fonte: ABNT NBR 14861 (2022)

## 2.5 MECANISMOS DE RUPTURA DE LAJES ALVEOLARES

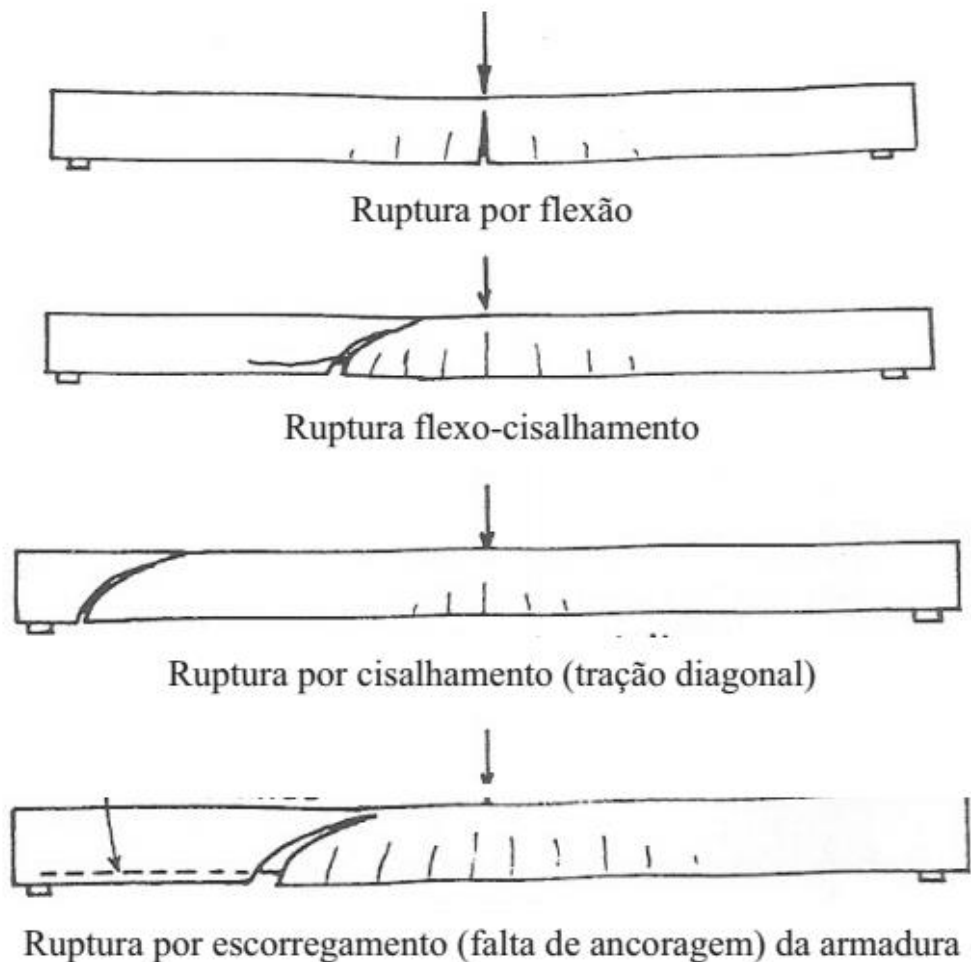
Para se entender o funcionamento de lajes alveolares, é preciso reconhecer quais são os possíveis mecanismos de ruptura delas, sendo eles dependentes da resistência do concreto, da armadura longitudinal, da força de protensão e, em alguns casos, do funcionamento em conjunto da capa moldada no local e do elemento pré-fabricado.



De acordo com Catoia (2011), de forma geral, as lajes alveolares sem capa podem apresentar diferentes mecanismos de ruptura, sendo eles: perda de ancoragem por escorregamento da armadura; cisalhamento com tensão maior que a resistida no ponto crítico (tração diagonal); cisalhamento em região fissurada pela flexão (flexo-cortante); flexão e cisalhamento combinado com torção (Figuras 13 e 14).

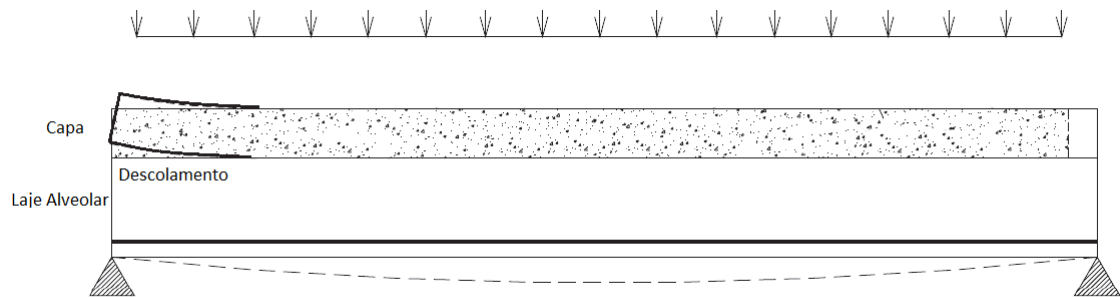
Já na ruína de lajes alveolares com capa, adiciona-se a possibilidade da ruptura por cisalhamento horizontal na interface do elemento pré-fabricado com a capa estrutural moldada no local (Girhammar e Pajari, 2008).

Figura 13: Tipo de ruptura que podem ocorrer em elementos sem armadura transversal.



Fonte: Carvalho (2017)

Figura 14: Ruptura por escorregamento da interface

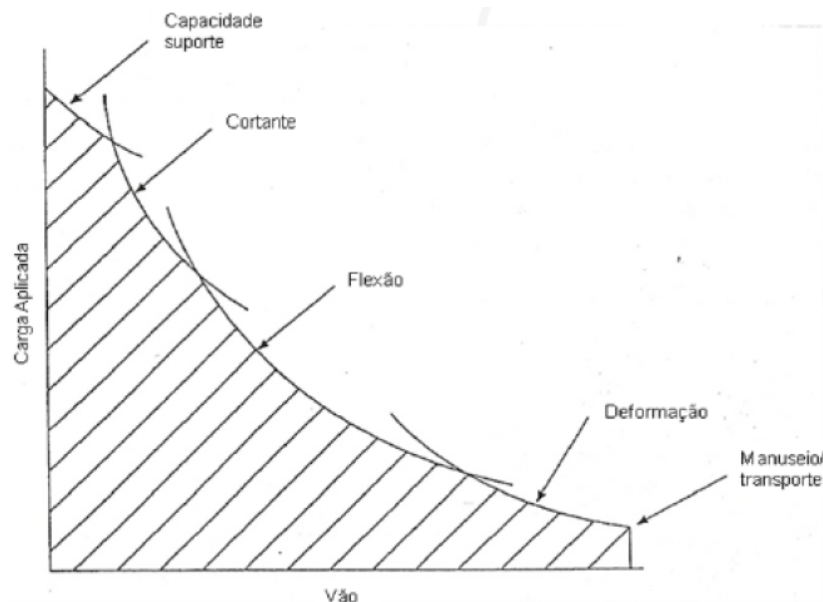


Fonte: FIB (2019)

Contudo, foi verificado por Kong e Evans (2001) que a maneira de ruptura das lajes alveolares depende principalmente da relação entre o vão em que ocorre o cisalhamento e a altura útil ( $d$ ). Além disso, a maneira como se rompe o elemento do pavimento também depende do tipo de carregamento imposto a ele, podendo, então, ocorrer uma combinação de mecanismos.

Elliott e Jolly (2013) mostrou, de maneira gráfica, qual é o modo de falha mais recorrente de acordo com a intensidade do carregamento distribuído e o vão da laje (Figura 15).

Figura 15: Tipos de ruptura devido ao vão e carregamento distribuído



Fonte: Elliott e Jolly (2013)

Para se entender, então, o funcionamento de lajes alveolares, deve-se aprofundar os estudos nos mecanismos resistentes à ruptura por flexão, por cisalhamento, por ruptura da interface e por torção.

### **2.5.1 MECANISMOS DE RUPTURA À FLEXÃO**

As lajes alveolares apresentam rupturas em razão da flexão, assim como ocorre em diferentes elementos protendidos. Sendo assim, os mecanismos que ocorrem em elementos alveolares são (Pajari, 1989. Rettne e Edekling, 2006):

- Fissuração da fibra superior em virtude da tração em situação em vazio;
- Fissuração da fibra inferior em virtude dos momentos positivos;
- Ruptura das cordoalhas por tração excessiva em virtude do momento positivo;
- Compressão excessiva do concreto devido à flexão;
- Deformação excessiva da laje.

Deve-se levar em consideração que a ruptura por flexão pode ocorrer associada a outros mecanismos, sendo, então, necessário entender a interação entre os esforços existentes na laje (Catoia, 2011).

### **2.5.2 MECANISMOS DE RUPTURA AO CISALHAMENTO DE LAJES ALVEOLARES**

Muitas teorias são utilizadas para tentar mostrar qual é a resistência de elementos sem armadura transversal na seção crítica através de mecanismos de transferência de esforços pelo elemento (Reineck, 2016), pois não há uma teoria geral aceita.

De acordo com Catoia (2011), lajes alveolares apresentam alguns tipos de ruptura por cisalhamento, sendo eles:

- Ruptura da nervura por tração decorrente da força cortante (tração diagonal);
- Ruptura da nervura por compressão decorrente do cisalhamento;
- Ruptura por escorregamento graças ao cisalhamento ao longo de uma fissura inclinada;
- Falha na ancoragem dos cabos;

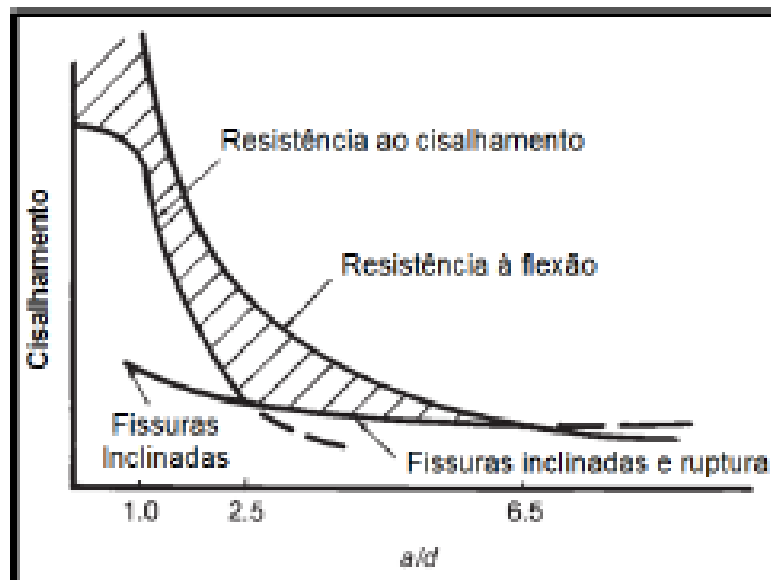
- Fissuração do concreto referente à interação de cisalhamento e flexão (flexo-cortante).

Segundo Macgregor e Wight (2012), os modos de falha são influenciados pela posição das ações sobre os elementos estudados, sendo a razão entre a posição da ação em relação ao apoio ( $a$ ) e a altura útil ( $d$ ) do elemento uma grande referência para reconhecimento deles.

A partir de estudos experimentais, foi visto que razões  $a/d < 1,0$ , levam os elementos a uma ruptura por esmagamento do concreto da biela junto ao apoio, em razão do efeito arco. Já para relações de  $a/d$  entre 1 e 2,5, a ruptura se dá por compressão graças ao cisalhamento, sendo que a fissura diagonal se forma e penetra no banzo comprimido. Quando a razão  $a/d$  está entre 2,5 e 6,5, verifica-se que o mecanismo de ruptura é fortemente influenciado pela flexão (Figura 16).

De acordo com Maciel (2017), os modos de ruptura que mais se destacam em lajes alveolares são: ruptura por flexo-cortante (em regiões fissuradas por flexão) e ruptura por tração diagonal. Detalharam-se, então, esses dois modos.

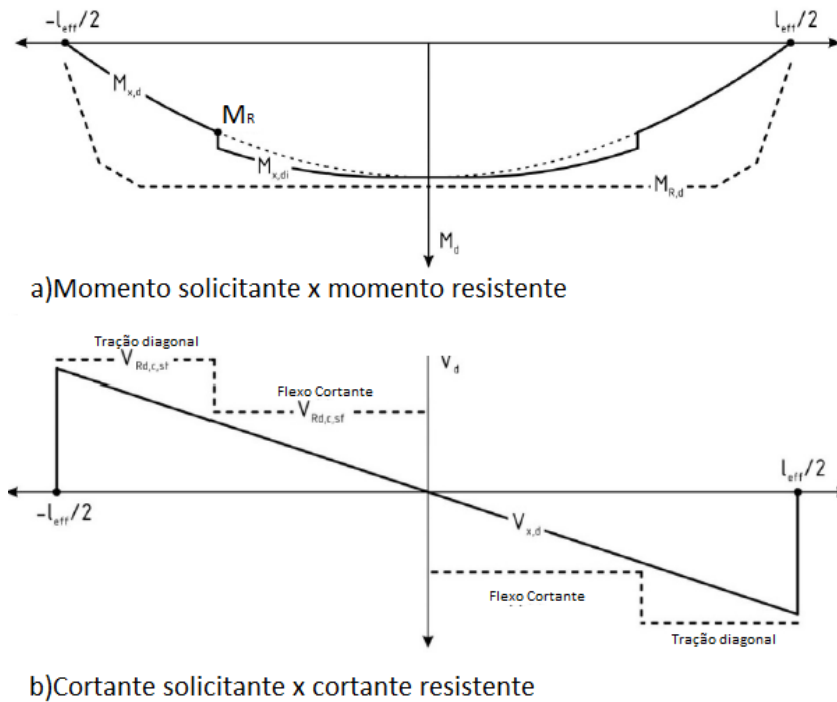
Figura 16: Mecanismos de ruptura dependentes da relação  $a/d$



Fonte: Adaptado de Macgregor e Wight (2012)

De acordo com a FIB (2019), o modo de ruptura à força cortante de lajes alveolares é modificado de tração diagonal para flexo-cortante, a partir da fissuração do concreto em virtude da flexão (Figura 17).

Figura 17: Mecanismo de ruptura à força cortante de acordo com a flexão



Fonte: FIB (2019)

### 2.5.2.1 FLEXO-CORTANTE

A interação dos mecanismos de cisalhamento e flexão é difícil de ser analisada por causa da complexa redistribuição de tensões ao longo da seção após o início da fissuração do concreto. Dessa forma, para o cálculo da resistência ao cisalhamento em região fissurada, foram desenvolvidas equações empíricas e calibradas através de ensaios experimentais de forma a considerar as variáveis de maior importância tais como: a resistência à tração do concreto e o esforço axial (protensão).

Os principais fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento em regiões fissuradas são:

- Resistência à tração do concreto;
- Taxa de armadura longitudinal;

- Fator escala;
- Influência do esforço axial (protensão);
- Tipo e tamanho do agregado.

A influência da resistência à tração do concreto, da armadura, do fator escala e da protensão é considerada na equação recomendada pela NBR 14861:2011, como pode ser observado na Figura 18.

Figura 18: Resistência à força cortante em região fissurada

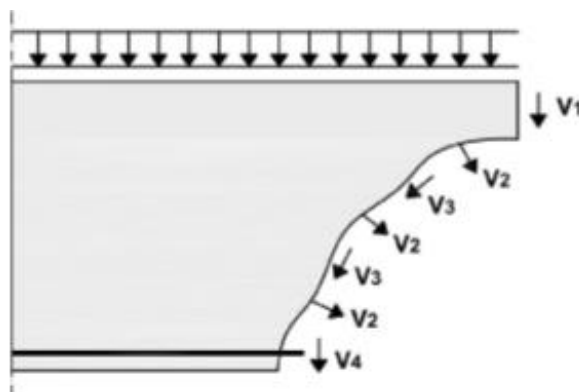
$$V_{Rd1} = [0,25 \cdot f_{ctd} \cdot k \cdot (1,2 + 40\rho_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$$

Protensão  
Resistência à tração  
Taxa de armadura longitudinal  
Fator escala  
 $k = (1,6 - d)$

Fonte: Marquesi (2014)

De acordo com Marquesi (2014), os mecanismos básicos para a transferência da força cortante ao longo de sua fissura crítica em elementos sem armadura transversal podem ser divididos em quatro parcelas, denominadas de V1, V2, V3 e V4. Como indicado na Figura 19.

Figura 19: Mecanismos básicos de transferência de força cortante



Fonte: Marquesi (2014)

Esses quatro mecanismos 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, como descrito:

- V1 corresponde à parcela da força cortante transmitida por meio do banzo comprimido originado pela flexão;
- V2 representa a parcela correspondente às tensões residuais de tração pela ação das “pontes de concreto” ao longo da fissura. Segundo Marquesi (2014, *apud* Walraven, 2010) fissuras com aberturas de até 0,15 mm são capazes de transmitir força cortante por meio das tensões residuais;
- V3 corresponde à parcela da força cortante transmitida por meio do engrenamento dos agregados. A parcela V3 é transmitida após o aparecimento 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 existência de rugosidade significativa entre os agregados contribui para impedir o escorregamento das faces da fissura. 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 intermédio do engrenamento dos grãos do agregado graúdo. Tal engrenamento permite a transmissão de forças oblíquas através das fissuras. No caso de concretos com resistência à compressão de até 70 MPa, as fissuras ocorrem na matriz cimentícia e, portanto, contornam o agregado. Já no caso de concretos com resistência à compressão superior a 70 MPa, as fissuras atravessam os agregados e, dessa forma, o efeito de seu engrenamento é perdido;
- V4 corresponde à parcela da força cortante transmitida pelo efeito de pino da armadura. A parcela V4 é disseminada após a fissura de flexão, pela armadura longitudinal de flexão, que se comporta como um pino de ligação entre as duas faces da fissura, sendo propagada adiante por tração no trecho da alma entre duas fissuras adjacentes. Além disso, a armadura longitudinal também contribui, impedindo maiores aberturas de fissuras, colaborando com os demais mecanismos de transferência mencionados.

A contribuição da resistência à tração do concreto na resistência à força cortante é considerada pelas normas brasileiras (NBR6118 e NBR14861) através da parcela 25% de  $f_{ctd}$  (resistência à tração do concreto), como indicado na Figura 27.

A equação para o cálculo de  $V_{Rd1}$  (Figura 27) indicada pelas normas brasileiras corresponde à mesma utilizada pela versão anterior do Eurocode 2 (2004). De acordo com o *Eurocode 2 Commentary* (2008), houve alteração na formulação recomendada pelo Eurocode 2 (2004) por motivo da obtenção de elevados valores de desvios padrão em elementos compostos por concretos de alta resistência, acima de 50 MPa. Entretanto, tal realidade não se aplica às lajes comumente empregadas no Brasil, cujo concreto usualmente apresenta resistência de até 50 MPa.

Forças de tração presentes em um elemento estrutural favorecem o aparecimento de fissuras e contribuem para o aumento da abertura das já existentes, diminuindo a resistência à força cortante. Já as forças de compressão são capazes de retardar o aparecimento das fissuras, além de contribuir para o “fechamento” das fissuras existentes, garantindo a transferência dos esforços.

Nas equações do Eurocode 2 (2004) e das normas brasileiras, a influência da força axial na resistência à cortante é considerada por meio da parcela  $\alpha \cdot \sigma_{cp} \cdot b_d$ , positiva para compressão e negativa para tração, sendo  $\alpha$  igual a 0,15.

Os modelos de cálculo utilizados para determinar a resistência à força cortante de lajes alveolares protendidas provêm de ensaios experimentais considerando uma viga de seção retangular. A parcela da contribuição da protensão ( $V_p$ ) pode ser obtida por meio de dedução analítica.

De maneira geral, a influência da protensão pode ser levada em consideração com base no princípio proposto por Hedman e Losberg (1978), que considera uma seção retangular de uma viga e diz que, em relação ao cisalhamento, uma viga protendida pode ser considerada uma viga de concreto armado após o momento de descompressão ser atingido. Baseado neste contexto, a resistência ao cisalhamento de um elemento de concreto protendido corresponde à soma da resistência ao cisalhamento do elemento em concreto armado similar com a parcela da força cortante gerada pelo carregamento, que provocará a descompressão na seção. Isso pode ser formulado como a seguir:



$$V_{Rd} = V_c + V_p$$

Equação 3

Sendo:

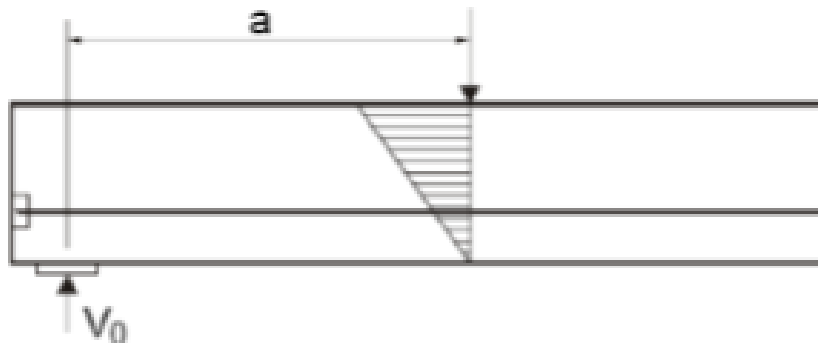
- $V_c$ : resistência ao cisalhamento da viga não protendida similar;
- $V_p$ : contribuição da força de protensão na resistência ao cisalhamento:
- 

$$V_p = M_0/a$$

Equação 4

Sendo:

- ✓  $M_0$ : momento de descompressão;
- ✓  $a$ : distância da força aplicada ao eixo do apoio (Figura 20).

Figura 20: Cálculo da contribuição da protensão ( $V_p$ ) na resistência ao cisalhamento

Fonte: Hedman e Losberg (1978)

Assim, o cálculo do  $V_p$  considera  $M_0/a$  e a determinação de  $M_0$  é feita considerando o equilíbrio de tensões na borda inferior de uma viga protendida da seguinte forma:

$$\frac{N_p \cdot e_p}{W} + \frac{N_p}{A} - \frac{M_0}{W} = 0$$

Equação 5

Sendo:

$$W = \frac{I}{y} = \frac{\frac{b \cdot h^3}{12}}{\frac{h}{2}} = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

Equação 6

Isolando  $M_0$ :

$$M_0 = N_p \cdot e_p + \frac{N_p}{A} \cdot \frac{b \cdot h^2}{6} \quad \text{Equação 7}$$

Considerando:

$$V_p = \frac{M_0}{a} \quad \text{Equação 8}$$

E substituindo  $M_0$ , tem-se:

$$V_p = N_p \cdot e_p + \frac{N_p}{b \cdot h} \cdot \frac{b \cdot h^2}{6} \cdot \frac{1}{a} \rightarrow V_p = N_p \cdot e_p + \frac{N_p \cdot h}{6} \cdot \frac{1}{a} \quad \text{Equação 9}$$

Colocando  $N_p$  e  $h$  em evidência:

$$V_p = N_p \cdot \left(\frac{h}{a}\right) \cdot \left(\frac{e_p}{h} + \frac{1}{6}\right) \quad \text{Equação 10}$$

Considerando a altura útil da seção  $d = 0,85 \cdot h$  (*EC2 Commentary*), tem-se  $h = 1,176 \cdot d$  e assim:

$$V_p = 1,18 \cdot N_p \cdot \frac{d}{a} \cdot \left(\frac{e_p}{h} + \frac{1}{6}\right) \quad \text{Equação 11}$$

Considerando  $e_p/h = 0,35$  (de acordo com *EC2 Commentary*, na maioria dos ensaios ao cisalhamento realizados em vigas nos estudos de Hedman & Losberg (1978), a relação  $e_p/h$  corresponde a cerca de 0,35), tem-se:

$$V_p = 1,18 \cdot N_p \cdot \frac{d}{a} \cdot (0,35 + 0,166) \rightarrow V_p = 0,608 \cdot \frac{N_p}{a} \quad \text{Equação 12}$$

Com a distância de aplicação da carga ao centro do apoio ( $a$ ) variando de  $2,5 \cdot d$  a  $4,0 \cdot d$ , tem-se:

- Limite superior (distância mínima  $a = 2,5 \cdot d$ ):

$$V_p = 0,608 \cdot \frac{N_p}{2,5d} = 0,24 \cdot N_p \rightarrow V_p = 0,24 \cdot \sigma_p \cdot b \cdot d \quad \text{Equação 13}$$

- Limite inferior (distância máxima  $a = 4,0 \cdot d$ ):

$$V_p = 0,608 \cdot \frac{N_p}{4d} = 0,15 \cdot N_p \rightarrow V_p = 0,15 \cdot \sigma_p \cdot b \cdot d \quad \text{Equação 14}$$

Assim, pode-se observar que variando a relação  $a/d$  entre  $2,5 \cdot d$  e  $4 \cdot d$ , como na maioria dos ensaios de cisalhamento, o valor da contribuição da parcela da força cortante  $V_p$  iria variar entre  $0,15 \cdot \sigma_p \cdot b \cdot d$  e  $0,24 \cdot \sigma_p \cdot b \cdot d$ . Dessa forma, o fator 0,15 corresponde ao limite inferior seguro para as regiões críticas ao cisalhamento.

Contudo, para que a parcela de protensão ajude na resistência à força cortante, é necessário entender a região inicial de ancoragem, onde se inicia a aplicação da protensão. Em regiões de ancoragem em elementos com pré-tração (como as lajes alveolares), devem ser considerados alguns parâmetros de suma importância, como:

- Comprimento de transferência da protensão ( $l_{bpt}$ ): corresponde à distância necessária para que a tensão de protensão seja totalmente transferida ao concreto;
- Comprimento de regularização ( $l_p$ ): corresponde à distância necessária para que as tensões introduzidas no concreto sejam distribuídas gradualmente através da seção de concreto;
- Comprimento de ancoragem ( $l_{bpd}$ ) corresponde à distância necessária para que as tensões na armadura, no Estado Limite Último, sejam totalmente ancoradas no concreto.

O comprimento de transferência é essencial para o cálculo da resistência ao cisalhamento, principalmente para as lajes alveolares protendidas que não possuem armadura transversal. Entretanto, é muito difícil definir e determinar este parâmetro graças à sua grande variabilidade.

O comprimento de transferência é definido como o comprimento de aderência entre a armadura ativa e o concreto, que é necessário para desenvolver a força de protensão efetiva em ambos, dentro da zona de ancoragem (Elliott, 2014. PCI, 2015).

A aderência existente entre as armaduras e o concreto se deve a três parcelas: a aderência por adesão, a aderência por atrito e a aderência mecânica.

A aderência por adesão se dá em razão da ligação físico-química entre a nata de concreto e o aço. Essa aderência é de pequena resistência, sendo perdida com a ocorrência de mínimo escorregamento entre os componentes do elemento estrutural.

A aderência por atrito se dá graças à rugosidade das superfícies dos componentes e da compressão transversal da armadura. A compressão transversal acontece, pois a armadura ativa tende a voltar ao seu diâmetro inicial após a liberação

da protensão, sendo gradualmente impedida pelo concreto ao seu redor (sem impedimento na face externa do elemento estrutural, e impedimento total após determinado comprimento). Tal situação é chamada de efeito Hoyer, porém deve ser observado em que situação a laje está sendo verificada.

A aderência mecânica se dá em decorrência das saliências existentes nas armaduras ativas (fios denteados e cordoalhas), causando o engrenamento delas com o concreto em seu entorno, causando tensões de compressão no concreto.

A partir dessas três parcelas, é possível entender qual é a tensão de aderência que ocorre entre o concreto e a armadura ativa. Considerando essa tensão de aderência como constante, a ABNT NBR 14861 (2022) apresenta uma formulação para verificação dessa tensão, levando em conta o tipo de armadura ativa, a condição de aderência da armadura com o concreto e a resistência à tração do concreto no momento da liberação da protensão. O nome dado para essa tensão de aderência é  $f_{bpt}$  e pode ser determinada conforme a Equação 15:

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd} \quad \text{Equação 15}$$

Sendo:

- $\eta_{p1}$ : coeficiente que leva em consideração o tipo de armadura. Corresponde a 2,7 para fios dentados e lisos e 3,2 para cordoalhas;
- $\eta_1$ : coeficiente que leva em consideração a situação de aderência da armadura. Corresponde a 1 para boa aderência e 0,7 para má aderência;
- $f_{ctd}$ : valor da resistência à tração de cálculo, sendo calculada a partir da Equação 16:

$$f_{ctd} = 0,7 \cdot f_{ctm} / \gamma_m \quad \text{Equação 16}$$

- $f_{ctm}$ : resistência à tração média do concreto no momento da liberação da protensão, seguindo a Equação 17:

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{cj}^2} \quad \text{Equação 17}$$

Com:

- ✓  $f_{cj}$ : resistência à compressão do concreto no momento da liberação da protensão;
- ✓  $f_{ck}$ : resistência a compressão do concreto aos 28 dias;
- ✓  $f_{ctm}$ : resistência a tração do concreto aos 28 dias.

Considerando essa tensão de aderência como constante, pode-se dizer que para a tensão de protensão atuante, essa última será transmitida para o concreto, desde que aderida em um determinado comprimento de transferência  $l_{bpt}$ . Este comprimento, segundo a ABNT NBR 14861 (2022), é calculado com a Equação 18:

$$l_{bpt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \phi \cdot \sigma_{p0} / f_{bpt} \quad \text{Equação 18}$$

Sendo:

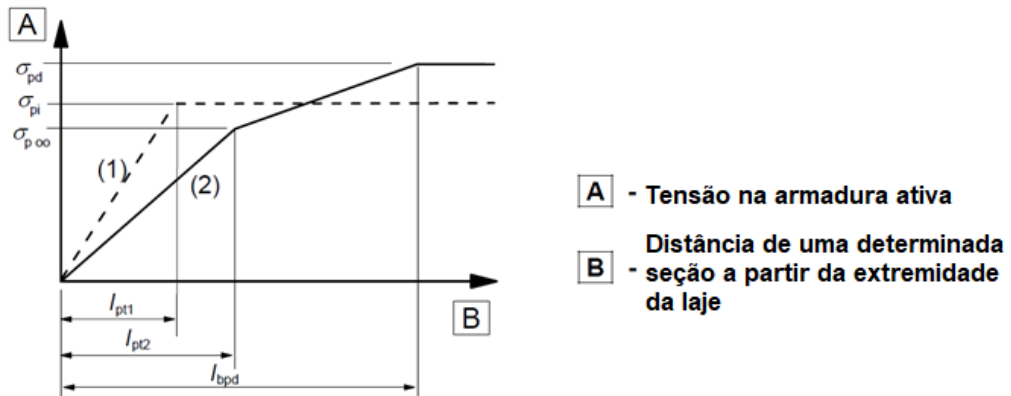
- $\alpha_1$ : coeficiente que considera o tipo de liberação de protensão. Corresponde a 1,0 para liberação gradual e 1,25 para liberação não gradual;
- $\alpha_2$ : coeficiente considera a seção transversal da armadura. Corresponde a 0,25 para barras circulares e 0,19 para cordoalhas;
- $\phi$ : diâmetro da armadura ativa;
- $\sigma_{p0}$ : tensão na armadura logo após liberação da protensão.

Como descrito anteriormente, o comprimento de transferência muda de acordo com a verificação a ser realizada (escorregamento da armadura, resistência à força cortante, fendilhamento do concreto, entre outros fatores). Isso se deve à mudança de diâmetro da armadura ativa de acordo com a tensão nela existente, alterando, assim, a tensão de compressão transversal e, então, a parcela referente ao atrito. O Eurocode 2 (2004) apresenta quais são as possibilidades de comprimento de transferência a partir do  $l_{pt1}$  e  $l_{pt2}$  (Figura 21), que são variações do comprimento  $l_{bpt}$ , utilizados de acordo com a verificação a ser feita na laje alveolar. Seus valores correspondem a:

$$l_{pt1} = 0,8 \cdot l_{bpt} \quad \text{Equação 19}$$

$$l_{pt2} = 1,2 \cdot l_{bpt} \quad \text{Equação 20}$$

Figura 21: Comprimento de transferência na liberação da protensão (1) e no ELU (2)



Fonte: Eurocode 2 (2004)

### 2.5.2.2 TRAÇÃO DIAGONAL

Caracteriza-se o mecanismo de ruptura por tração diagonal quando a tensão de tração resistente do concreto é ultrapassada pela tensão solicitante, sem que tenha havido a fissuração por flexão da região. Geralmente, esse modo de falha ocorre em regiões com pouco influência de tensões de compressão, como a região de transferência da força de protensão próxima ao apoio (Maciel, 2017).

Como não há fissuração do material por flexão antes da ruptura, a seção transversal pode ser considerada homogênea e as equações de tensões dadas pela resistência dos materiais ainda são válidas, sendo elas:

$$\sigma_x = \frac{P(x)}{A} \quad \text{Equação 21}$$

$$\tau = \frac{S_y(z) \cdot V}{b_z \cdot I_y} \quad \text{Equação 22}$$

Nas quais:

- $P(x)$ : Força normal de protensão;
- $A$ : Área da seção transversal;
- $S_y(z)$ : Momento estático em relação à fibra da seção transversal localizada na altura  $z$ ;
- $b_z$ : Largura da seção transversal na altura  $z$ ;
- $I_y$ : Momento de Inércia em torno de  $y$ ;
- $V$ : Força cortante.

Baseando-se na teoria clássica de análises elásticas, pode-se encontrar a tensão de tração principal no ponto crítico a partir da equação:

$$\sigma_p = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad \text{Equação 23}$$

Sendo:

- $\sigma_x$ : Tensão normal na direção  $x$  no ponto crítico;
- $\sigma_y$ : Tensão normal na direção  $y$  no ponto crítico;
- $\sigma_p$ : Tensão principal de tração no ponto crítico.

Considerando que a tensão normal na direção  $y$  ( $\sigma_y$ ) é pequena e que a tensão principal ( $\sigma_p$ ) na iminência da ruptura é igual à resistência à tração do concreto ( $f_{ct}$ ), tem-se que:

$$f_{ct} = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad \text{Equação 24}$$

Inserindo a equação 22 na 24, é possível encontrar a força cortante máxima resistida no ponto crítico:

$$f_{ct} = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{S_y(z) \cdot V}{b_z \cdot I_y}\right)^2} \quad \text{Equação 25}$$

$$f_{ct} - \frac{\sigma_x}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{S_y(z) \cdot V}{b_z \cdot I_y}\right)^2} \quad \text{Equação 26}$$

$$\left(f_{ct} - \frac{\sigma_x}{2}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{S_y(z) \cdot V}{b_z \cdot I_y}\right)^2 \quad \text{Equação 27}$$

$$f_{ct}^2 - 2 \cdot \frac{\sigma_x}{2} \cdot f_{ct} + \left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{S_y(z) \cdot V}{b_z \cdot I_y}\right)^2 \quad \text{Equação 28}$$

$$\sqrt{f_{ct}^2 - 2 \cdot \frac{\sigma_x}{2} \cdot f_{ct}} = \frac{S_y(z) \cdot V}{b_z \cdot I_y} \quad \text{Equação 29}$$

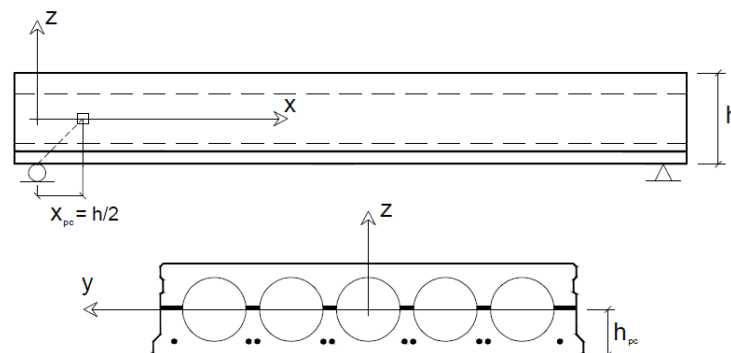
$$V = \frac{b_z \cdot I_y}{S_y(z)} \cdot \sqrt{f_{ct}^2 - \sigma_x \cdot f_{ct}} \quad \text{Equação 30}$$

Por convenção, quando  $\sigma_x$  é a tensão de compressão, o seu valor é negativo (Klein-Holte, 2017). Considerando que esta tensão represente a protensão, tem-se que:

$$V = \frac{b_z \cdot I_y}{S_y(z)} \cdot \sqrt{f_{ct}^2 + \sigma_x \cdot f_{ct}} \quad \text{Equação 31}$$

A resistência máxima da laje à força cortante é dada quando a altura  $z$  é 0, ou seja, está no centro de gravidade da peça.

Figura 22: Localização do ponto crítico tradicional



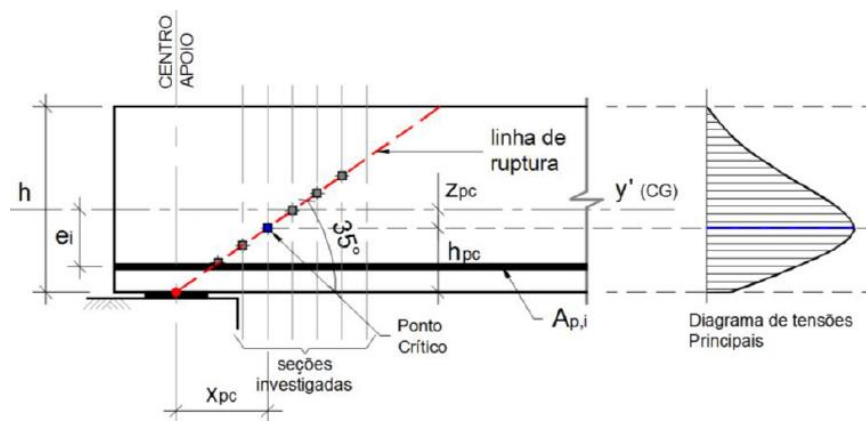
Fonte: Marquesi (2004)



Contudo, a Equação 31 traz resultados contra a segurança, de acordo com ensaios realizados (Maciel, 2017). Sendo assim, códigos normativos que baseiam suas verificações nessa equação impõem fatores corretivos para garantir a segurança estrutural.

Yang (1994), em um estudo nessa área, destacou que o ponto crítico não estava no centroide da seção transversal, mas dependia das características da seção transversal (Figura 23). É possível se encontrar o ponto crítico a partir do cruzamento de uma linha de ruptura inclinada em 35° com a horizontal a partir do centro do apoio da laje. Nessas verificações, foi possível observar que o ponto crítico pode se afastar bastante do centroide da seção, diminuindo a resistência da laje.

Figura 23: Localização do ponto crítico de acordo com a seção transversal



Fonte: Maciel (2017)

Também foi verificado por Yang (1994) e Pajari (2005) que deve ser levado em consideração o aumento das tensões na região em consequência da introdução da protensão. A tensão de protensão no ponto crítico varia, pois como na maioria das vezes este ponto se encontra dentro do comprimento de transferência da armadura de protensão, ela não está completamente implementada.

O *Bulletin 6* da FIB (2000) traz o equacionamento para verificação da resistência à força cortante de lajes alveolares a partir da Equação 32.

$$V_{Rdc} = \frac{I \cdot b_w}{s} \cdot \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha \cdot \sigma_{cpm} \cdot f_{ctd}}$$

Equação 32

Sendo:

- $\sigma_{cpm}$ : Tensão de compressão decorrente da protensão;
- $\alpha$ :  $l_x/l_{pt2}$ ;
- $b_w$ : somatório das espessuras das nervuras localizadas a “y” da face inferior da laje;
- $f_{ctd}$ : Resistência à tração de cálculo do concreto;
- $S$ : Momento estático de área da seção da laje alveolar;
- $I$ : Momento de inércia da seção transversal da laje alveolar.

Quando a laje alveolar apresentar seção composta, a FIB (2000) mostra que a resistência à força cortante pode ser calculada partindo da verificação de tensões (Equação 33) ou de verificação de força (Equação 34).

$$V_{sdg} \cdot \frac{S}{b_w \cdot I} + V_{sdq} \cdot \frac{S'}{b_w \cdot I'} \leq \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha \cdot \sigma_{cpm} \cdot f_{ctd}} \quad \text{Equação 33}$$

Na qual:

- $V_{sdg}$ : Força cortante das cargas permanente (peso próprio e capa);
- $V_{sdq}$ : Força cortante das cargas permanentes após efetivação da seção composta e cargas acidentais (revestimentos, utilização);
- $S$ : Momento estático de área da seção da laje alveolar;
- $I$ : Momento de inércia da seção transversal da laje alveolar;
- $S'$ : Momento estático de área da seção composta;
- $I'$ : Momento de inércia da seção transversal da seção composta.

$$\overline{V_{Rdt}} = V_{Rdt} \cdot \frac{S \cdot I'}{S' \cdot I} + V_{sdg} \cdot \left(1 - \frac{S \cdot I'}{S' \cdot I}\right) \quad \text{Equação 34}$$

Baseada em diversos estudos, a EN1168:2005 traz a verificação de resistência ao cisalhamento de lajes alveolares fundamentando-se na equação proposta por Pajari (2005).

$$V_{Rdc} = \frac{I \cdot b_w(y)}{S_c(y)} \cdot \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_{cp}(y) \cdot f_{ctd}} - \tau_{cp}(y) \quad \text{Equação 35}$$

Na qual:

$$\sigma_{cp}(y) = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[ \frac{1}{A} + \frac{(Y_c - y) \cdot (Y_c - Y_{pt})}{I} \right] \cdot p_t(l_x) \right\} - \frac{M_{Ed}}{I} \cdot (Y_c - y) \quad \text{Equação 36}$$

e

$$\tau_{cp}(y) = \frac{1}{b_w(y)} \cdot \sum_{i=1}^n \left\{ \left[ \frac{A_c(y)}{A} + \frac{S_c(y) \cdot (Y_c - Y_{pt})}{I} + C_{pt}(y) \right] \cdot \frac{dP_t(l_x)}{dx} \right\} \quad \text{Equação 37}$$

Sendo:

- $\sigma_{cp}(y)$ : Tensão de compressão no ponto definido pela ordenada “y” e pela abcissa “ $l_x$ ”;
- $\tau_{cp}(y)$ : Tensão de cisalhamento no ponto definido pela ordenada “y” e pela abcissa “ $l_x$ ”;
- $b_w(y)$ : somatório das espessuras das nervuras localizadas a “y” da face inferior da laje;
- $A_c(y)$ : área da seção transversal acima da cota “y” do ponto analisado e acima do C.G.;
- $S_c(y)$ : Momento estático relativo à área acima da cota “y” do ponto analisado e acima do C.G.;
- $A$ : Área total da seção transversal;
- $I$ : Momento de inércia da seção transversal;
- $Y_c$ : Altura do C.G. da seção em relação à face inferior da laje;
- $y$ : Ordenada do ponto analisado em relação à face inferior da laje;
- $Y_{pt}$ : altura da camada de protensão em relação à face inferior da laje;
- $P_t(l_x)$ : Força de protensão relativa à camada “t” de protensão e avaliada a “ $l_x$ ” da extremidade da laje;
- $M_{Ed}$ : momento fletor em virtude das cargas atuantes, pode ser considerado nulo para esta equação;
- $n$ : número de camadas de protensão;
- $C_{pt}(y) = \begin{cases} -1; & \text{se } y < Y_{pt} \\ 0; & \text{se } y > Y_{pt} \end{cases}$

As equações 36 e 37 devem ser calculadas no ponto da linha de falha que parte da parte interna do apoio, diferente do apresentado por Yang (1994), em um ângulo com a horizontal de 35°. O ponto crítico é a intersecção entre a linha inclinada com a seção crítica do elemento, no qual se apresenta o menor  $b_w$  (Figura 24).

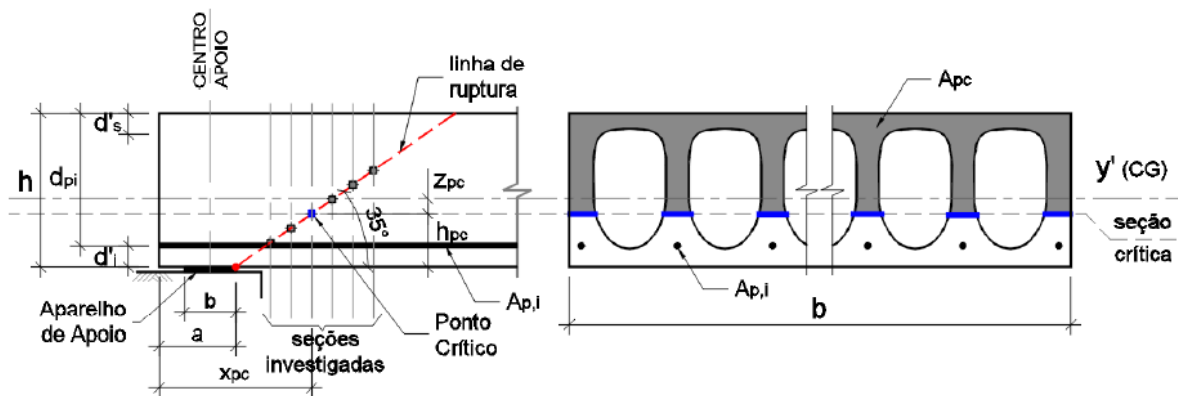
Em decorrência da dificuldade da equação anterior, a EN1168:2005 traz a equação simplificada.

$$V_{Rdc} = \varphi \cdot \frac{I \cdot b_w}{S_c} \cdot \sqrt{f_{ctd}^2 + \beta \cdot \alpha_1 \cdot \sigma_{cp}(y) \cdot f_{ctd}} \quad \text{Equação 38}$$

Sendo:

- $\alpha_1 = \frac{l_x}{l_{pt2}}$ : Grau de transferência de protensão ( $\alpha_1 < 1$ );
- $\varphi$ : Fator de redução igual a 0,8;
- $\beta$ : Fator de redução da transferência de protensão igual a 0,9.

Figura 24: Verificação do ponto crítico



Fonte: Maciel (2017)

A partir do estado da arte em relação à tração diagonal, a norma ABNT NBR 14861:2022 apresenta, de acordo com a geometria da seção transversal, maneiras de se calcular a capacidade resistente à força cortante das lajes alveolares.

A verificação da resistência à força cortante deve ser realizada na seção transversal crítica definida pelo comprimento  $l_x$ , a partir da extremidade da laje sobre seu apoio, sendo  $l_x$  calculado na equação 39.

$$l_x = l_a + x_{pc} \quad \text{Equação 39}$$

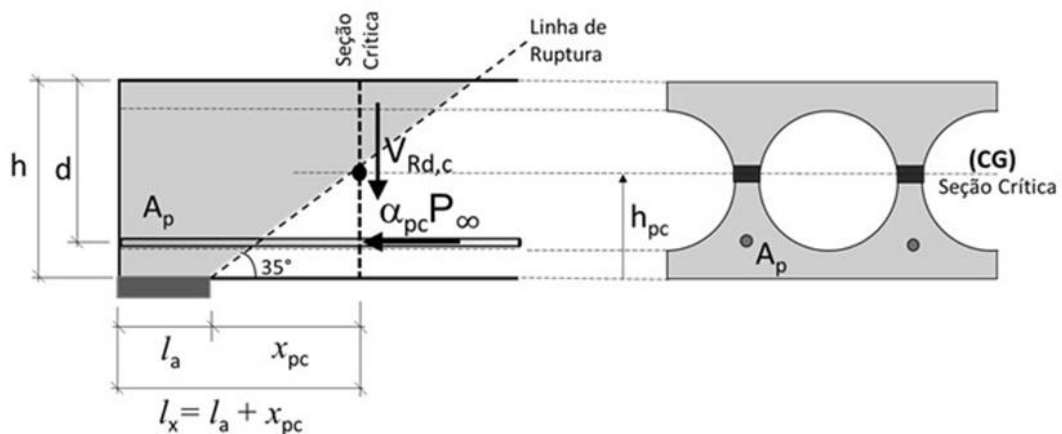
Sendo:

- $l_a$ : comprimento de apoio da laje;
- $x_{pc}$ : distância horizontal do apoio interno da laje até o ponto crítico, considerando uma linha de ruptura com inclinação de  $35^\circ$ );

A altura do ponto crítico vai depender da seção transversal, de acordo com a ABNT NBR 14861 de 2022, sendo essa altura o ponto de interseção entre a linha de ruptura a  $35^\circ$  e a menor largura da seção transversal da laje alveolar.

Para lajes com alvéolos circulares com altura entre 250 e 320mm, a altura do ponto crítico ( $h_{pc}$ ) é encontrada a partir da Figura 25, e sua resistência a partir da tração diagonal é dada pela equação 40.

Figura 25: Verificação do ponto crítico para lajes com alvéolos circulares

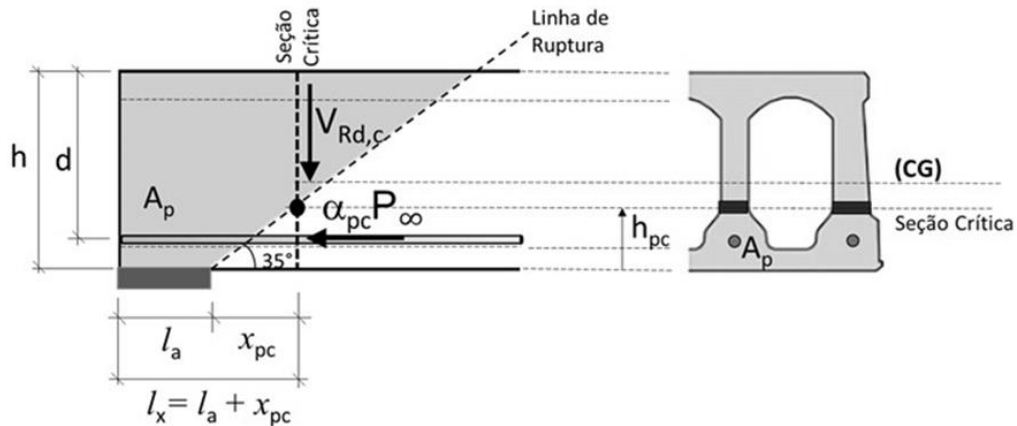


Fonte: ABNT NBR 14861 (2022)

$$V_{Rdc} = 0,95 \cdot \frac{I \cdot b_w}{s_c} \cdot \sqrt{f_{ctd}^2 + \alpha_{pc} \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}} \quad \text{Equação 40}$$

Para lajes com alvéolos poligonais com altura entre 250 e 400mm, a altura do ponto crítico ( $h_{pc}$ ) é encontrada a partir da Figura 26, e sua resistência a partir da tração diagonal é dada pela equação 41.

Figura 26: Verificação do ponto crítico para lajes com alvéolos poligonais



Fonte: ABNT NBR 14861 (2022)

$$V_{Rdc} = \beta_{pc} \cdot \frac{I \cdot b_w}{S_c} \cdot \sqrt{f_{ctd}^2 + 0,9 \cdot \alpha_{pc} \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}} \quad \text{Equação 41}$$

sendo

- $I$ : momento de inércia da seção bruta de concreto;
- $b_w$ : somatório das nervuras (internas e externas) da laje alveolar;
- $S_c$ : momento estático com base no centroide;
- $f_{ctd}$ : é o valor de projeto da resistência à tração do concreto;
- $\sigma_{cp}$ : é a tensão de compressão do concreto devido à força de protensão de projeto para o caso da laje sem alvéolo preenchido;
- $\alpha_{pc}$ : fator de redução da tensão de protensão na posição longitudinal do ponto crítico (Equação 42);

$$\alpha_{pc} = \frac{L_x}{L_{pt2}} \quad \text{Equação 42}$$

- $\beta_{pc}$ : coeficiente de ajuste que considera os efeitos da geometria dos alvéolos e da posição da altura do ponto crítico na nervura da laje para a resistência à força cortante por tração diagonal (Equação 43).

$$\beta_{pc} = 0,5 + \frac{h_{pc}}{h} \leq 1,0 \quad \text{Equação 43}$$

A resistência à força cortante por tração diagonal da seção composta da laje com a capa estrutural pode ser determinada pela Equação 44.

$$V_{Rd,cc} = V_{Rd,c} \cdot \frac{S'I'}{S'I} + V_{Sd,(g1+g2)} \cdot \left(1 - \frac{S'I'}{S'I}\right) \quad \text{Equação 44}$$

Sendo

- $I'$ : momento de inércia da seção composta homogeneizada de concreto;
- $S'$ : momento estático com base no centroide da seção composta homogeneizada.
- $V_{Sd,(g1+g2)}$ : somatório das nervuras (internas e externas) da laje alveolar;

Deve-se salientar que a norma ABNT NBR 14861:2022 apresenta a possibilidade de se calcular a resistência pelo mecanismo de tração diagonal para situações nas quais pode-se considerar a ação sobre a estrutura distribuída uniformemente. Em situações com cargas concentradas, a norma não se posiciona pela não utilização do mecanismo de tração diagonal, porém deixa claro que devem ser feitas verificações em relação à interação em força cortante e momento fletor para as piores posições de solicitação para as lajes.

### 2.5.3 MECANISMOS DE RUPTURA DA INTERFACE ENTRE LAJE ALVEOLAR E CAPA

A ruptura, nesse caso, ocorre por cisalhamento horizontal na interface do elemento pré-fabricado com a capa estrutural moldada no local (Girhammar e Pajari, 2008). O cisalhamento solicitante ultrapassa a tensão, que faz com que ambos os materiais trabalhem em conjunto, ocasionando o descolamento da capa e da laje. Esse descolamento faz com que a resistência e a rigidez do conjunto diminuam.

A capacidade dos materiais trabalharem em conjunto depende da transferência de cisalhamento na interface entre os dois elementos (capa e laje). Essa transferência, como explicitado por El Debs (2017), depende de duas características. A primeira é a característica da superfície de contato, e a segunda é em relação à existência de armaduras “costurando” a interface.

A primeira característica depende das resistências por adesão, atrito e pela resistência mecânica (já explicadas no entendimento do comprimento de transferência de armaduras de protensão).

A segunda característica da transferência de cisalhamento na interface depende da capacidade da armadura ao corte direto (efeito pino) e em razão da tensão normal à interface.

De acordo com a FIB (2019), a capacidade resistente ao cisalhamento horizontal também é influenciada por inúmeros fatores relacionados à execução da estrutura, sendo eles:

- Características do concreto utilizado;
- Características da superfície;
- Umidade;
- Contaminação por sujeira ou pó;
- Presença de nata de concreto.

Em relação à superfície na qual ocorrerá a interface entre a capa e a laje, sua rugosidade está diretamente ligada à resistência ao cisalhamento. A FIP (1998) faz uma detalhada classificação em relação aos possíveis tipos de superfície, dividindo-as em dez classes:

1. Superfície bastante lisa, obtidas com formas metálicas ou de madeira;
2. Superfície alisada, atingindo níveis próximos a 1;
3. Superfície alisada, porém, apresenta pequenas ondulações decorrentes da presença de agregados para a superfície;
4. Superfície que foi executada por forma deslizante ou por régua vibratória;
5. Superfície que foi produzida a partir de técnicas de extrusão;
6. Superfície que foi texturizada ainda com o concreto fresco;
7. Superfície que foi texturizada ainda com o concreto fresco, mas com as ranhuras mais evidentes;
8. Superfície que foi vibrada, contudo não houve seu desempenho;
9. Superfície em que o concreto ainda fresco foi jateado com água ou areia, expondo os agregados graúdos;
10. Superfície que foi feita com chaves de cisalhamento.

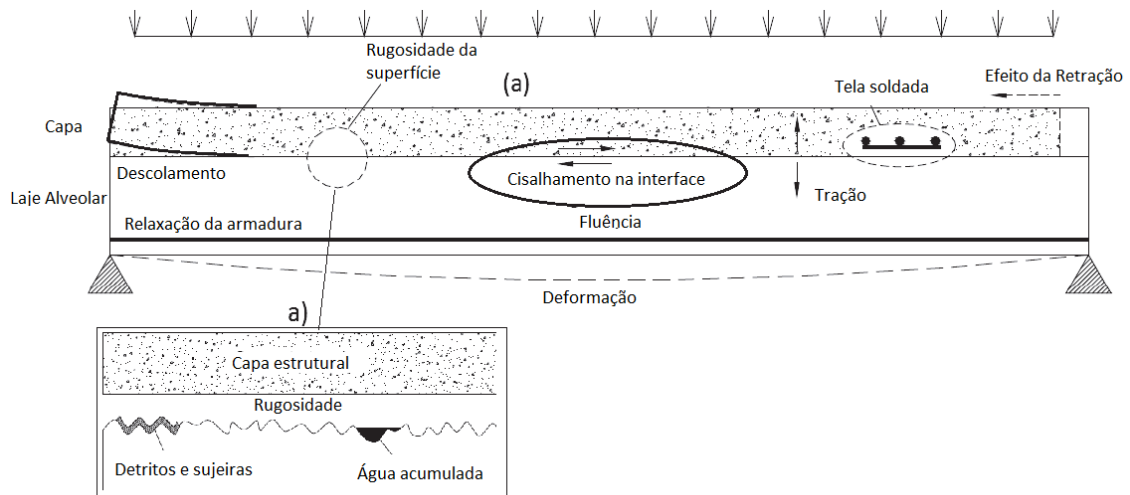


Já de acordo com o Eurocode 2 (2004), e em outras normas internacionais, a divisão de tipos de superfícies pode ser diminuída para apenas quatro, sendo elas:

1. Superfície muito lisa, obtida em formas metálicas, plásticas ou de madeira preparada;
2. Superfícies lisas, produzidas baseadas em formas deslizantes ou extrusoras, ou superfícies sem tratamento;
3. Superfícies rugosas, as quais apresentam pelo menos 3 mm de desnivelamento espaçados em 40 mm;
4. Superfícies denteadas.

A presença de umidade excessiva, sujeira ou pó e nata na superfície diminui a capacidade na interface entre os elementos, sendo então extremamente necessária a sua limpeza. Deve-se deixá-la úmida antes da aplicação da capa, contudo não é recomendável o acúmulo de água (Figura 27).

Figura 27: Problemas na interface



Fonte: FIB (2019)

A tensão de cisalhamento que ocorre na interface entre a capa e a laje pode ser calculada segundo a teoria clássica da resistência dos materiais, com a Equação 45.

$$\tau(y) = \frac{V}{b \cdot (E \cdot I)_0} \cdot \int_y^{y_{m\acute{a}x}} E \cdot y dA \quad \text{Equação 45}$$

Sendo:

- $V$ : Força cortante;
- $b$ : Largura total da laje;
- $(E \cdot I)_0$ : Rigidez da seção composta laje mais capa;
- $E$ : Módulo de elasticidade do concreto;
- $y$ : Distância entre a interface considerada até o centro de gravidade da seção composta.

De acordo com a FIB (2019), outra maneira de encontrar a tensão de cisalhamento na interface de lajes alveolares, desde que ela esteja uniformemente carregada, é fazendo uso da Equação 46.

$$\tau_{Edi} = \frac{\beta \cdot V_{Ed}}{b \cdot z} \quad \text{Equação 46}$$

Na qual:

- $V_{Ed}$ : Força cortante solicitante máxima;
- $b$ : Largura da interface;
- $z$ : Braço de alavanca da seção composta;
- $\beta$ : é a razão entre a quantidade de tensão de compressão na capa e quantidade total na zona de compressão, calculada na seção considerada.

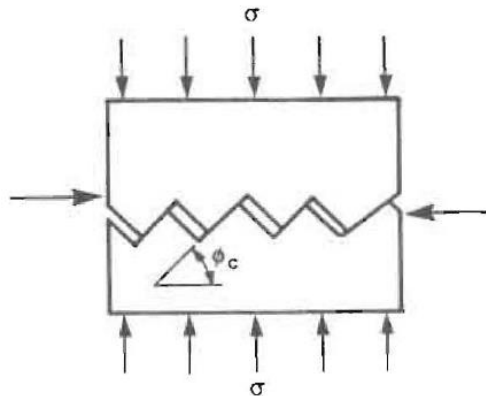
Fundamentado no cálculo da tensão solicitante, é necessário compará-la com a capacidade da interface. Essa capacidade ao cisalhamento foi primeiramente estudada com base nos critérios de Coulomb, sendo a tensão de cisalhamento máxima obtida com a Equação 47.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi_c \quad \text{Equação 47}$$

Sendo:

- $c$ : Coesão em virtude da microrrugosidade;
- $\sigma$ : Tensão perpendicular à interface;
- $\phi_c$ : Ângulo médio da microrrugosidade em relação ao eixo horizontal (Figura 28).

Figura 28: Mecanismo de resistência da interface



Fonte: FIP (1998)

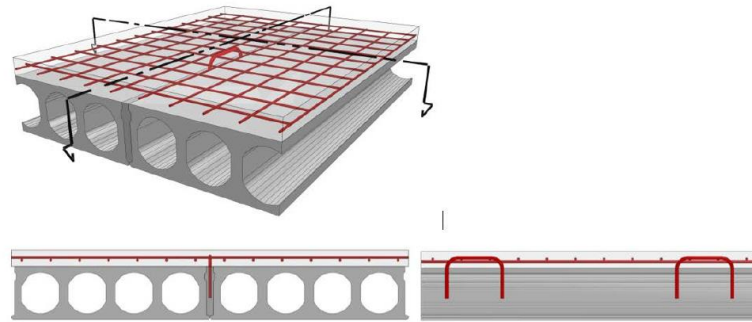
Em situações nas quais a interface for transpassada por armaduras perpendiculares (Figura 29 e Figura 30), estas armaduras ficam sujeitas a tensões de tração durante o escorregamento. Se a rugosidade for grande o suficiente, a armadura alcançará o escoamento, podendo verificar a resistência da interface utilizando a Equação 48 (FIP, 1998).

$$\tau = c + (\sigma + \rho \cdot f_{sy}) \cdot \tan \phi_c \quad \text{Equação 48}$$

Na qual:

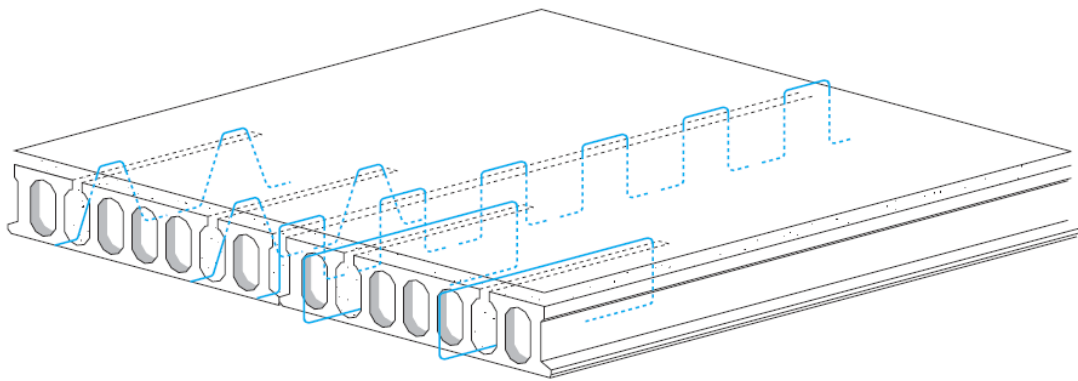
- $\rho$ : Taxa de armadura
- $f_{sy}$ : Tensão de escoamento da armadura
- $\phi_c$ : Ângulo médio da microrrugosidade em relação ao eixo horizontal (Figura 28).

Figura 29: Armadura de costura da interface laje - capa



Fonte: FIB (2019)

Figura 30: Possibilidades de armadura de costura na interface laje - capa



Fonte: ASSAP (2002)

De acordo com o Eurocode 2 (2004) e FIB (2019), pode ser calculada a tensão resistente da interface entre laje alveolar e capa, a partir da Equação 50.

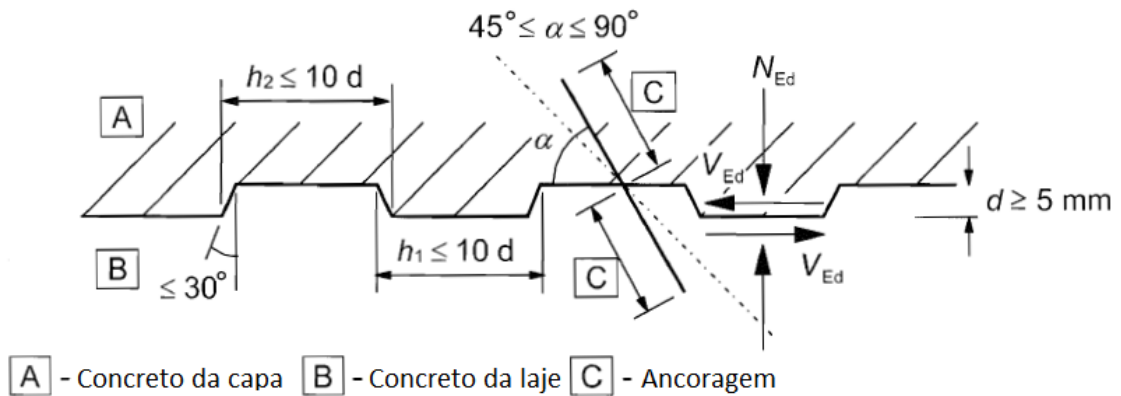
$$\tau_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) < 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \quad \text{Equação 49}$$

Na qual:

- $\rho$ : Taxa de armadura;
- $f_{yd}$ : Tensão de escoamento da armadura;
- $c$ : Coesão decorrente da microrrugosidade;
- $\mu$ : Coeficiente de atrito da superfície;
- $\sigma_n$ : Tensão perpendicular à interface;
- $f_{ctd}$ : Resistência à tração de cálculo do concreto;

- $f_{cd}$ : Resistência à compressão de cálculo do concreto;
- $\nu$ : fator de redução  $\nu = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$ ;
- $\alpha$ : Valor definido pela Figura 31.

Figura 31: Junta na interface



Fonte: Eurocode 2 (2004)

Como a maioria das interfaces entre lajes e capas não apresentam armaduras, a equação de resistência pode ser reescrita como:

$$\tau_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n \quad \text{Equação 50}$$

Os valores de  $c$  e de  $\mu$  dependem dos possíveis tipos de superfícies, que, de acordo com o Eurocode 2 (2004), são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Coeficiente de coesão e atrito

Tipo de superfície	$c$	$\mu$
Muito lisa	0,025 a 0,1	0,5
lisa	0,2	0,6
Rugosa	0,4	0,7
Denteada	0,5	0,9

Fonte: Próprio Autor

No entanto, Derkowski e Surma (2015), partindo de análises computacionais e ensaios, observaram que os valores obtidos nas equações dadas pelo Eurocode 2 (2004) são extremamente conservadores. Com os estudos, foi verificado que os valores de resistência apresentados pelo Model Code (2010), apresentam-se mais próximos da realidade.

Segundo o item 6.3.4 do Model Code (2010), a resistência da interface pode ser dada pela Equação 51.

$$\tau_u = \tau_c + \mu \cdot (\rho \cdot k \cdot f_y + \sigma_n) + \alpha \cdot \rho \cdot \sqrt{f_y \cdot f_{cc}} \leq \beta_c \cdot \nu \cdot f_{cc} \quad \text{Equação 51}$$

Na qual:

- $\tau_c$ : Valor do engrenamento por adesão;
- $\mu$ : Coeficiente de atrito da superfície;
- $\rho$ : Taxa de armadura;
- $k$ : fator de interação para atrito entre 0,5 e 1;
- $\alpha$ : fator de interação para efeito pino entre 0 e 1,5;
- $f_y$ : Tensão de escoamento da armadura;
- $\sigma_n$ : Tensão perpendicular à interface;
- $f_{cc}$ : Resistência à compressão de cálculo do concreto;
- $\beta_c$ : Coeficiente que caracteriza a qualidade da aderência das armaduras;
- $\nu$ : fator de redução  $\nu = 0,1 - (1 - \frac{f_{ck}}{250})$ .

Como sugerido pelo Model Code (2010), os valores  $\tau_c$  e  $\mu$  podem ser considerados como mostrados na Tabela 3, de acordo com o tipo de rugosidade da superfície.

Tabela 3: Coeficiente de adesão e atrito

Tipo de superfície	$\tau_c$	$\mu$
Muito lisa	0,5-1,5 MPa	0,5-0,7
lisa	1,5-2,5 MPa	0,7-1
Rugosa	2,5-3,5 MPa	1-1,4

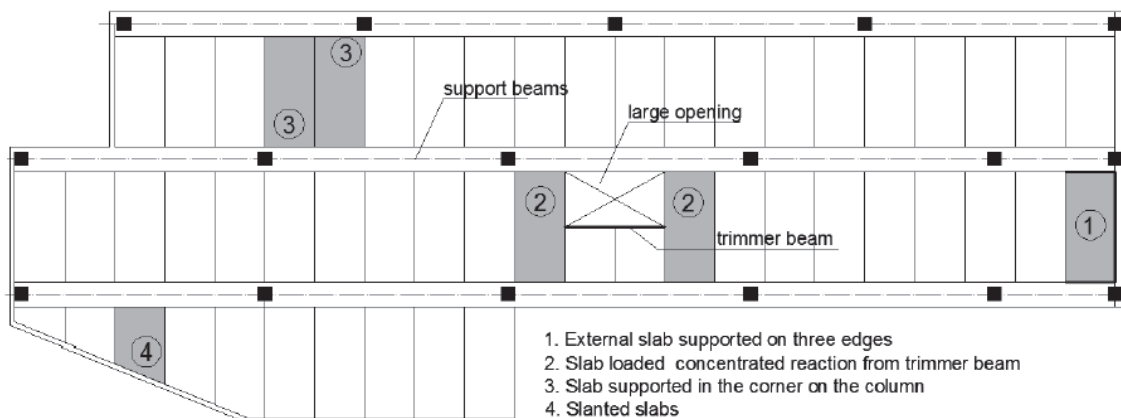
Fonte: Próprio Autor

### 2.5.4 MECANISMOS DE RUPTURA POR TORÇÃO

Normalmente, as lajes alveolares são verificadas para o estado plano de tensões. Esse estado é válido para situações nas quais as ações são consideradas distribuídas em toda a superfície da laje e seus apoios são relativamente rígidos e paralelos. Contudo, se apenas um elemento do pavimento está apoiado ou é carregado de maneira diferente, então a distribuição de esforços transversais pode causar torção nas lajes adjacentes (Derkowski e Surma, 2015). Exemplos onde tais situações acontecem são (Figura 32):

- a) Elementos apoiados em três pontos;
- b) Elementos carregados com ações concentradas;
- c) Elementos apoiados com um dos seus vértices recortados por causa da presença de pilar;
- d) Elementos com apoios não paralelos;
- e) Elementos apoiados e vigas relativamente esbeltas.

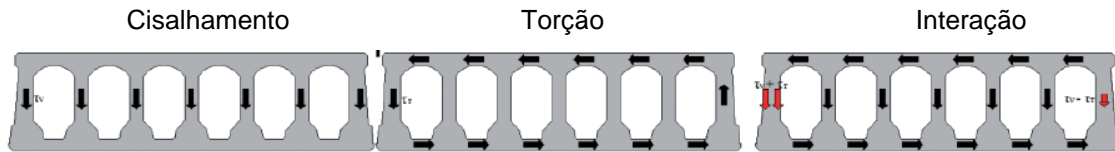
Figura 32: Lajes alveolares com esforços de torção



Fonte: Derkowski e Surma (2015)

A ruptura em consequência da torção ocorre, pois há um aumento da força cortante em uma das bordas externas da laje alveolar, como se pode observar na Figura 33.

Figura 33: Distribuição de tensões transversais na seção de uma laje alveolar



Fonte: Derkowski e Surma (2015)

De acordo com a norma EN1168:2005, se uma seção é submetida simultaneamente a tensões de cisalhamento e torção, a capacidade ao cisalhamento  $V_{Rdn}$ , salvo em situações justificadas, deve ser calculada pela Equação 52.

$$V_{Rdn} = V_{Rd,c} - V_{Etd} \quad \text{Equação 52}$$

Na qual  $V_{Etd}$  é:

$$V_{Etd} = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot b_w} \cdot \frac{\sum b_w}{(b - b_w)} \quad \text{para lajes alveolares} \quad \text{Equação 53}$$

$$V_{Etd} = T_{Ed} \cdot \frac{(3 + 1,8 \cdot \frac{b}{h})}{b} \quad \text{para elementos sólidos} \quad \text{Equação 54}$$

Sendo:

- $V_{Rdn}$ : resistência à força cortante;
- $V_{Rd,c}$ : valor e cálculo da resistência à cortante de acordo com o modelo de tração diagonal;
- $V_{Etd}$ : valor de cálculo da força cortante atuante, considerando o momento torsor;
- $T_{Ed}$ : valor de cálculo do momento torsor na seção considerada;
- $b_w$ : largura da nervura mais externa no nível do centroide, em mm;
- $\sum b_w$ : soma das espessuras das nervuras no nível do centroide do elemento, em mm;
- $b$ : largura total da laje.

Contudo, os resultados apresentados com essa verificação se mostram muito conservadores, tornando-se necessário entender melhor o funcionamento dessas lajes submetidas à torção.



As lajes alveolares, quando não fissuradas, apresentam rigidez à torção de acordo com a Equação 55.

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{T}{C} = \frac{T}{G \cdot K_t}$$

Equação 55

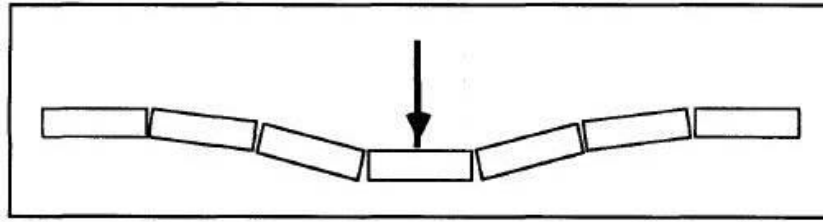
Com:

- $T$ : Momento torsor;
- $\varphi$ : Ângulo de rotação;
- $C$ : Rigidez à torção;
- $G$ : Módulo transversal dado por  $G = \frac{E}{2 \cdot (1-\nu)}$ ;
- $\nu$ : coeficiente de Poisson dado como 0,2;
- $K_t$ : Fator de seção transversal para a torção. Depende do formato da seção transversal.

## 2.6 AÇÕES PONTUAIS

Sobre o comportamento de pavimentos feitos com lajes alveolares submetidos a cargas concentradas, a literatura trata o assunto como se essa carga fosse distribuída entre um conjunto de lajes adjacentes (distribuição transversal). De acordo com Stanton (1992), porém, não é a carga que é dividida, mas sim as reações e as deformações das lajes que são modificadas devido à interação entre elas através das juntas concretadas/grauteadas (Figura 34). Neste trabalho, será utilizado o termo distribuição de cargas para que seja equalizada a nomenclatura entre todos os textos estudados.

Figura 34: Comportamento de um pavimento em lajes alveolares submetido a uma força concentrada



Fonte: Stanton (1992)

Catoia (2011) mostra que para locais como Europa, onde são empregadas lajes com maiores alturas, não existe a necessidade do emprego de capa estrutural em todas as situações de projetos. Além disso, a não consideração da capa de concreto acontece graças ao emprego de ligações especiais entre as lajes e as vigas e de melhores juntas longitudinais, com mecanismos desenvolvidos para garantir a transferência de tensões de cisalhamento verticais.

Como muitos estudos de interação de lajes alveolares submetidas a cargas pontuais ou lineares até então foram feitos na Europa e Estados Unidos da América, os ensaios seguiram o padrão de construção desses lugares. Com isso, os resultados obtidos descrevem o funcionamento da distribuição de cargas pontuais e lineares para pavimentos biapoiados sem capa de concreto, sendo diferentes da maneira usual de se fazer pavimentos com lajes alveolares no Brasil.

Segundo a FIB (2019), a distribuição transversal das cargas concentradas em pavimentos de lajes alveolares dá origem a:

- Momentos fletores na direção transversal do elemento pré-fabricado;
- Tensão vertical de cisalhamento nas chavetas;
- Torção no elemento considerado, pois a tensão de cisalhamento em uma borda da laje é diferente em magnitude em relação a sua outra borda.

Em decorrência do método de produção de lajes alveolares, não é possível colocar armaduras transversais, sendo então função do concreto conseguir resistir às tensões de tração advindas dos momentos fletores transversais e torção.

Aswad e Jacques (1992), os quais estudaram cargas concentradas nos bordos de lajes alveolares, mostraram que a verificação das tensões de tração e cisalhamento causados por torção das lajes tem grande importância. Foi verificado que se tais tensões causarem a fissuração das almas externas das lajes, um aumento de tensões

nas almas internas ocorrerá, levando o elemento a um colapso frágil: em razão da punção, quando a carga concentrada está mais próxima do meio do vão (0,33 a 0,5 vezes o vão) e por torção, quando a ação está próxima ao apoio (0,15 a 0,25 vezes o vão).

O PCI (2015) mostrou que as ações concentradas devem ser limitadas para evitar rupturas frágeis, porém não apresentou formulações para verificação de máximas forças concentradas, nem para o cálculo de punção. Já a FIB (2019) apresentou verificações de máximas cargas lineares e pontuais no estado limite de serviço de acordo com seu limite de tensão no concreto  $f_{ctk 0.05}$ , sendo as equações para tipos de carga as seguintes:

- Para cargas lineares na parte central de um pavimento:

$$q_k = \frac{20 \cdot W_{lb} \cdot f_{ctk 0.05}}{l + 2 \cdot b} \quad \text{Equação 56}$$

- Para cargas lineares nas bordas das lajes:

$$q_k = \frac{10 \cdot W_{lt} \cdot f_{ctk 0.05}}{l + 2 \cdot b} \quad \text{Equação 57}$$

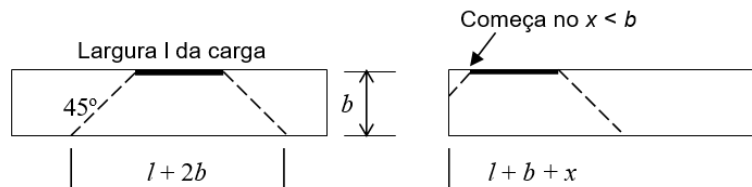
- Para cargas pontuais em qualquer lugar do pavimento:

$$F_k = 3 \cdot W_l \cdot f_{ctk 0.05} \quad \text{Equação 58}$$

Nas quais as variáveis são:

- $W_{lb}$ : o menor módulo de flexão no sentido transversal por unidade de comprimento relativo à fibra inferior;
- $W_{lt}$ : o menor módulo de flexão no sentido transversal por unidade de comprimento relativo à fibra superior;
- $W_l$ : menor valor entre  $W_{lb}$  e  $W_{lt}$ ;
- $l$ : largura da carga;
- $b$ : altura da laje;
- $l + 2b$ : comprimento de distribuição definido pela Figura 35.

Figura 35: Distribuição de cargas concentradas



Fonte: FIB (2019)

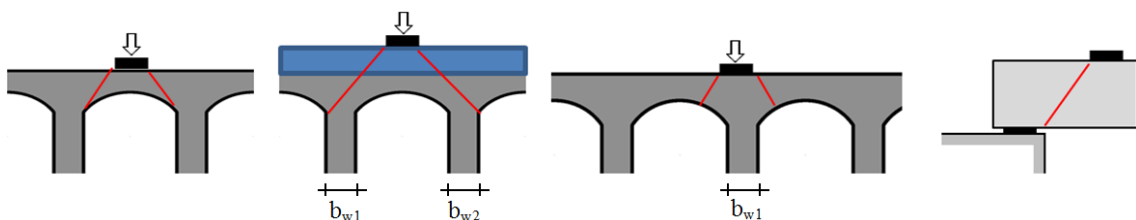
Também é possível determinar através de fórmulas da FIB (2019) e da NBR14861(2011) a resistência à punção de lajes alveolares a partir da equação 59.

$$V_{Rd} = b_{ef} \cdot h \cdot f_{ctd} \cdot \left( 1 + 0,3 \cdot \alpha \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{ctd}} \right) \quad \text{Equação 59}$$

Na qual:

- $b_{ef}$ : espessura efetiva das nervuras, calculada para as situações e variáveis mostradas na figura 14;
- $f_{ctd}$ : resistência de cálculo à tração do concreto da nervura da laje alveolar;
- $h$ : altura total da laje sem ou com capa de concreto;
- $\sigma_{cp}$ : tensão de compressão do concreto no centro de gravidade da laje devido à força de protensão;
- $\alpha$ : relação entre a distância da extremidade da laje ao ponto de aplicação da ação e o valor superior do comprimento de ancoragem, sendo menor do que 1.

Figura 36: Espessura efetiva

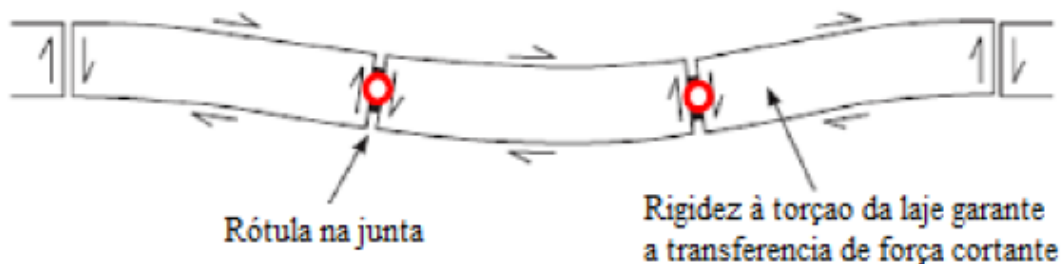


Fonte: FIB (2019)

A chaveta é um dos fatores responsáveis pela distribuição de cargas entre as lajes que participam do apoio de ações concentradas. Estudos feitos por Lague (1971) mostram que em situação na qual uma laje do pavimento não apresenta comprimento de apoio suficiente sobre as vigas, mas existe o preenchimento das suas juntas longitudinais, ela consegue se apoiar nos elementos adjacentes, distribuindo as cargas nela impostas para os outros elementos do pavimento.

Como as chavetas são apenas preenchidas com concreto/graute, elas não têm a capacidade de suportar tensões devido a momentos fletores, porém transferem tensões de cisalhamento. Com isso, pode-se então considerar que seu comportamento é igual ao de uma rótula (Figura 37).

Figura 37: Mecanismo de distribuição transversal de cargas em lajes alveolares



Fonte: Elliot e Jolly (2013)

De acordo com FIB (2019), mesmo em casos em que a chaveta apresenta fissuras, tensões de cisalhamento serão transmitidas por elas graças à compressão originada da torção das lajes adjacentes, à expansão do concreto decorrente do efeito de Poisson e do efeito de engrenamento das próprias fissuras.

A norma ABNT:NBR 14861 (2011) traz o cálculo da resistência a ações concentradas das chavetas, representado pela Equação 60 a seguir:

$$V_{Rd1,conc} = V_{Rd1} \cdot (a + h_{ch} + h_t + 2 \cdot a_s) \quad \text{Equação 60}$$

Na qual:

- $V_{Rd1}$  = menor valor entre:

$$V_{Rd1} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot (h_{ch} + h_t) \quad \text{Equação 61}$$

$$V_{Rd1} = 0,15 \cdot (f_{ctd,ch} \cdot h_{ch} + f_{ctd,t} \cdot h_t) \quad \text{Equação 62}$$

- $f_{cta}, f_{cta,ch}, f_{cta,t}$ : valor de cálculo da resistência à tração do respectivo concreto (laje alveolar, chaveta e capa de concreto);
- $h_{ch}$ : altura da chaveta;
- $h_t$ : altura da capa;
- $a$ : comprimento da ação paralela à junta longitudinal;
- $a_s$ : distância entre o centro de aplicação da ação concentrada e o centro da junta longitudinal.

A FIB (2019) cita que as chavetas devem ter no mínimo 30 mm de largura na sua parte superior e deve apresentar concreto/graute de boa qualidade. Song *et al.* (2009) mostra que junta entre lajes muito larga faz com que a capacidade de distribuição de cargas seja afetada, o que gera uma diminuição da cooperação entre as lajes adjacentes e a carregada para suporte de cargas concentradas. Isso ocorre, pois o concreto utilizado nas juntas, em grande parte dos casos, apresenta menor resistência do que utilizado nas lajes alveolares. Dessa forma, a rigidez à torção da junta será menor do que a da laje, fazendo com que a chaveta não tenha capacidade de transmitir esforços para a laje adjacente não carregada.

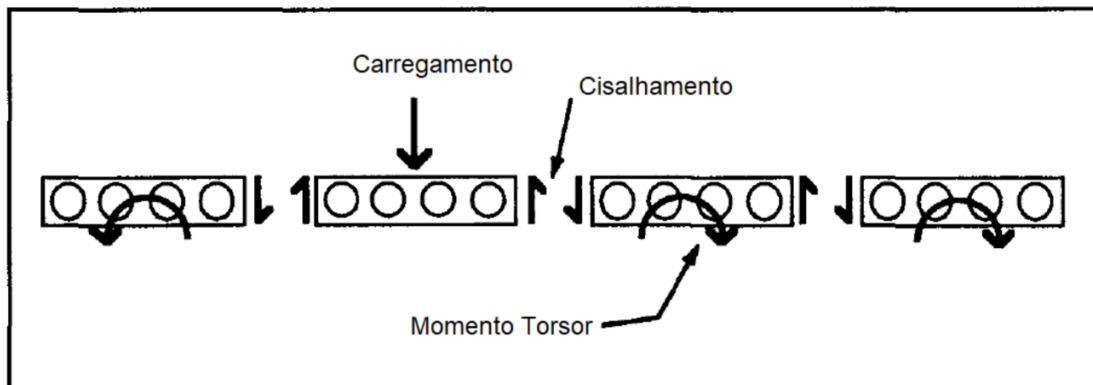
Outro importante fator responsável pela distribuição de cargas entre as lajes de um pavimento é a interação entre a rigidez à torção e a rigidez à flexão das lajes alveolares. Stanton (1992) mostra que momentos torçores são essenciais para a distribuição de cargas por todo o pavimento. Além da soma das tensões pelo momento torsor com as tensões de cisalhamento verticais poder ultrapassar o limite da resistência do concreto (Figura 38), a razão entre a torção de uma seção da laje e sua deformação vertical dita a reação em conjunto das lajes.

Simplificadamente, a fissuração de um elemento submetido por um carregamento concentrado diminui a sua rigidez à flexão de 5 a 10 vezes, porém a rigidez à torção também é diminuída, pois a laje não pode mais ser considerada como um tubo (Figura 39), apenas como uma placa submetida à torção em virtude do padrão de fissuração apresentado em ensaios. Considerando então a situação fissurada, a razão entre as rigidezes à torção e à flexão é diminuída. Com isso, o giro das seções transversais das lajes aumenta, diminuindo a deformação vertical por flexão das lajes adjacentes, diminuindo a capacidade de distribuição de cargas.

O PCI (2015) traz outros fatores que afetam a capacidade de um sistema de laje sem capa estrutural de distribuir cargas para lajes adjacentes. Enquanto a largura de pavimento de lajes fica mais estreita do que o comprimento do vão da laje, ocorre uma redução na quantidade de lajes que contribuem no suporte de cargas concentradas. Isso ocorre, pois a liberdade para giro e torção na região do apoio se mostra mais significativa. O segundo fator é o espaçamento entre as lajes: com lajes de larguras 0,6 a 2,4m, diferenças no comportamento de distribuição podem ser esperados.

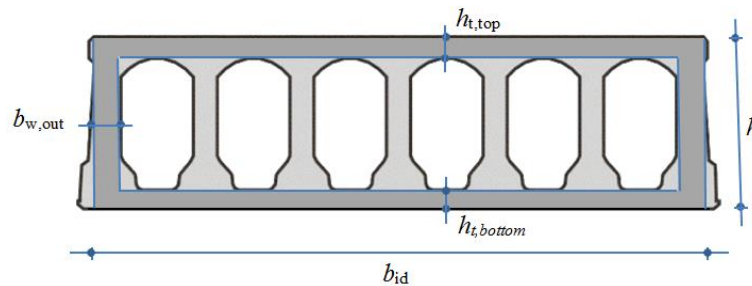
Como mostrado por Stanton (1992) e salientado pela FIB (2019), em situações nas quais o elemento de laje não fissa, o formato dos alvéolos não é um parâmetro influenciador para a distribuição de esforços, pois se entende que ao verificar a rigidez à torção, as lajes são consideradas como tubos fechados. Então o formato dos alvéolos apenas influencia na resistência ao cisalhamento vertical.

Figura 38: Superposição de efeitos de cisalhamento e torção



Fonte: Stanton (1992)

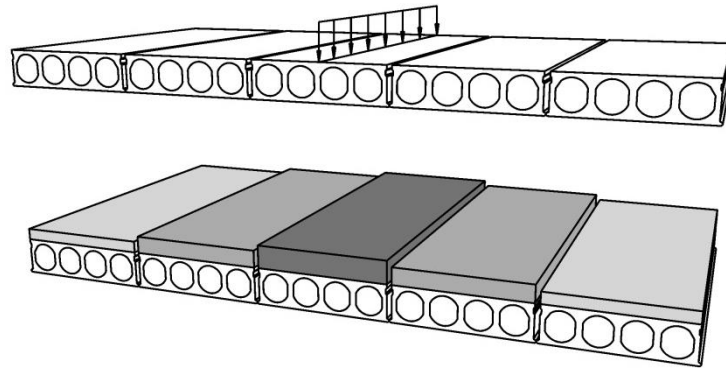
Figura 39: Consideração de seção como um tubo para a cálculo da torção



Fonte: FIB (2019)

A partir do conhecimento teórico obtido através de quantidade significativa de ensaios, fizeram-se métodos de distribuição de cargas (Figura 40) entre as lajes alveolares de pavimentos, sendo aqui descritos o método da FIB (2019) e o método do PCI (2015).

Figura 40: Distribuição de carga linear no meio do vão



Fonte: FIB (2019)

### 2.6.1 MÉTODO FIB (2019)

A FIB (2019) traz o método já utilizado na Europa a partir da norma BS:EN1168-2005 (2011). Tal método utiliza fatores de distribuição de cargas, apresentados por meio de gráficos, para encontrar o quanto de uma ação concentrada está atuando nas lajes de suporte a ela.

Os gráficos são praticamente independentes da espessura da laje alveolar e do formato de seus alvéolos, pois a distribuição de cargas é governada principalmente pela relação entre rigidez à torção e rigidez à flexão. Como sugestão, a FIB (2019) mostra que os gráficos devem ser utilizados para distribuir as forças de até 100 kN para cálculo do momento fletor nas lajes, mas não deve ser utilizado esse método para a força cortante, já que a ação pode estar próxima aos apoios.

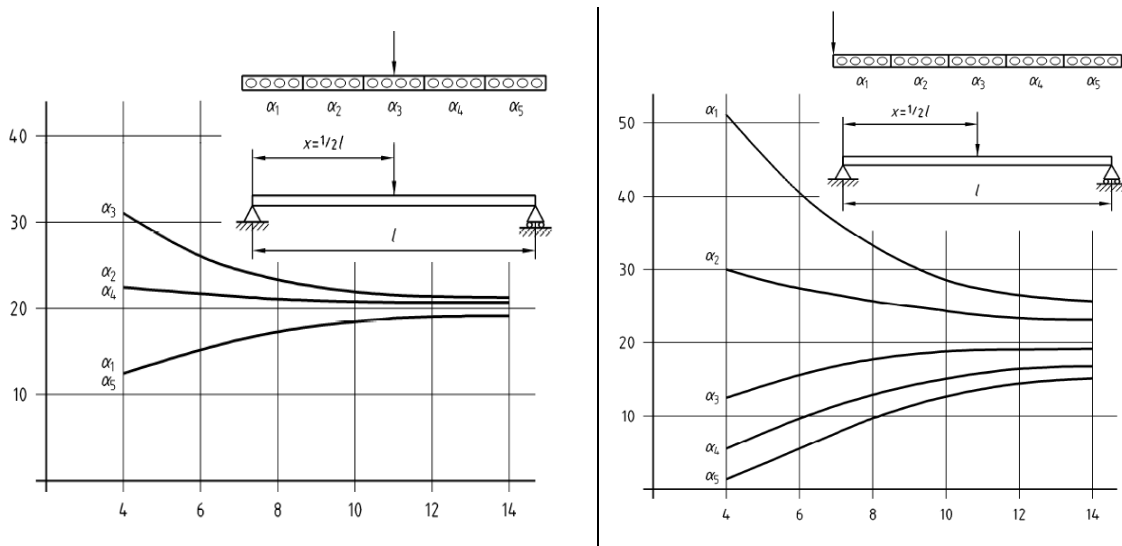
As regras para aplicação dos gráficos são:

- a) A Figura 41 mostra a porcentagem para uma carga central e lateral. A carga pode ser considerada como central se a distância dela até a borda das lajes for no mínimo 3 metros. Para cargas entre as bordas e a região central, a porcentagem de carregamento deve ser feita através de interpolação linear;



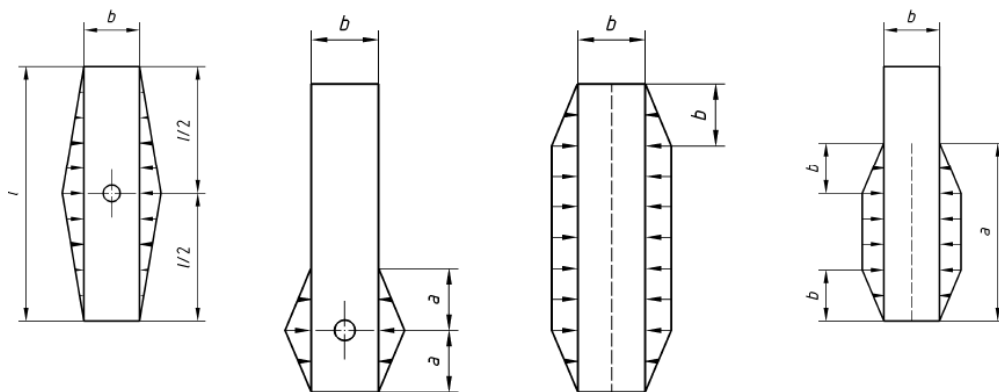
- b) A Figura 41 mostra a distribuição para cargas pontuais no meio do vão. Para cargas próximas aos apoios,  $l/x > 20$ , a porcentagem de carga da laje carregada deve ser 100% e das não carregadas, 0%. Para valores de  $l/x$  entre 2 e 20, as porcentagens de carregamento devem ser derivadas de interpolação linear;
- c) Cargas nas quais o comprimento for maior que metade do vão devem ser consideradas como cargas lineares. Quando o comprimento for menor que metade do vão, as cargas devem ser consideradas lineares se o centro da carga estiver no meio do vão, e pontuais se o centro de carga não estiver no meio do vão;
- d) No estado limite último, a porcentagem para pavimentos sem capeamento deve ser modificada como a seguir:
- A porcentagem da carga na laje diretamente carregada deve ser multiplicada por 1,25;
  - A porcentagem total das lajes não carregadas diretamente pode ser diminuída na mesma quantidade de acordo com a relação de porcentagem de carregamento;
- e) A tensão de cisalhamento nas juntas deve ser calculada para uma dada porcentagem de carregamento, e ser considerada como linearmente distribuída. Para cargas pontuais fora do meio do vão e cargas lineares que, de acordo com o item c), devem ser consideradas como pontuais, o comprimento efetivo de transmissão de força cortante das juntas é igual a duas vezes a distância do centro do carregamento até o apoio mais próximo (ver Figura 42);
- f) A porcentagem de carregamento (dados nos gráficos) possibilita calcular a força cortante longitudinal em todas as juntas e o momento torsor em todas as lajes;
- g) Onde a deformação lateral é limitada, a torção pode ser dividida pelo fator 2.

Figura 41: Fatores de distribuição de cargas lineares/pontuais no meio do vão (esquerda) e nas laterais (direita)



Fonte: FIB (2019)

Figura 42: Formato assumido das tensões de cisalhamento nas chavetas



Fonte: FIB (2019)

## 2.6.2 MÉTODO PCI (2015)

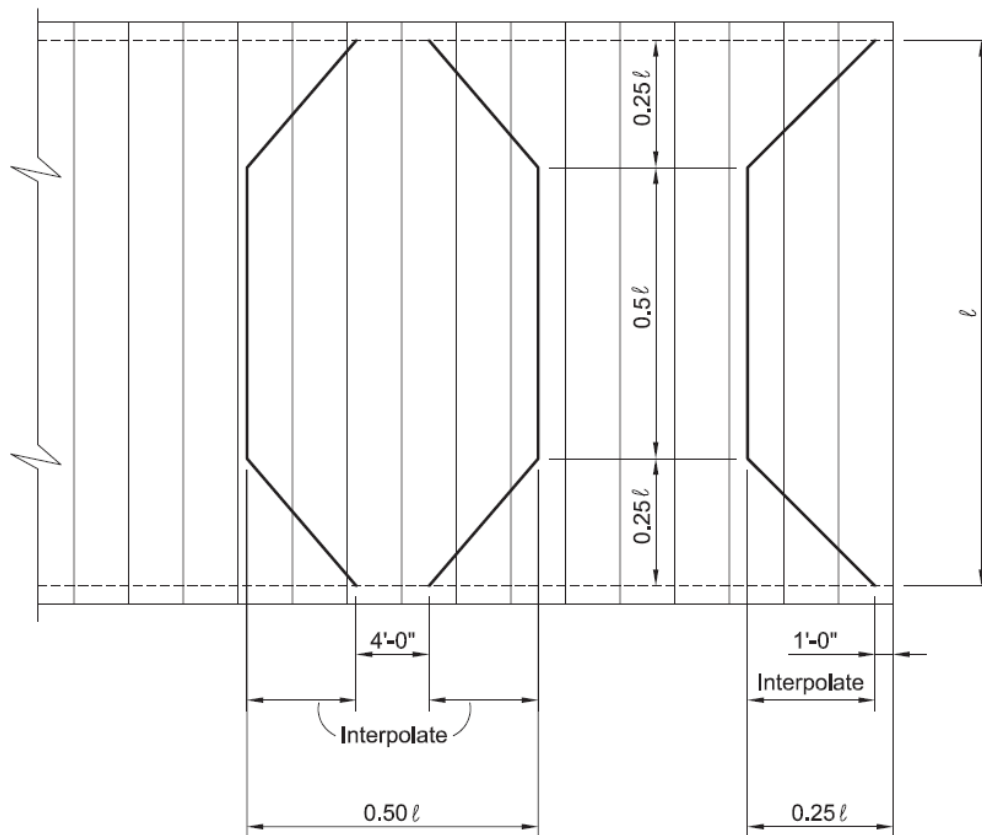
O PCI (2015) mostra, a partir da Figura 43, um método para estabelecer uma largura efetiva resistente para a distribuição entre lajes de qualquer tipo de carregamento baseado em métodos analíticos e ensaios. Nas regiões próximas ao meio do vão, a largura efetiva é definida como uma função do comprimento do vão. Nos apoios, a largura efetiva é definida como uma largura absoluta da laje. A largura no apoio é restrita por causa das tensões de cisalhamento referentes à torção. O uso dessas seções resistentes irá resultar na previsão de valores máximos de momento fletor e cisalhamento. Isto é, o conceito da largura efetiva é simplesmente um

mecanismo para determinar os momentos fletores e cisalhamentos máximos de projeto em vez de uma descrição de um atual caminho da carga através do sistema.

O desempenho de sistemas de lajes indica que forças cortantes e momentos fletores podem afetar mais lajes. Por exemplo, para uma carga localizada a alguma distância de uma borda livre, o momento máximo devido a essa carga pode ser previsto assumindo que a carga é resistida por uma largura igual a  $0,5 \cdot l$ . Na verdade, na flexão, uma largura total igual a 85% a 90% do comprimento do vão pode ter algum momento fletor atribuível para aquela carga. Na força cortante,  $0,3\text{m}$  ( $1'-0''$ ) da seção efetiva no apoio em uma borda livre pode ser usada para prever o pico de força cortante, mas, devido à torção, a reação total devido a uma carga pontual não irá se concentrar em  $0,3\text{m}$  ( $1'-0''$ ).

Várias limitações devem ser reconhecidas para a Figura 43:

Figura 43: Largura efetiva de lajes alveolares para resistir a ações concentradas em qualquer ponto de seu pavimento



Fonte: PCI (2015)

- a) À medida que a largura de um sistema se torna mais estreita do que o comprimento de vão, as larguras efetivas resistentes tornar-se-ão mais estreitas;
- b) Para relação vão por altura extremamente altos (aproximadamente 50), a seção efetiva na metade do vão pode ser reduzida em 10 a 20%;
- c) Para vãos inferiores à 3 m, a largura efetiva no apoio pode tornar-se menor;
- d) As concentrações locais de carregamento podem causar falhas por momento fletor transversal no sistema. Também podem ocorrer falhas de cisalhamento por punção. A magnitude das cargas concentradas deve ser limitada para impedir tais falhas. Estes limites são mais bem estabelecidos por teste para cada sistema de laje.

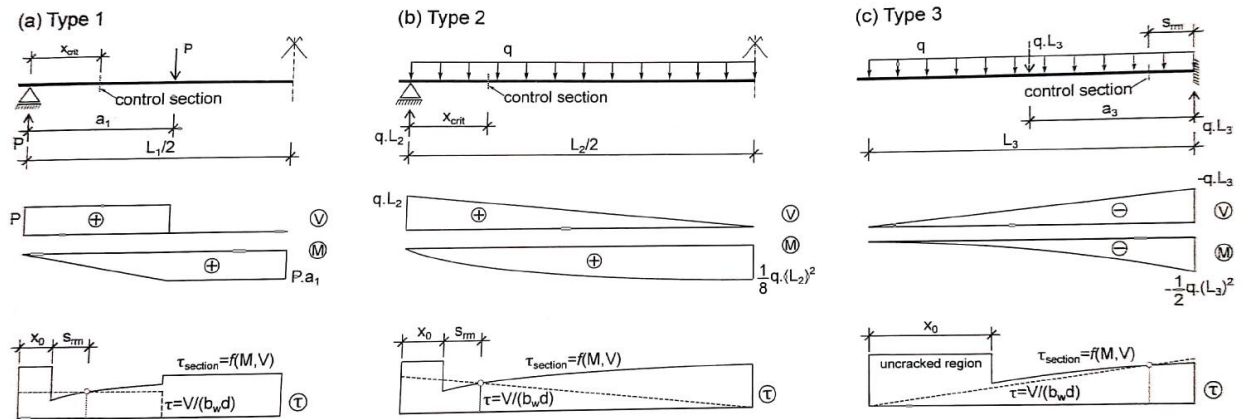
## 2.7 INTERAÇÃO ENTRE MOMENTO E CORTANTE

O comportamento de vigas de concreto armado sem estribos não é resolvido apenas estudando uma única seção transversal. As condições de contorno e de carregamento causam um padrão de fissuração por flexão que afetam a formação da fissura de cisalhamento crítica e, com isso, modificam a resistência ao cisalhamento do elemento (Pérez et al., 2012).

Considerando o efeito da flexão, Tue e Tung (2016) mostram que a resistência ao cisalhamento de uma viga de concreto armado sem estribos é influenciada pela combinação de momento fletor e força cortante no vão de cisalhamento. Sob diversos tipos de apoios e condições de carregamento, vãos de cisalhamento simples podem ser classificados em três tipos, em relação à combinação de momento fletor e força cortante, sendo eles:

- Tipo 1: Vão de cisalhamento com força cortante constante;
- Tipo 2: Vão de cisalhamento com inversão dos diagramas de força cortante e momento fletor;
- Tipo 3: Vãos de cisalhamento com coincidência entre os diagramas de momento fletor e força cortante.

Figura 44: Tipos de vão de cisalhamento



Fonte: Adaptado de Tue e Tung (2016)

De acordo com o texto preliminar do manual da FIB de lajes alveolares (2019), deve-se dimensionar as lajes considerando a interação entre força cortante e momento fletor de duas maneiras. A primeira maneira é começar da análise aproximada e a segunda maneira é de acordo com a análise detalhada.

O texto da FIB (2019) mostra que para a verificação baseada na análise aproximada, deve-se fazer apenas a verificação da resistência à força (seguindo os modelos de flexo-cortante e tração diagonal) e da resistência ao momento fletor, na região onde a armadura de protensão está completamente ancorada.

Já para a análise detalhada, a resistência à força cortante e momento fletor deve ser checada em todos os pontos críticos na região fissurada por flexão, para o esforço de cálculo no Estado Limite Último. Nesse ponto  $x$  específico, é necessário aumentar o esforço de momento fletor em razão da fissura inclinada de flexão. Esse aumento pode ser calculado utilizando a força cortante solicitante de cálculo  $V_{d(x)}$  e o momento fletor  $M_{d(x)}$  com base na Equação 63.

$$M_{di(x)} = M_{d(x)} + 1,35 \cdot V_{d(x)} \leq M_{E,d} \cdot (l_{ef}/2) \quad \text{Equação 63}$$

Sendo:

- $M_{E,d}$ : Momento fletor máximo graças à ação vertical;
- $l_{ef}$ : Comprimento efetivo da laje alveolar.

Também é citado na FIB (2019) que no local onde o momento fletor e a força cortante são analisados simultaneamente, não se pode considerar as respectivas capacidades máximas resistentes. Para cada posição na região fissurada por flexão, a combinação dos dois esforços deve ser calculada obedecendo a seguinte fórmula de interação.

$$\eta_{MV} = \left( \left( \frac{V_{Ed(x)}}{V_{Rd,c,fl}} \right)^4 + \left( \frac{M_{Ed(x)}}{M_{Rd}} \right)^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{Equação 64}$$

Sendo:

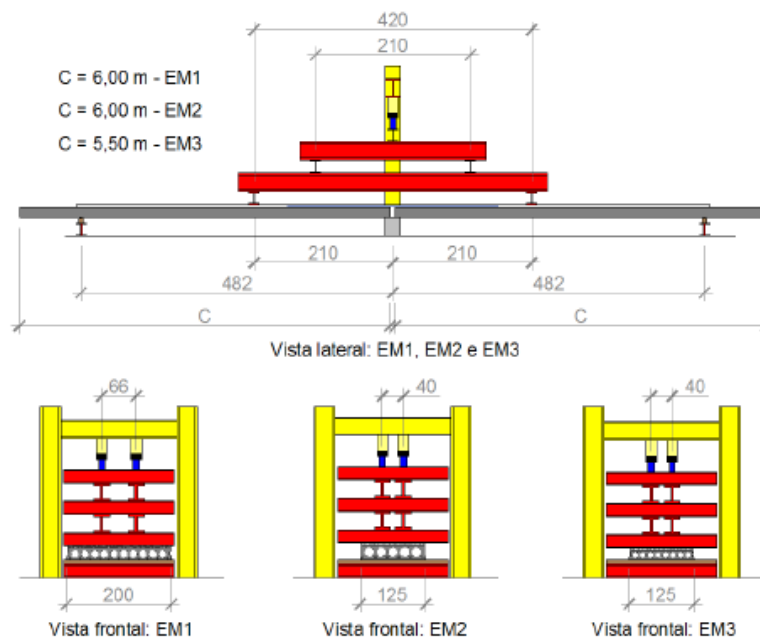
- $V_{Ed(x)}$ : Força cortante máxima à ação vertical na seção estudada;
- $M_{Ed(x)}$ : Momento fletor máximo por motivo da ação vertical na seção estudada;
- $V_{Rd,c,fl}$ : Força cortante resistente máxima baseando-se no modelo flexo-cortante;
- $M_{Rd}$ : Momento fletor resistente máximo;
- $\eta_{MV}$ : Fator de interação, não podendo ser maior que 1.

# 3. MODELO E MÉTODOS DE ENSAIO

Para nortear a realização dos ensaios deste trabalho, foram estudados os modelos de Santos (2014), a EN1168:2005, a ABNT NBR 14861:2022 e a FIP (1982). No trabalho de Santos (2014), foram utilizadas três tipologias de lajes alveolares. O primeiro tipo era de laje alveolar com 210 mm de altura, o qual teve sua continuidade iniciada pela concretagem de uma capa estrutural armada com 50 mm de espessura sobre a face superior do elemento pré-fabricado. O segundo tipo de laje alveolar tinha 265 mm de altura, também tendo sua continuidade obtida por concretagem de capa estrutural armada. Por último, foram ensaiadas lajes com 160 mm de altura e com continuidade a partir da capa de concreto.

As lajes alveolares contínuas ensaiadas por Santos (2014) foram submetidas a cargas lineares transversais aos seus comprimentos, a uma distância de 2100 mm do apoio central, como mostra a Figura 45.

Figura 45: Esquema de ensaios de continuidade (vista lateral e frontal)



Fonte: Santos (2014)

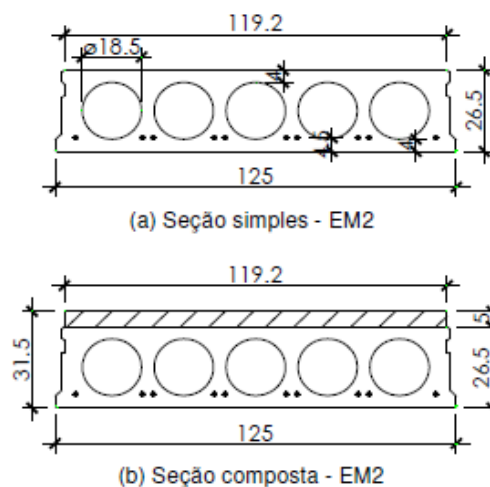
Dos três ensaios realizados, o modelo 2 (com laje alveolar com 265 mm de altura mais capa de 50 mm) é o que mais se aproxima aos ensaios realizados neste trabalho, tendo como diferença a distância entre o centro do apoio da laje até o ponto de aplicação da carga próximo a  $5.h$  ( $6,6.h$ ). Como visto, até essa distância, o modo de ruptura da laje se dá por interação entre cisalhamento e flexão (FIP, 1982). Nesse ensaio, também se alcançou a ruptura da seção composta partindo do descolamento da capa estrutural da laje alveolar. Com isso, o modelo 2 de Santos foi utilizado como parâmetro para balizar o método de ensaio deste estudo.

Neste estudo, então, foram realizados ensaios de resistência ao cisalhamento em lajes alveolares sem capa, com capa e com capa e continuidade, seguindo os parâmetros descritos neste capítulo.

### 3.1 ENSAIO DE LAJES ALVEOLARES COM CONTINUIDADE DE SANTOS (2014)

No ensaio intitulado EM2, realizado por Santos (2014), foram utilizadas lajes alveolares pré-fabricadas com 265 mm de altura (Figura 46). Para realizar a continuidade entre duas lajes, foi feita uma capa de concreto estrutural de 50 mm de altura, com 11 barras de 12,5mm de diâmetro.

Figura 46: Esquema de ensaios de continuidade (vista da seção sem capa e com capa)



Fonte: Santos (2014)

Fundamentando-se nos ensaios realizados, nas medições dos elementos, foi possível saber quais são as características dos materiais e colocá-los na Tabela 4.



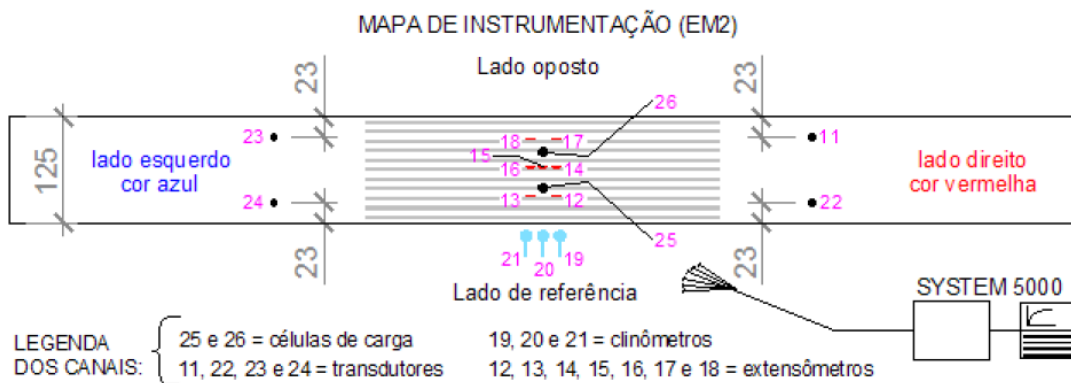
Tabela 4: Características da seção transversal da laje ensaiada

Significado	Variável	EM02	
		Simples	Composta
Armadura de protensão (cm <sup>2</sup> )	A <sub>p</sub> (cm <sup>2</sup> )	9,9	9,9
Distância da armadura de protensão à fibra inferior	d' (cm)	0,045	0,045
Área da seção de concreto	A <sub>c</sub> (m <sup>2</sup> )	0,1866	0,2462
Momento de Inércia	I (m <sup>4</sup> )	0,0016	0,0027
Momento estático	S (m <sup>3</sup> )	0,0079	0,0125
Distância da fibra superior ao CG da seção	y <sub>s</sub> (m)	0,1337	0,1453
Distância da fibra inferior ao CG da seção	y <sub>i</sub> (m)	0,1313	0,1697
Módulo de flexão superior	W <sub>s</sub> (m <sup>3</sup> )	0,01197	0,0186
Módulo de flexão inferior	W <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	0,01219	0,01591
Excentricidade de protensão	e <sub>p</sub> (m)	0,0863	0,1247
Largura efetiva da laje alveolar	∑b <sub>w</sub> (cm)	28,3	28,3
Resistência à compressão da capa de concreto	F <sub>ck,capa</sub> (MPa)	-	30
Módulo de Elasticidade tangencial da capa de concreto	E <sub>ci,capa</sub> (MPa)	-	30672,463
Resistência à compressão da laje alveolar	F <sub>ck,laje</sub> (MPa)	40	40
Módulo de Elasticidade tangencial da laje alveolar	E <sub>ci,laje</sub> (MPa)	35417,5	35417,5
Tensão de escoamento em armadura passiva	f <sub>yk</sub> (MPa)	-	500
Módulo de elasticidade em armadura passiva	E <sub>s</sub> (MPa)	-	2100000
deformação de cálculo no início do escoamento	ε <sub>yd</sub> (MPa)	-	0,000207
Tensão tração máxima em armaduras ativas	f <sub>ptk</sub> (MPa)	1900	1900
Tensão de escoamento em armaduras ativas	f <sub>pyk</sub> (MPa)	1710	1710
Módulo de elasticidade em armadura ativa	E <sub>p</sub> (MPa)	205000	205000
Quantidade e diâmetro de armadura ativa	Armadura inferior prot.	10Ø12,7	10Ø12,7
Força de protensão inicial	N <sub>pi</sub> (kN)	124,5	124,5
Força de protensão após perdas	N <sub>po</sub> (kN)	86,66	86,66'

Fonte: Santos (2014)

As lajes foram instrumentadas com quatro transdutores para verificação do deslocamento vertical no meio do vão, três clinômetros para verificação da rotação das lajes alveolares no lado engastado e no apoio central, seis extensômetros para verificação da tensão na armadura negativa passiva e das células de carga para verificação da ação colocada no sistema. Todos esses equipamentos foram conectados ao sistema de aquisição de dados *System 5000* (Figura 47). Observa-se que, no ensaio, não foi utilizado nenhum sistema de verificação de deslocamentos diferenciais entre a capa e a laje.

Figura 47: Mapa de instrumentação para ensaio.



Fonte: Santos (2014)

No ensaio, foram aplicadas forças ao mesmo tempo nas duas lajes alveolares que formavam o pavimento contínuo. As lajes apresentaram comportamento semelhante durante todo o processo até a falha do sistema.

Primeiramente, iniciou-se, na capa estrutural, a formação de fissura com uma carga de 26 kN, sendo verificada pequena modificação no comportamento das lajes. Com a continuidade do ensaio, a força aplicada nas lajes contínuas levou o sistema à ruptura por escorregamento da capa em relação à laje. A carga de ensaio na qual ocorreu o escorregamento foi de 254,7 kN (85,6% da carga de ruptura).

Mesmo com a falha na interface, continuou-se a aplicar carga nas lajes, até que a laje do lado esquerdo do ensaio (vide Figura 49) rompeu por cisalhamento. Esse rompimento ocorreu sem a presença de fissuras de flexão, a uma carga de 297,3 kN e com a presença de uma única fissura inclinada (entre 30 e 60°). Pôde-se deduzir que foi partindo-se do modelo de tração-diagonal que houve a falha.

Figura 48: Visão do modelo ensaiado.



Fonte: Santos (2014)

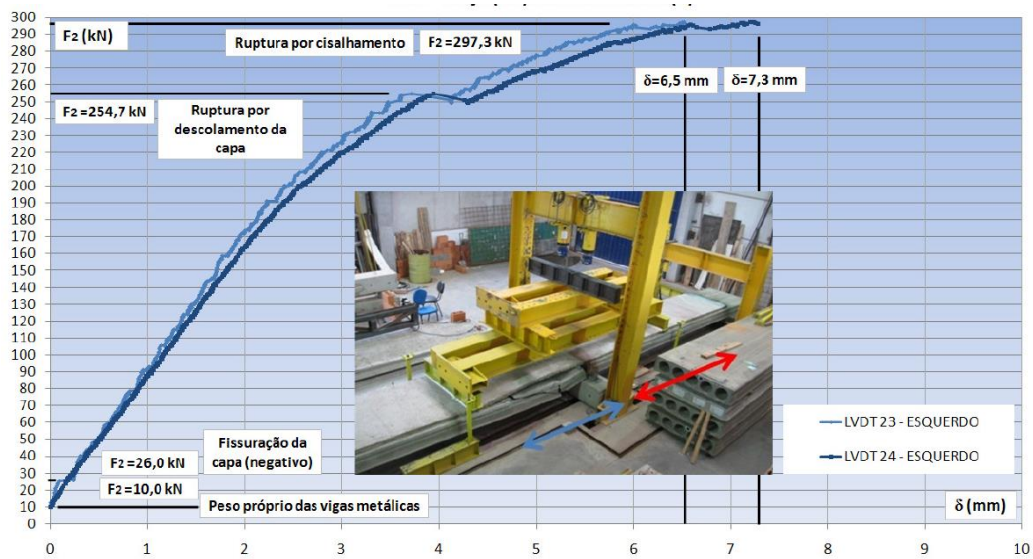
Figura 49: Vista da lateral que sofreu ruptura



Fonte: Santos (2014)

Considerando que o conjunto esgotou sua capacidade resistente ao ocorrer o escorregamento da capa de concreto, fez-se então a verificação de todos os esforços solicitantes existentes na laje no instante da ruptura. É necessário salientar que não houve esforços de torção nas lajes, pois a leitura dos transdutores mostrou que o deslocamento vertical foi semelhante em ambas as bordas da laje (Figura 50).

Figura 50: Deslocamento vertical das lajes no ensaio do lado esquerdo



Fonte: Santos (2014)

Para a verificação, será somado o peso do sistema de vigas de transferência à carga de ensaio (10 kN a mais). Também será levado em consideração o peso próprio da laje.

### 3.1.1 ESFORÇOS SOLICITANTES NAS LAJES ALVEOLARES CONTÍNUAS

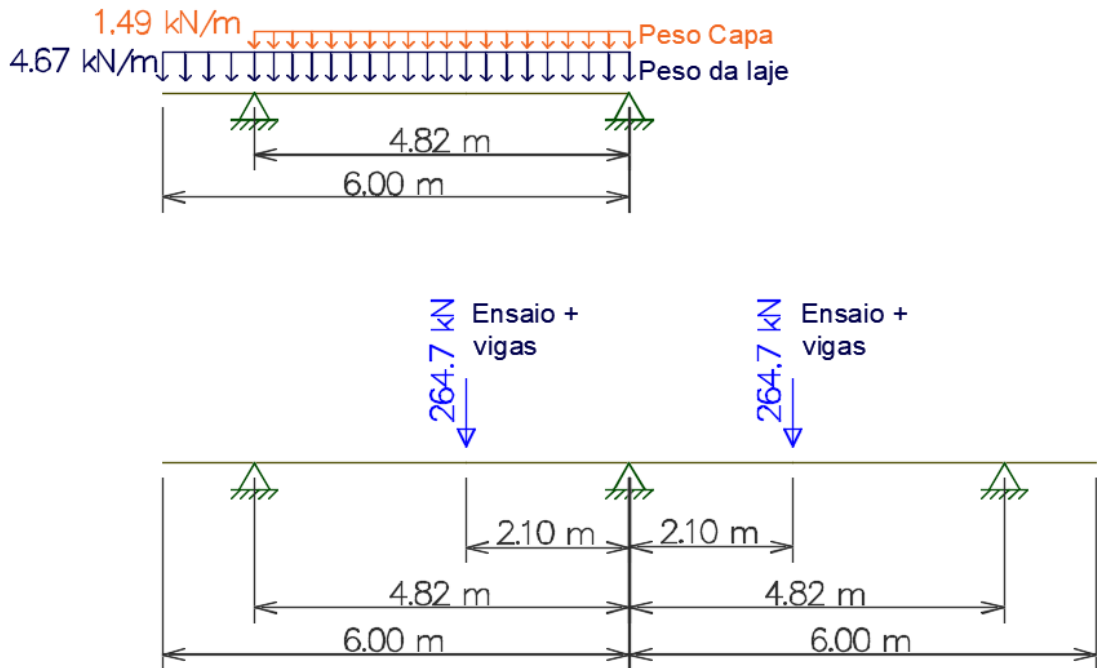
Conhecendo a carga última de ensaio, o peso do sistema de vigas de transferência, o peso da laje e da capa, são encontrados os esforços solicitantes em todo o comprimento da laje alveolar (Figura 51).

No caso de lajes alveolares contínuas, esses esforços devem ser verificados em duas etapas, sendo a primeira etapa com a laje alveolar ainda biapoiada e com a capa de concreto ainda sem resistência. A segunda etapa considera a ligação negativa entre as lajes alveolares, fazendo com que a distribuição de esforços dependa da continuidade do sistema. Sendo assim, são mostrados os diagramas teóricos de momento fletor redistribuído e força cortante em ambas as etapas nas Figura 52 e 53. Para a produção desses diagramas, as forças utilizadas foram:

- Peso próprio laje:  $25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,1866 \text{ m}^2 = 4,67 \text{ kN/m}$
- Peso próprio capa:  $25 \text{ kN/m}^3 \cdot 0,05 \text{ m} \cdot 1,192 \text{ m} = 1,49 \text{ kN/m}$

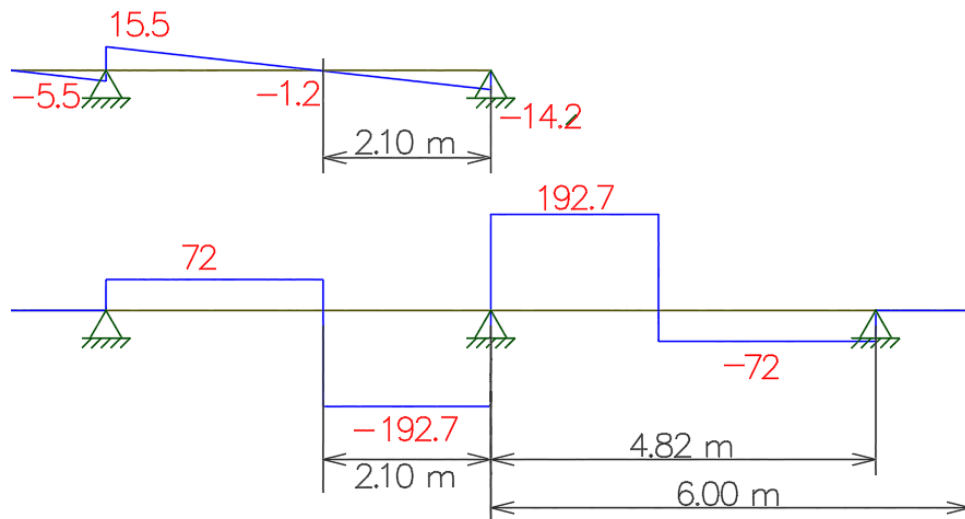
- Carga concentrada:  $10 \text{ kN (vigas)} + 254,7 \text{ kN (ensaio)} = 264,7 \text{ kN}$

Figura 51: Ações na laje durante o ensaio



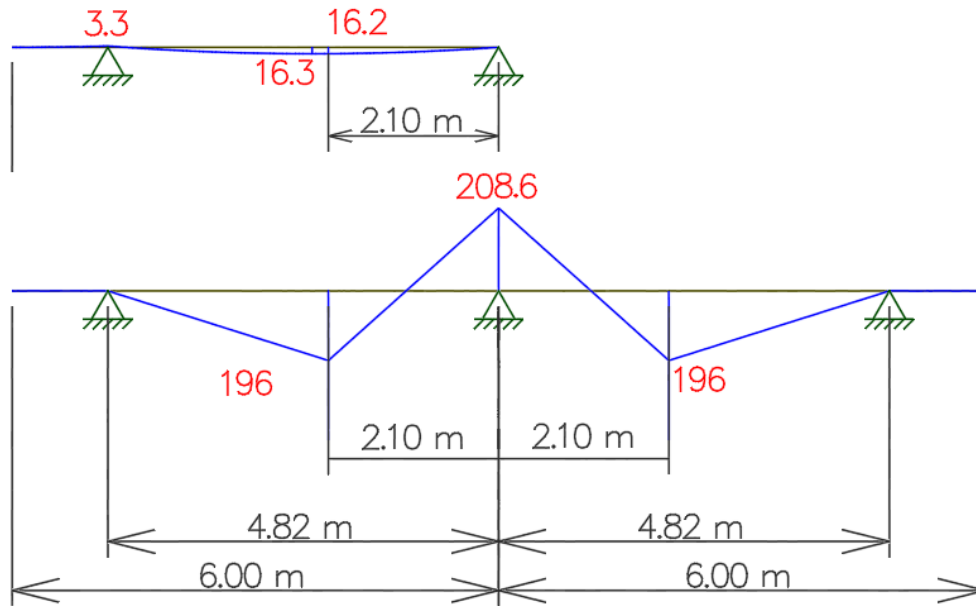
Fonte: Próprio autor (2020)

Figura 52: Diagrama de força cortante no instante da ruptura por escorregamento da capa



Fonte: Próprio autor (2020)

Figura 53: Diagrama de momento fletor no instante da ruptura por escorregamento da capa



Fonte: Próprio autor (2020)

A partir dos diagramas teóricos, tem-se que:

- Na região do apoio, há o maior momento fletor negativo (considerando a redistribuição após fissuração), com intensidade de 208,6 kNm, e força cortante igual a 206,9 kN;
- No ponto de aplicação da carga, há a presença de momento fletor com 212,2 kNm de intensidade e força cortante de 193,9 kN;
- De acordo com a Equação 45 da revisão bibliográfica (FIP, 1998), a tensão entre a capa e a laje na região de apoio é:

$$\tau(y) = \frac{206,9 \text{ kN}}{1,192 \text{ m} \cdot 35417500 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,0027} \cdot (0,29 \text{ m} - 0,1697 \text{ m}) \cdot 30672463 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,192 \text{ m} \cdot 0,05 \text{ m}$$

$$\tau(y) = 399,17 \text{ kN/m}^2 = 0,399 \text{ MPa}$$

- De acordo com a Equação 45 da revisão bibliográfica (FIP, 1998), a tensão entre a capa e a laje na região abaixo da carga de ensaio:

$$\tau(y) = \frac{193,9 \text{ kN}}{1,192 \text{ m} \cdot 35417500 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,0027} \cdot (0,29 \text{ m} - 0,1697 \text{ m}) \cdot 30667246 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,192 \text{ m} \cdot 0,05 \text{ m}$$

$$\tau(y) = 374,03 \text{ kN/m}^2 = 0,389 \text{ MPa}$$

Com os maiores valores dos esforços solicitantes na peça, é feita então a verificação da resistência teórica do elemento segundo as equações estudadas na revisão bibliográfica.

### 3.1.2 RESISTÊNCIA DAS LAJES ALVEOLARES

Para as lajes alveolares ensaiadas, os valores que devem ser obtidos para verificação da sua resistência são:

- Momento fletor resistente;
- Momento de fissuração;
- Resistência ao cisalhamento na interface;
- Resistência à força cortante (flexo-cortante ou tração-diagonal);
- Interação entre flexão e cisalhamento se a peça fissurar.

Sendo assim, são feitas tais verificações com suporte da literatura técnica.

### 3.1.3 MOMENTO FLETOR RESISTENTE

Como não é conhecida qual a verdadeira deformação na armadura, para se calcular o momento fletor resistente da seção transversal, deve-se, em primeiro lugar, estimar em qual domínio de deformação a seção com mais esforços está.

Considerando que a seção mais carregada está no domínio 2 de deformação, então  $\varepsilon_s = 0,01$ . Pode-se, então, encontrar a máxima tensão na armadura e assim verificar a resistência ao momento fletor.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_p + \varepsilon_7 + \varepsilon_s$$

Equação 65

Sendo:

- $\varepsilon_p = \frac{\sigma_{p\infty}}{E_p} = \frac{866,63}{200500} = 0,0043;$
- $\varepsilon_7 = \left[ \frac{N_p}{A_c} + \frac{M_p \cdot e_p}{I_c} \right] \cdot \frac{1}{E_c} = \left[ \frac{86,66 \cdot 9,9}{0,1866} + \frac{86,66 \cdot 9,9 \cdot 0,0863^2}{0,0016} \right] \cdot \frac{1}{0,9 \cdot 5600 \cdot \sqrt{40}} = 0,000242;$
- $\varepsilon_s = 0,01$

Logo:

$$\varepsilon_t = 0,01456$$

A tensão na armadura é calculada a partir da Equação 60.

$$\sigma_{pk} = f_{pyk} + (f_{ptk} - f_{pyk}) \cdot \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_{pyk}}{\varepsilon_{uk} - \varepsilon_{pyk}} \quad \text{Equação 66}$$

Na qual:

- $f_{pyk} = 1710 \text{ MPa} = 171 \text{ kN/cm}^2;$
- $f_{ptk} = 1900 \text{ MPa} = 190 \text{ kN/cm}^2;$
- $\varepsilon_{pyk} = \frac{f_{pyk}}{E_p} = \frac{1710}{200500} = 0,00853;$
- $\varepsilon_{uk} = 0,035.$

Portanto,

$$\sigma_{pk} = 171 + (190 - 171) \cdot \frac{0,01456 - 0,00853}{0,035 - 0,00853}$$

$$\sigma_{pk} = 174,33 \text{ kN/cm}^2$$

Pode-se encontrar a profundidade da linha neutra da seção considerando a igualdade entre a força de compressão e a força de tração ocorrida. Dessa forma:

$$F_p = F_c \quad \text{Equação 67}$$

$$A_p \cdot \sigma_{p\infty} = \lambda \cdot x \cdot \alpha_c \cdot f_{ck} \cdot b_w \quad \text{Equação 68}$$



$$9,9 \cdot 174,33 = 0,8 \cdot x \cdot 0,85 \cdot 30000 \cdot 1,192$$

$$x = 0,07 \text{ m}$$

Sendo a razão  $x/d$  menor que 0,259, a seção estará no domínio 2. Com  $d$  igual a 0,27m, tem-se que:

$$\frac{x}{d} = \frac{0,07}{0,27} = 0,259 \quad \text{Equação 69}$$

Logo, a premissa da seção estar no domínio 2 está correta. Assim, o momento resistente da seção pode ser calculado como:

$$M_{resist} = F_p \cdot z \quad \text{Equação 70}$$

$$M_{resist} = F_p \cdot \left( d - \frac{\lambda}{2} \cdot x \right) \quad \text{Equação 71}$$

$$M_{resist} = 9,9 \cdot 174,33 \cdot \left( 0,27 - \frac{0,8}{2} \cdot x \right)$$

$$M_{resist} = 429,9 \text{ kNm}$$

Os valores de  $\lambda$  e  $\alpha_c$  foram utilizados como 0,8 e 0,85, pois o concreto da laje e capa tem resistências menores que 50 MPa.

### 3.1.4 MOMENTO DE FISSURAÇÃO

Para cálculo do momento de fissuração, pode ser utilizada a equação 72, mostrada em Carvalho (2017):

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ctk,inf} \cdot I_c}{y_t} + \left( \frac{N_p \cdot I_c}{A \cdot y_t} + N_p \cdot e_p \right) \quad \text{Equação 72}$$

Para a verificação de fissuração na parte negativa, apenas a primeira parcela da equação é válida, pois a tensão de tração ocorre na capa de concreto armado. Desse modo, o momento de fissuração é:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ctk,inf} \cdot I_c}{y_t} \quad \text{Equação 73}$$

$$M_r = \frac{1,3 \cdot 0,21 \cdot \sqrt[3]{40^2} \cdot 0,0027}{0,1697}$$

$$M_r = 50,8 \text{ kNm}$$

Para cálculo do momento de fissuração decorrente de momentos fletores positivos, pode ser utilizada toda a equação dada por Carvalho (2017), ficando então:

$$M_r = \frac{1,3 \cdot 0,21 \cdot \sqrt[3]{40^2} \cdot 0,0027}{0,1697} + \left( \frac{86,66 \cdot 9,9 \cdot 0,0016}{0,1866 \cdot 0,1313} + 86,66 \cdot 9,9 \cdot 0,0863 \right)$$

$$M_r = 187,50 \text{ kNm}$$

De acordo com a verificação de momento de fissuração, a seção composta deveria fissurar na capa (na região do apoio), e não na distância de regularização (nesse caso é o comprimento  $l_{bpt}$ ) na laje devido ao momento fletor positivo. Sem a fissuração na parte inferior nessa região, é necessário verificar a resistência da laje à força cortante de acordo com o modelo de tração-diagonal. Esse resultado condiz com o que aconteceu no ensaio. Para ficar clara a diferença entre as resistências à força cortante, serão então calculados os dois métodos de verificação.

### 3.1.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NA INTERFACE

A resistência ao cisalhamento da interface pode ser calculada com a Equação 49, existente no Eurocode 2 (2004) e FIB (2019).

$$\tau_{Rki} = c \cdot f_{ctk,inf} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) < 0,5 \cdot v \cdot f_{ck}$$

Segundo a literatura, a superfície de lajes extrudadas pode ser considerada lisa, tendo o valor de  $c$  igual a 0,2. Como a tensão perpendicular  $\sigma_n$  não ocorre em todo o comprimento do elemento, ele será desconsiderado.

$$\tau_{Rki} = 0,2 \cdot 0,21 \cdot \sqrt[3]{30^2} < 0,5 \cdot \left( 0,6 \cdot \left( 1 - \frac{30}{250} \right) \right) \cdot 30$$

$$\tau_{Rki} = 0,4 \text{ MPa}$$

Com as prescrições do Model Code 10 (2010), a tensão resistente da interface é dada pela Equação 51. Considerando a face superior da laje como lisa,  $\tau_c$  tem valor entre 1,5 e 2,5. Utilizando o menor valor para  $\tau_c$ , tem-se que:

$$\tau_u = \tau_c + \mu \cdot (\rho \cdot k \cdot f_y + \sigma_n) + \alpha \cdot \rho \cdot \sqrt{f_y \cdot f_{cc}} \leq \beta_c \cdot v \cdot f_{cc}$$

$$\tau_u = 1,5 \text{ MPa}$$

Com essas verificações, é possível observar que segundo Eurocode 2 (2004) e FIB (2019), a tensão solicitante na interface é maior que a resistente na região do apoio central, o que ocasionará escorregamento (como visto no ensaio). Contudo, de acordo com o Model Code 10 (2010), esse escorregamento não aconteceria.

### 3.1.6 RESISTÊNCIA À FORÇA CORTANTE – FLEXO-CORTANTE

A resistência à força cortante da seção composta depende da ligação entre a capa de concreto e a laje. Como foi verificado com Eurocode 2 (2004) e FIB (2019), e ratificado em ensaio, que haveria o escorregamento da capa em relação à laje, é feito o cálculo de resistência à força cortante para a seção simples (pré-fabricada) e para a seção composta. De acordo com o modelo de flexo-cortante descrito na ABNT NBR 6118 e na ABNT NBR 14861, a resistência à força cortante é dada por:

$$V_{Rk,fl} = 0,25 \cdot f_{ctk,inf} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho) \cdot \sum b_w \cdot d + 0,15 \cdot \sigma_{cp,1} \cdot \sum b_w \cdot d$$

Sendo:

- $f_{ctk,inf} = 0,21 \cdot \sqrt[3]{fck^2}$ ;
- $k = 1,6 - d$ , com  $d$  em metros;
- $\rho = \frac{A_p}{\sum b_w \cdot d}$ ;
- $\sum b_w$ : somatória de todas as larguras das nervuras da laje alveolar;
- $d$ : Altura útil da seção (simples ou composta);
- $\sigma_{cp,1} = \frac{N_{p\infty}}{A}$ ;
- $N_{p\infty}$ : Força de protensão no tempo infinito;
- $A$ : Área da seção transversal da laje alveolar apenas.

Para a laje com seção simples, a resistência à força cortante é:

$$V_{Rk,fl} = 0,25 \cdot 0,21 \cdot \sqrt[3]{40^2} \cdot 1000 \cdot (1,6 - 0,22) \cdot \left(1,2 + 40 \cdot \frac{9,9}{28,3 \cdot 27}\right) \cdot 0,283 \cdot 0,22 \\ + 0,15 \cdot \frac{86,66 \cdot 9,9}{0,1866} \cdot 0,283 \cdot 0,22$$

$$V_{Rk1} = 139,8 \text{ kN}$$

Para a laje com seção composta, a resistência à força cortante é:

$$V_{Rk,fl} = 0,25 \cdot 0,21 \cdot \sqrt[3]{40^2} \cdot 1000 \cdot (1,6 - 0,27) \cdot \left(1,2 + 40 \cdot \frac{9,9}{28,3 \cdot 27}\right) \cdot 0,283 \cdot 0,27 \\ + 0,15 \cdot \frac{86,66 \cdot 9,9}{0,1866} \cdot 0,283 \cdot 0,27$$

$$V_{Rk1} = 159,9 \text{ kN}$$

É visto que a força cortante no ensaio foi maior do que a resistência verificada a partir do modelo de flexo-cortante. Entretanto, houve a ruptura na laje para uma força cortante solicitante maior, devendo ser investigada utilizando o modelo de tração diagonal.

### 3.1.7 RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE – TRAÇÃO DIAGONAL

De acordo com a ABNT NBR 14861 (2022), a resistência de lajes alveolares com capa pode ser verificada com a equação 44. Sendo assim, a resistência da laje com capa considerando os valores característicos é representada pela equação:

$$V_{Rk,cc} = V_{Rk,c} \cdot \frac{S \cdot I'}{S' \cdot I} + V_{Sk,(g1+g2)} \cdot \left(1 - \frac{S \cdot I'}{S' \cdot I}\right)$$

Sendo:

- $V_{Sk,(g1+g2)} = 2,9 \text{ kN}$ ;
- $S = 0,0079 \text{ m}^3$ ;
- $I = 0,0016 \text{ m}^4$ ;
- $S' = 0,0125 \text{ m}^3$ ;
- $I' = 0,0027 \text{ m}^4$ ;
- $b_w = 0,283 \text{ m}$ ;
- $f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot 40^{\frac{2}{3}} = 2,45 \text{ MPa} = 0,245 \text{ kN/cm}^2$ ;
- $\sigma_{cp} = \frac{86,66 \cdot 9,9}{0,1866} = 4,6 \text{ MPa} = 0,459 \text{ kN/cm}^2$ ;
- $\alpha_{pc} = \frac{l_x}{l_{pt2}}$ ;
- $l_x$ : Distância entre o ponto crítico e o apoio da laje;
- $l_{pt2}$ : Distância superior de transferência de cordoalhas de protensão.

O valor  $l_x$  é a distância entre o ponto crítico da laje e o final de seu apoio, encontrado a partir da Equação 39 (Figura 25). O ponto crítico é dado pela intersecção da seção crítica (seção onde é provável a ocorrência da ruptura da nervura) com a linha inclinada em aproximadamente  $35^\circ$  com a horizontal, que sai da face externa do apoio da laje.

Considerando que o apoio da laje segue o preconizado pela norma ABNT NBR 14861:2022,  $l_a$  será considerado com 13 cm. Já  $x_{pc}$  é igual à altura da seção crítica em relação à face inferior dividida pela tangente de  $35^\circ$  (0,7). Sendo a altura igual a 13,25 cm, tem-se que  $x_{pc}$  é igual a:

$$l_x = 13 + \frac{13,25}{0,7}$$

$$l_x = 32 \text{ cm}$$

Já o comprimento  $l_{pt2}$  pode ser calculado a utilizar da ABNT NBR 14861 (2022), considerando o  $f_{ck}$  da liberação da protensão igual a 25 MPa, liberação da protensão gradual, tensão logo após a liberação da protensão igual a 1137,6 MPa e região com boa aderência, como as Equações 15, 18 e 20, com valores característicos:

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctk,inf}$$

$$f_{bpt} = 3,2 \cdot 1 \cdot 0,21 \cdot \sqrt[3]{25^2}$$

$$f_{bpt} = 5,74 \text{ MPa}$$

$$l_{bpt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \phi \cdot \sigma_{p0} / f_{bpt}$$

$$l_{bpt} = 1,0 \cdot 0,19 \cdot 1,25 \cdot 1137,6 / 5,74$$

$$l_{bpt} = 47,0 \text{ cm}$$

$$l_{pt2} = 1,2 \cdot l_{bpt}$$

$$l_{pt2} = 1,2 \cdot 47$$

$$l_{pt2} = 56,4 \text{ cm (45}\phi\text{)}$$

Com isso, chega-se que  $\alpha_{pc}$  é:

$$\alpha_{pc} = \frac{l_x}{l_{pt2}}$$

$$\alpha_{pc} = \frac{32}{56,4}$$

$$\alpha_{pc} = 0,56$$

A resistência da laje sem capa pode ser encontrada a partir da equação 40, considerando os valores característicos.

$$V_{Rkc} = 0,95 \cdot \frac{I \cdot b_w}{S_c} \cdot \sqrt{f_{ctk,inf}^2 + \alpha_{pc} \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctk,inf}}$$

$$V_{Rkt} = 0,95 \cdot \frac{0,0016 \cdot 0,283}{0,0079} \cdot \sqrt{2,45^2 + 0,56 \cdot 4,6 \cdot 2,45 \cdot 1000} = 191,1 \text{ kN}$$

Sendo assim, a resistência da laje com capa é:

$$V_{Rk,cc} = 191,1 \cdot \frac{0,0079 \cdot 0,0027}{0,0125 \cdot 0,0016} + 2,9 \cdot \left(1 - \frac{0,0079 \cdot 0,0027}{0,0125 \cdot 0,0016}\right)$$

$$V_{Rk,cc} = 203,6 \text{ kN} < 206,9 \text{ kN (ruptura)}$$

### 3.1.8 INTERAÇÃO ENTRE FLEXÃO E CISALHAMENTO

Como não houve fissuração da laje alveolar na região de transferência de protensão, não há necessidade de verificação da interação entre flexão e cisalhamento.

Com os resultados do ensaio feito por Santos (2014) e com a verificação teórica da resistência das lajes compostas, é possível observar que há coerência entre essas informações, contudo a lacunas a serem respondidas. Sendo assim, hipóteses de comportamento dos mecanismos de resistência são formuladas

- Há a influência da carga concentrada na resistência da interface entre laje e a capa devido a possível modificação na deformação do sistema;
- O mecanismo de tração diagonal pode ser alcançado também quando a laje for carregada com ações concentradas;

- Lajes alveolares com continuidade podem alcançar o mecanismo de tração diagonal;
- O trabalho em conjunto de lajes alveolares adjacentes melhoram o comportamento resistente das lajes.

Sendo assim, propõe-se a realização de ensaios, seguindo modelos dados pela bibliografia técnica para as lajes biapoiadas e aprimorando o ensaio de lajes contínuas submetidas a cargas pontuais.

Para realização dos ensaios, serão seguidos os dispostos nos itens 3.2, 3.3 e 3.4.

### **3.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM LAJES ALVEOLARES SEM CAPA**

De acordo com a ABNT NBR 14861:2022 o ensaio ao cisalhamento de lajes alveolares deve ser realizado a partir da prescrição de seu item 7.4.4.3. Este ensaio padronizado foi desenvolvido pois, como a laje depende da resistência tração do concreto, e este é um valor difícil de ser determinado devido o processo de execução das lajes alveolares, é necessária outra maneira de se verificar a resistência das lajes (Catoia, 2011).

Para esses ensaios, devem ser utilizadas pelo menos três lajes com sua largura real de produção e comprimento mínimo 6000 mm. As lajes devem apresentar a mesma tensão de protensão e ter concreto com idade de pelo menos 28 dias. A temperatura do ensaio deve estar entre 0 e 40°C.

A resistência do concreto à compressão das lajes pode ser aferida de duas maneiras: uma direta e outra indireta. A maneira direta é fazendo a retirada de testemunhos de um elemento de laje alveolar curado em mesma condição dos que as lajes que serão ensaiadas. Devem ser retirados pelo menos três testemunhos, e a resistência do concreto será a média do ensaio a compressão desses corpos de prova.

A segunda maneira e a mais utilizada é com o molde de corpos de provas cilíndricos com o concreto utilizado para produção das lajes. Nesse método, deve ser levada em consideração a maneira em que o corpo de prova será moldado, pois a energia de compactação do concreto de laje alveolar moldada pode ser diferente da

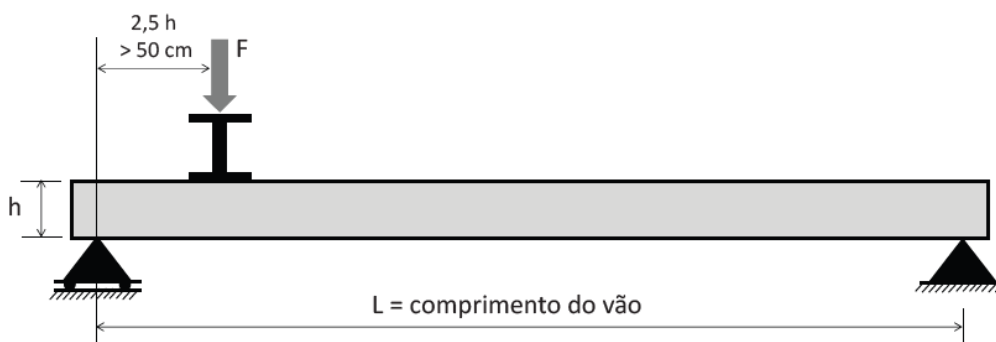


normatizada para corpos de prova. Neste trabalho, foi utilizado o método de molde de corpos de prova da empresa Marka Soluções Pré-Fabricadas, que é adensar o concreto do corpo de prova sobre o equipamento de produção das lajes, pois a vibração causada pela operação da máquina ocasionará esse adensamento. Devem ser feitos também três corpos de prova, mantendo-os na mesma situação de cura das lajes, sendo a resistência à compressão a média desses.

Para o ensaio das lajes, a força aplicada deve se distanciar do apoio mais próximo em pelo menos  $2,5h$  (sendo  $h$  a altura total da seção transversal), mas não menos que 600 mm (com tolerância de  $\pm 25$  mm), como mostrado na Figura 54. Deve ser verificado em qual extremidade será aplicada a força de ensaio, de acordo com a ABNT NBR 14861:2022, pois o apoio mais próximo deve ser feito utilizando um rolete. A utilização desse tipo de apoio ocorre para evitar que forças axiais decorrentes da restrição de rotação aconteçam. Entre o elemento ensaiado e a viga de apoio, deve ser utilizado material para homogeneização das tensões, como argamassa, Neoprene ou gesso. Esses materiais são utilizados para compensar o desnivelamento das faces do apoio e da laje e possíveis curvaturas transversais, e com isso, uniformizar a distribuição de tensão por toda a largura da laje.

Entretanto, o ensaio realizado utilizou a recomendação apresentada pela ABNT:NBR14861, que é usar como comprimento de apoio o valor de metade da altura da laje alveolar simples diretamente sobre o suporte de concreto. Foi feita essa escolha para representar uma situação de apoio corrente nas obras pré-fabricadas.

Figura 54: Arranjos para ensaio de lajes ao cisalhamento



Fonte: ABNT NBR 14861 (2022)

Para o ensaio, foi considerado o carregamento monotônico incremental com uma taxa de 50 kN por minuto, sendo a força aplicada sobre uma rótula posicionada entre a viga de transferência e o atuador (Figura 55).

Os resultados obtidos dos ensaios devem ser comparados com os valores teóricos dados partindo dos modelos de ruptura ao cisalhamento da laje. Com os resultados, pode-se estimar características como resistência à tração do concreto, tensão de protensão, entre outros.

Para esse ensaio a distância entre o centro do apoio da laje sem capa e o centro do atuador hidráulico é de 650mm (2,47h), com o intuito de apenas verificar o mecanismo de resistência à força cortante.

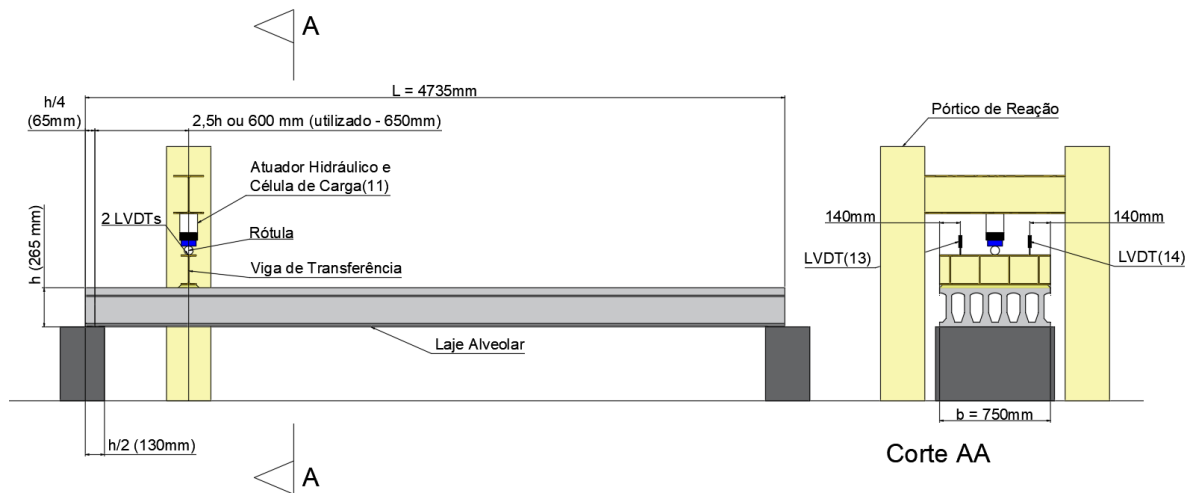
Figura 55: Arranjos para ensaio de lajes ao cisalhamento



Fonte: Próprio autor

Para este trabalho, no ensaio de resistência ao cisalhamento de lajes sem capa, foram utilizados atuador hidráulico, equipamentos de medição de intensidade de força aplicada (célula de carga) e transdutores na vertical (medição de deslocamentos lineares verticais- LVDT). Serão colocados 2 LVDT em cada lado da seção transversal para verificação de possível torção na laje alveolar. Tais equipamentos serão posicionados em locais como mostrados na Figura 56.

Figura 56: Arranjos para ensaio ao cisalhamento de lajes sem capa



Fonte: Próprio autor

Os resultados obtidos foram utilizados para caracterização dos materiais e para entendimento do modo de falha ocorrido. Após finalizados os ensaios com lajes sem capa, foram realizados os ensaios de lajes alveolares biapoiadas com capa estrutural.

### 3.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM LAJES ALVEOLARES COM CAPA

Para o ensaio de laje alveolar biapoiada com capa de concreto, foram seguidos os mesmos preceitos de ensaio de lajes sem capa, contudo foi ensaiada apenas uma laje. Primeiramente, a laje alveolar tem sua superfície superior limpa, retirando detritos e poeira. Então, a parte superior da laje é umedecida, sem deixar água acumulada (Figura 57). Após estas etapas, é feita a concretagem da capa de concreto e, por fim, sua cura (Figura 58). Alcançada a resistência necessária para a capa (neste trabalho, é considerada de 30 MPa), é feita a instrumentação do ensaio.

Figura 57: Forma e armação da laje alveolar que receberá capa



Fonte: Próprio autor (2023)

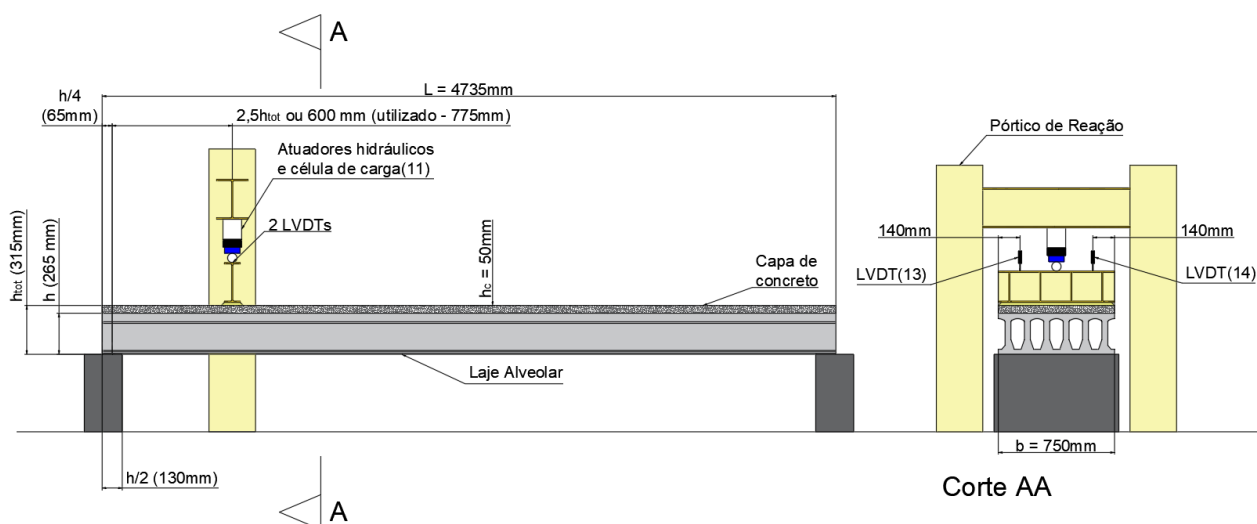
Neste trabalho, foram seguidos os preceitos utilizados em Ibrahim *et. al.* (2016) para instrumentação dos ensaios. Foram utilizados atuadores hidráulicos, equipamentos de medição de intensidade de força aplicada (célula de carga) e transdutores na vertical (medição de deslocamentos lineares verticais - LVDT). Foram colocados 2 LVDT em cada ponto para verificação de possível torção na laje alveolar. Tais equipamentos foram colocados em locais como mostrados na Figura 59. Nesse caso, foi modificada a posição de atuação da força concentrada em comparação com a laje sem capa, pois foi considerada para o cálculo da distância a altura total da laje + capa ( $h_{tot}$ ). Sendo assim, a distância entre o centro do apoio e o centração de atuação da força concentrada é de 775mm (2,46h).

Figura 58: Processo de cura da laje alveolar com capa



Fonte: Próprio autor (2023)

Figura 59: Arranjos para ensaio ao cisalhamento de lajes com capa



Fonte: Próprio autor

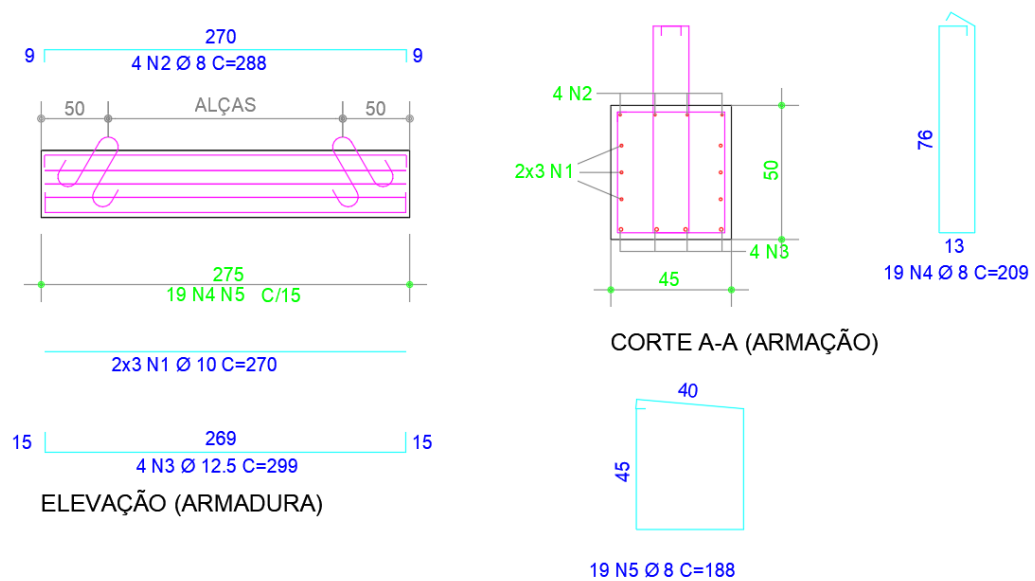
### 3.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM LAJES ALVEOLARES COM CAPA E CONTINUIDADE

Para o ensaio de lajes alveolares contínuas com capa de concreto, são seguidos os mesmos preceitos de ensaio de lajes sem e com capa e os observados nos ensaios de Santos (2014). Contudo, diferentemente do ensaio de Santos, a posição de atuação da força concentrada sobre a laje é mais próxima do apoio ( $775\text{ mm} - 2,46h$ ), e a viga de apoio sobre a qual foi feita a continuidade de lajes apresenta estribos expostos com diâmetro de  $8\text{ mm}$  a cada  $150\text{ mm}$  do comprimento



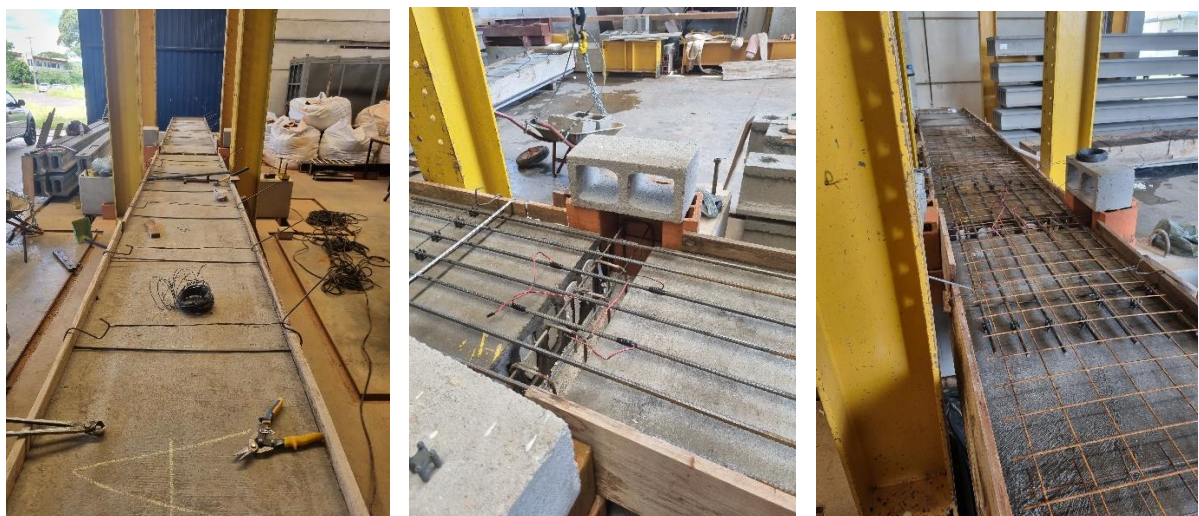
da viga (Figura 60), tendo então a criação de um elemento composto. As lajes alveolares primeiramente têm sua superfície superior limpa, retirando detritos e poeira. É feita montagem das formas e então colocadas as armaduras negativas de continuidade e, posteriormente, a parte superior das lajes é umedecida, sem deixar água acumulada (Figura 61).

Figura 60: Detalhamento da viga de apoio central do ensaio com armaduras expostas



Fonte: Próprio autor

Figura 61: Arranjos para ensaio ao cisalhamento de lajes contínuas com capa: (a) Vista da montagem da forma; (b) Vista da posição dos extensômetros; (c) Vista da posição das armaduras anteriormente ao capeamento



(a)

(b)

(c)

Fonte: Próprio autor

Após estas etapas, será feita a concretagem da capa de concreto e, por fim, sua cura (Figura 62).

Figura 62: Processo de cura lajes contínuas com capa

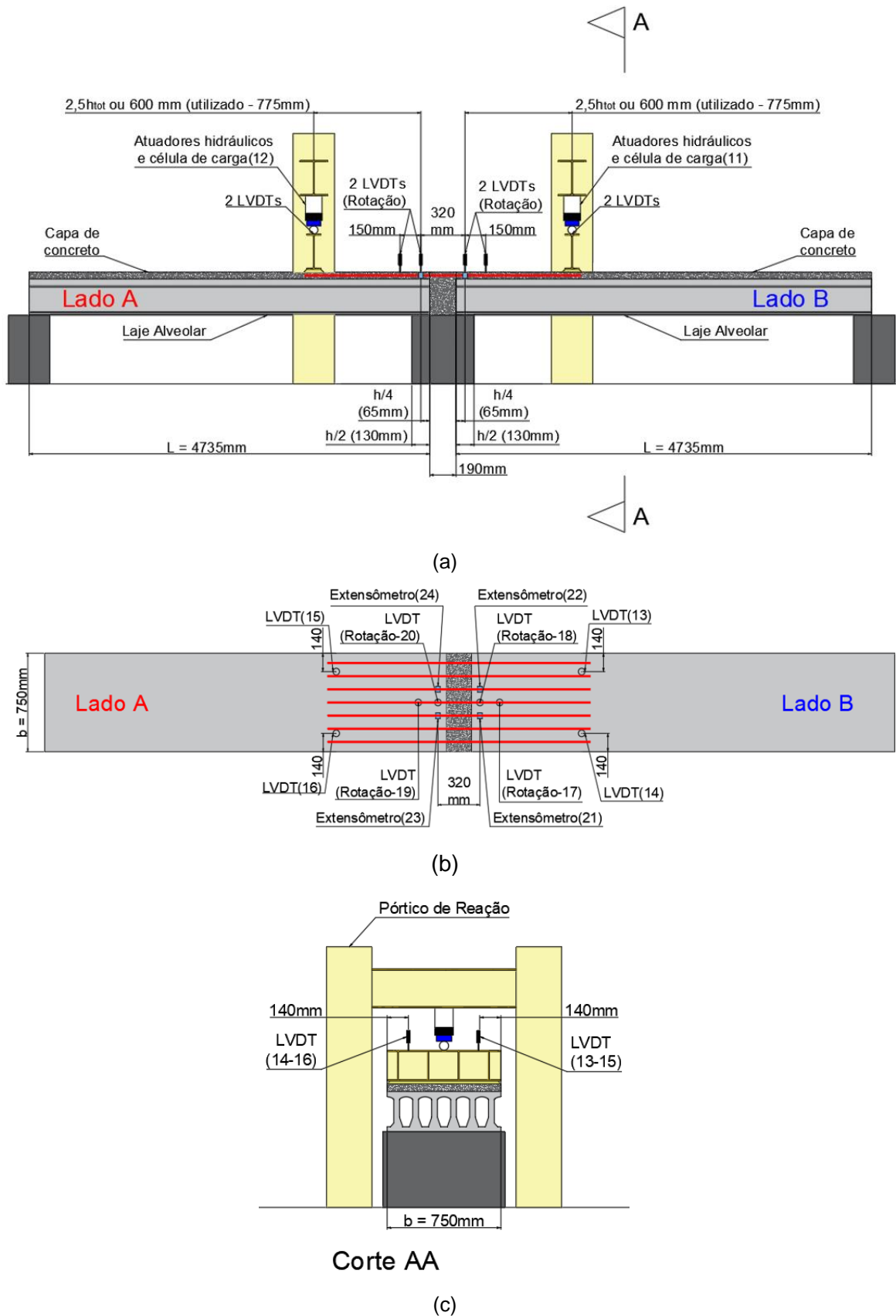


Fonte: Próprio autor

Alcançada a resistência necessária para a capa (neste trabalho é de 30 MPa), é feita a instrumentação e o ensaio.

Neste trabalho, serão utilizados atuadores hidráulicos, equipamentos de medição de intensidade de força aplicada (célula de carga) e transdutores na vertical (medição de deslocamentos lineares verticais – LVDT), tanto para medição do deslocamento, quanto para medição da rotação das lajes em seus apoios. Serão colocados 2 LVDT em lado da seção transversal para verificação de possível torção na laje alveolar. Tais equipamentos serão colocados em locais como os mostrados na Figura 63. Nas armaduras, foram colocados quatro extensômetros, dois em cada laje no centro do apoio.

Figura 63: Arranjos para ensaio ao cisalhamento de lajes contínuas com capa: (a) Vista lateral; (b) Vista de topo; (c) Corte AA



Fonte: Próprio autor



Com o intuito de se diminuir a possibilidade de rotação do apoio das lajes alveolares, a viga de apoio foi ancorada às canaletas da laje de reação por meio de elementos de travamento, porcas e arruelas (Figura 64). Para diminuir erros de medição da rotação utilizando os transdutores, eles foram apoiados sobre placas metálicas parafusadas na capa de concreto (Figura 65)

Figura 64: Travamento da viga de apoio central na laje de reação



Fonte: Próprio autor

Figura 65: Travamento da viga de apoio central na laje de reação



Fonte: Próprio autor

## 4. ENSAIO DE LAJE ALVEOLAR SEM CAPA E BIAPOIADA

Foi ensaiada uma laje alveolar sem capa ao cisalhamento (Figura 66), tendo 265 mm de altura e 4735 mm de comprimento (vão/h = 17,9). As lajes alveolares foram doadas pela empresa Marka Soluções Pré-Fabricadas de Concreto, e todas apresentam seção transversal poligonal, resistência à compressão do concreto de 50 MPa.

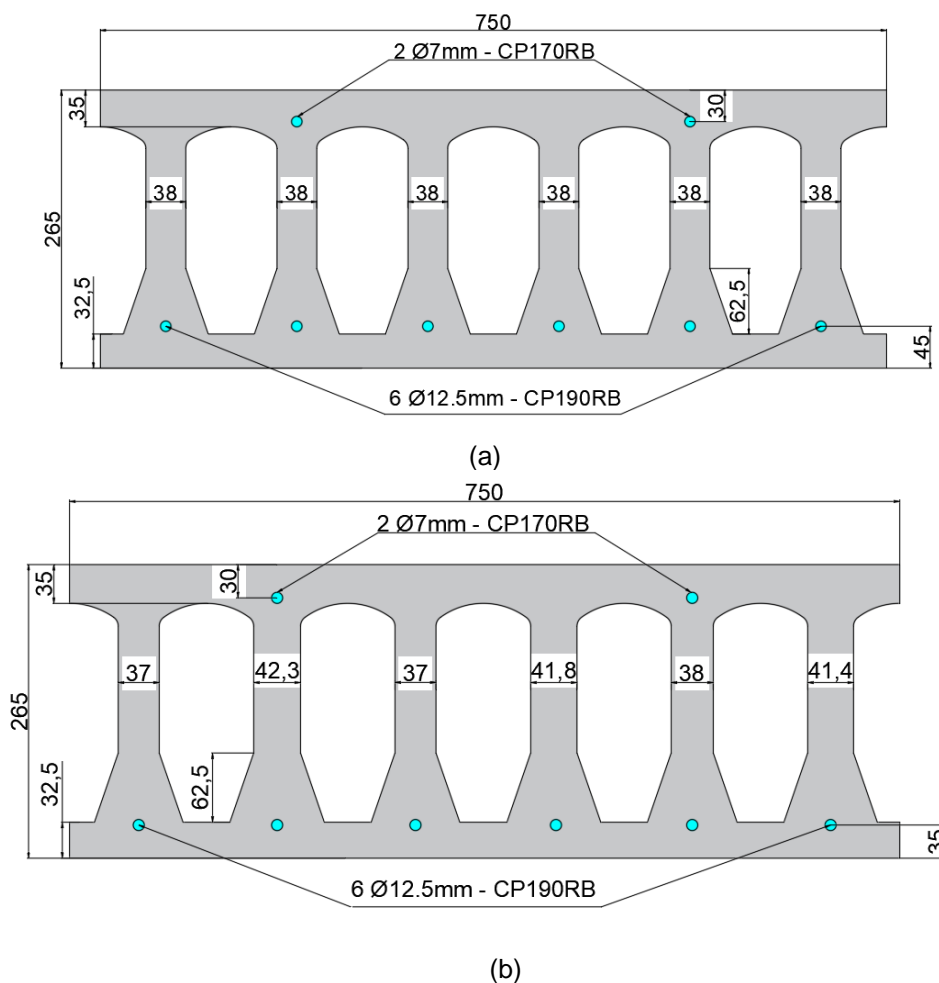
Figura 66: Ensaio de cisalhamento em laje alveolar



Fonte: Próprio autor

A laje teve suas dimensões verificadas, comparadas com a seção teórica e utilizadas para dimensionamento do valor teórico de resistência (Figura 67).

Figura 67: Seção Teórica e seções reais ensaiadas (medidas em mm): (a) Seção transversal teórica; (b) Seção transversal da laje 1



Fonte: Próprio autor

O ensaio foi utilizado para a caracterização das lajes, sendo estimadas a partir deles informações como:

- Resistência à força cortante;
- Verificação do modo de ruptura da laje ao cisalhamento;

O valor teórico de resistência da laje alveolar à força cortante, considerando a seção transversal projetada para o equipamento de produção, são calculados, então, pela equação 41 e pela equação 74 e mostradas na Tabela 5 (cálculo apresentado no Apêndice B).

Tabela 5: Resistência teórica da laje alveolar sem capa

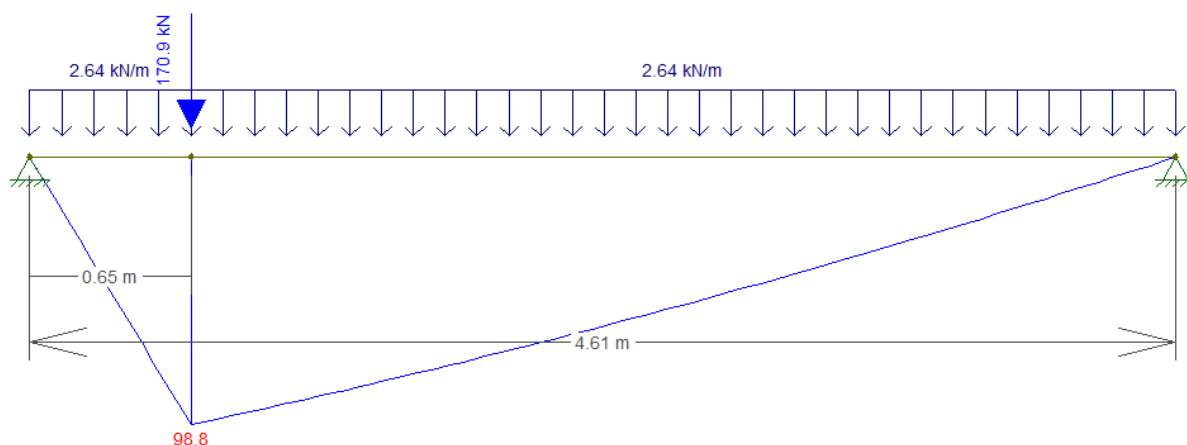
Resistência Teórica da Laje Alveolar sem Capa	
Resistência Flexo-Cortante (kN) - $VR_{k,fl}$	129,9
Resistência Tração Diagonal (kN) - $VR_{k,c}$	152,6

Fonte: Próprio autor

Sendo assim, de acordo com a disposição do ensaio dado no item 3.2, tem-se que a máxima força concentrada resistida pelo elemento a partir do mecanismo de flexo-cortante é de 144,32 kN, e pelo mecanismo de tração diagonal é de 170,6 kN.

Para a situação de máxima força concentrada possível, tem-se que o momento fletor solicitante atuante é de 98,8kNm (Figura 68)

Figura 68: Momento fletor máximo alcançada no ensaio – Laje 1



Fonte: Próprio autor

Sendo assim, foi verificado se na região próxima ao apoio (região de transferência e regularização) não se ultrapassou o momento de fissuração (Figura 69).

Para a verificação de fissuração na parte onde a protensão ainda não está implantada, o momento de fissuração é calculado pela equação 73:

$$M_r = \frac{1,3 \cdot 0,21 \cdot \sqrt[3]{50^2} \cdot 0,0009}{0,130}$$

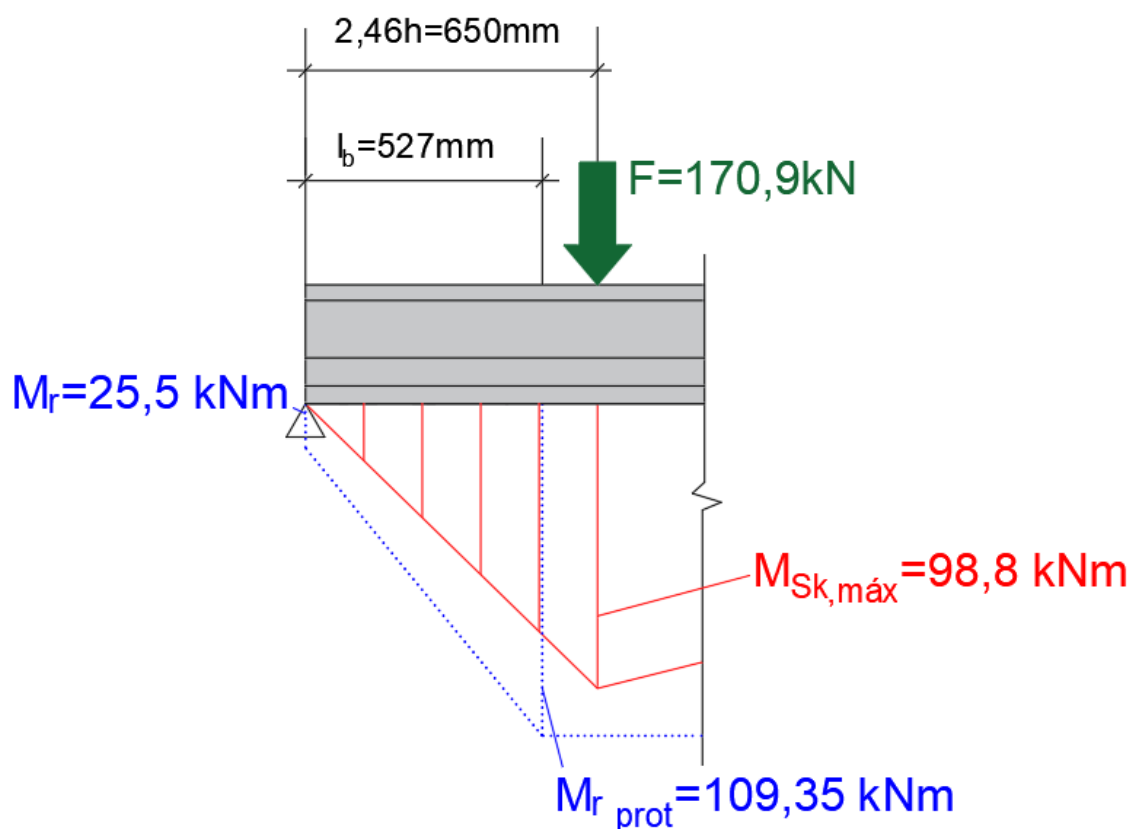
$$M_r = 25,5 \text{ kNm}$$

Para cálculo do momento de fissuração a partir da região onde a protensão está implantada, pode-se usar a Equação 72:

$$M_{r\ prot} = \frac{1,3 \cdot 0,21 \cdot \sqrt[3]{50^2} \cdot 0,0009}{0,130} + \left( \frac{664 \cdot 0,0009}{0,1055 \cdot 0,130} + 97,42 \cdot 5,94 \cdot 0,0855 - 113,0 \cdot 0,76 \cdot ,105 \right)$$

$$M_{r\ prot} = 109,35\ kNm$$

Figura 69: Momento fletor máximo possível no ensaio – Laje 1 sem capa



Fonte: Próprio autor

Sendo assim, foi previsto que a ruptura acontece pelo mecanismo de tração diagonal.

Foi, então, realizado o ensaio da laje 1. O ensaio seguiu o método mostrado na seção 3.2.

De acordo com a geometria obtida por medição da Laje 1, tem-se que a resistência à força cortante da laje, de acordo com o mecanismo de ruptura, é mostrada na Tabela 6 (cálculo apresentado no Apêndice B).

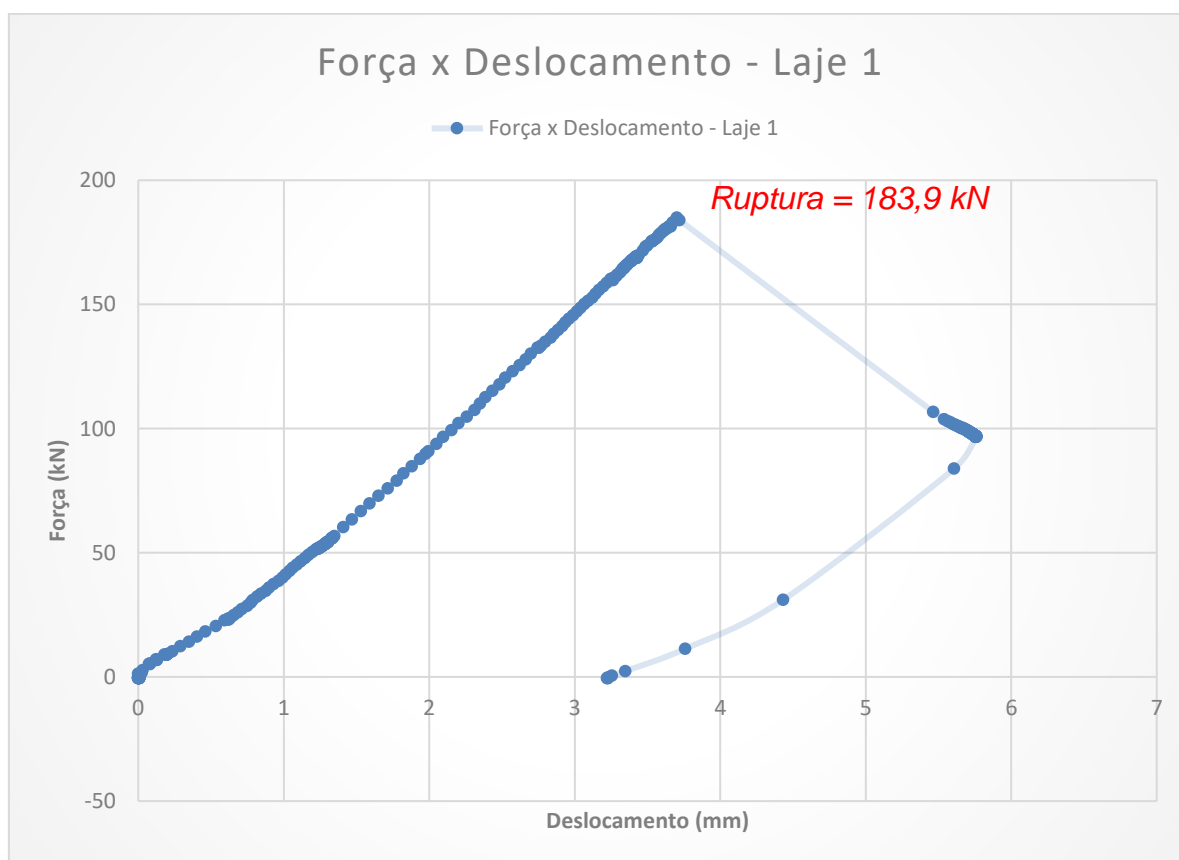
Tabela 6: Resistência teórica da laje alveolar 1 sem capa

Resistência Teórica da Laje Alveolar 1 sem Capa	
Resistência Flexo-Cortante (kN) - $VR_{k,fl}$	137,50
Resistência Tração Diagonal (kN) - $VR_{k,c}$	157,25

Fonte: Próprio autor

Com a realização do ensaio, a ação de ruptura alcançada foi de 183,9 kN (Figura 70), sendo, portanto, a força cortante máxima alcançada na laje 1 de 164,2 kN (Figura 71).

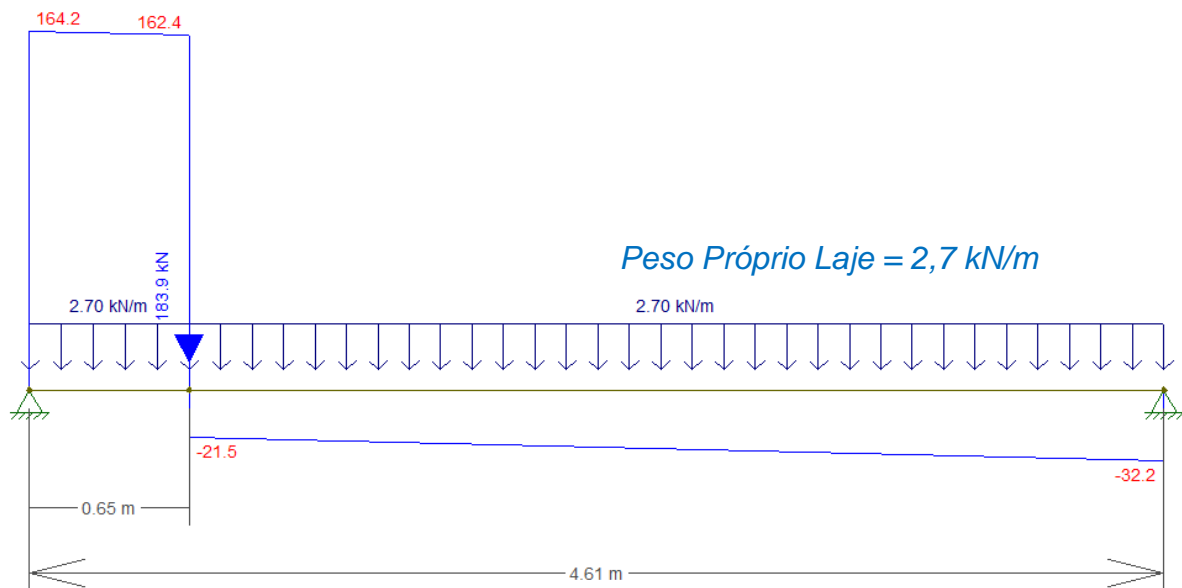
Figura 70: Diagrama Força-Deslocamento – Laje 1



Fonte: Próprio autor



Figura 71: Força cortante máxima alcançada no ensaio – Laje 1



Fonte: Próprio autor

Pode-se ver pelas Figuras 72 e 73 que o modo de ruptura da laje foi pelo mecanismo de tração diagonal, tendo a inclinação da fissura aproximadamente de  $27^\circ$ .

Figura 72: Fissura de Ruptura – Lado Esquerdo – Laje 1



Fonte: Próprio autor

Figura 73:Fissura de Ruptura – Lado Direito– Laje 1



Fonte: Próprio autor

Assim, o valor encontrado no ensaio foi comparado com os valores teóricos e discutido no capítulo sete.



## 5. ENSAIO DE LAJE ALVEOLAR COM CAPA E BIAPOIADA

Nesta etapa, foi ensaiada apenas uma laje alveolar, tendo ela 265 mm de altura. Para formar a seção composta, foi executada uma capa de concreto com 50 mm de espessura e  $f_{ck}$  igual a 30 MPa. O ensaio seguiu o método mostrado na seção 3.1.3 (Figura 74).

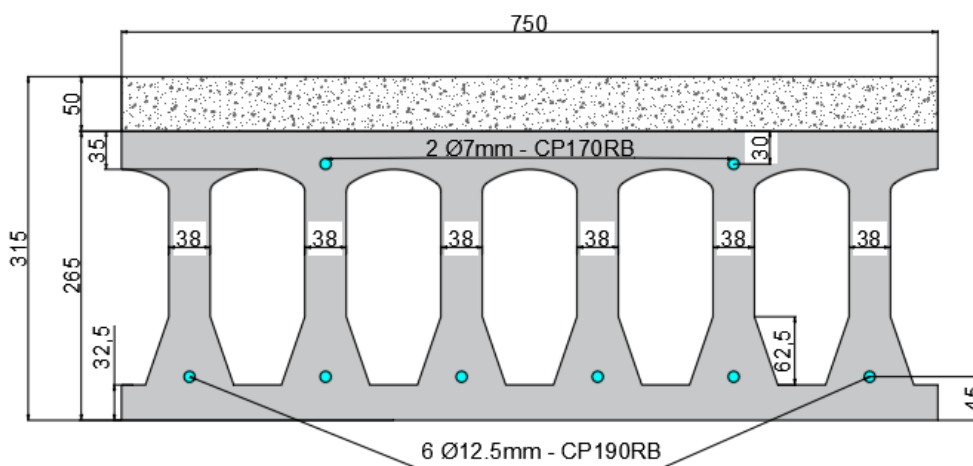
Figura 74: Ensaio de cisalhamento em laje alveolar com capa



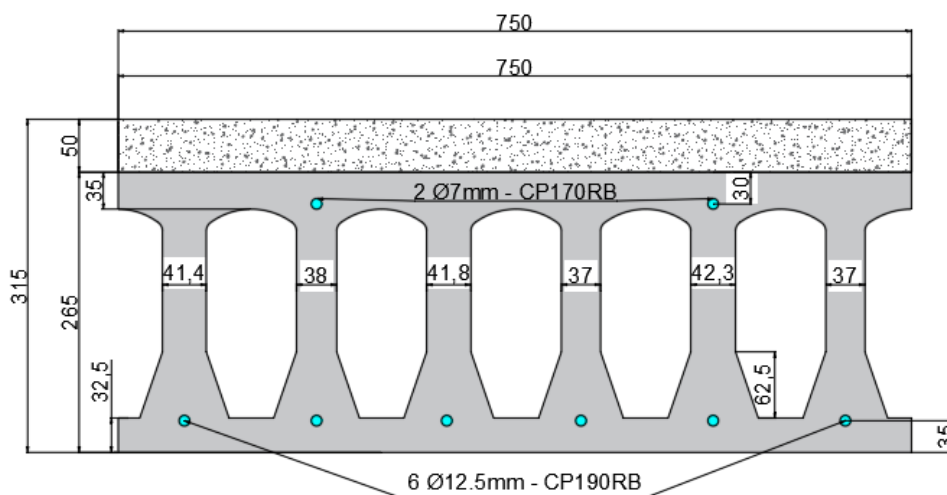
Fonte: Próprio autor

Foram medidas as dimensões reais da laje para se calcular a resistência teórica a força cortante (Figura 75).

Figura 75: Seção Teórica e seções reais ensaiadas com medidas em mm: (a) seção transversal teórica; (b) Seção real da laje com capa



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor

Nestes ensaios, foram observados os seguintes pontos:

- Resistência ao cisalhamento;
- Verificação do modo de ruptura ao cisalhamento da laje com capa;
- Capacidade resistente da interface entre a laje alveolar e a capa de concreto;
- Escorregamento da capa em relação à superfície da laje alveolar.

O valor teórico de resistência da laje alveolar com capa à força cortante, considerando a seção transversal projetada para o equipamento de produção e capa estrutural de 50mm, são calculados, então, pela equação 44 e pela equação 74 com os dados característicos e mostradas na Tabela 7 (cálculo apresentado no Apêndice B).

Tabela 7: Resistência teórica da laje alveolar com capa

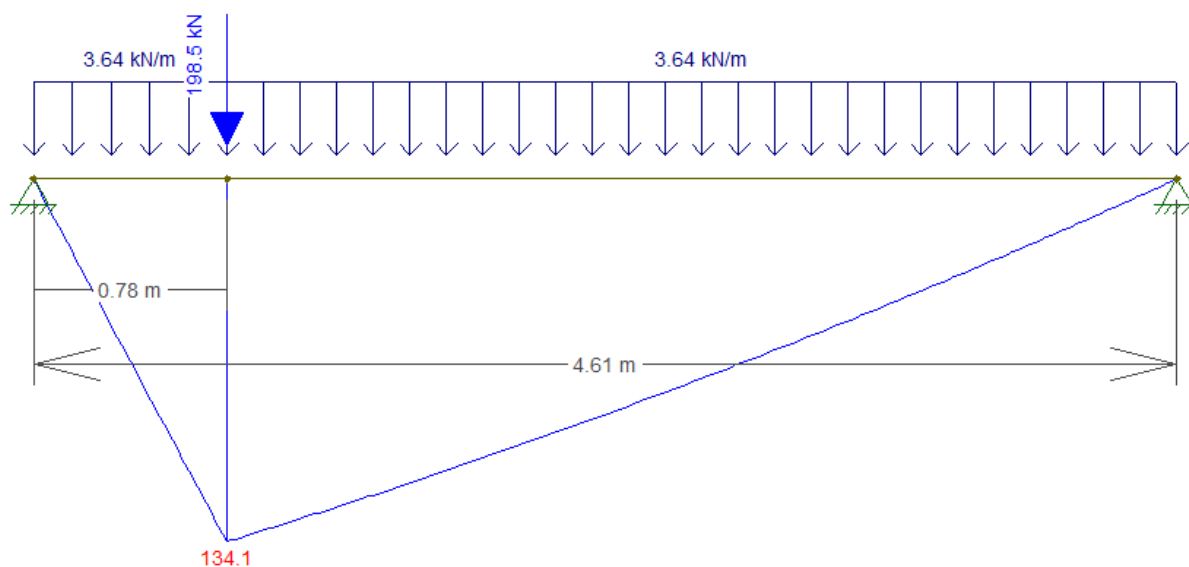
Resistência Teórica da Laje Alveolar com Capa	
Resistência Flexo-Cortante (kN) - $VR_{k,fl}$	151,11
Resistência Tração Diagonal (kN) - $V_{Rk,cc}$	173,33

Fonte: Próprio autor

Sendo assim, de acordo com a disposição do ensaio dado no item 3.3, tem-se que a máxima força concentrada resistida pelo elemento a partir do mecanismo de flexo-cortante é de 171,80 kN e pelo mecanismo de tração diagonal é de 198,5 kN.

Para a situação de máxima força concentrada possível, tem-se que o momento fletor solicitante atuante é de 134,1kNm (Figura 76).

Figura 76: Momento fletor máximo possível no ensaio – Laje com capa



Fonte: Próprio autor

Sendo assim, foi verificado se na região próxima ao apoio (região de transferência e regularização) não se ultrapassou o momento de fissuração (Figura 77).

Para a verificação de fissuração na parte onde a protensão ainda não está implantada, o momento de fissuração é calculado pela equação 73.

$$M_r = \frac{1,3 \cdot 0,21 \cdot \sqrt[3]{50^2} \cdot 0,0015}{0,165}$$

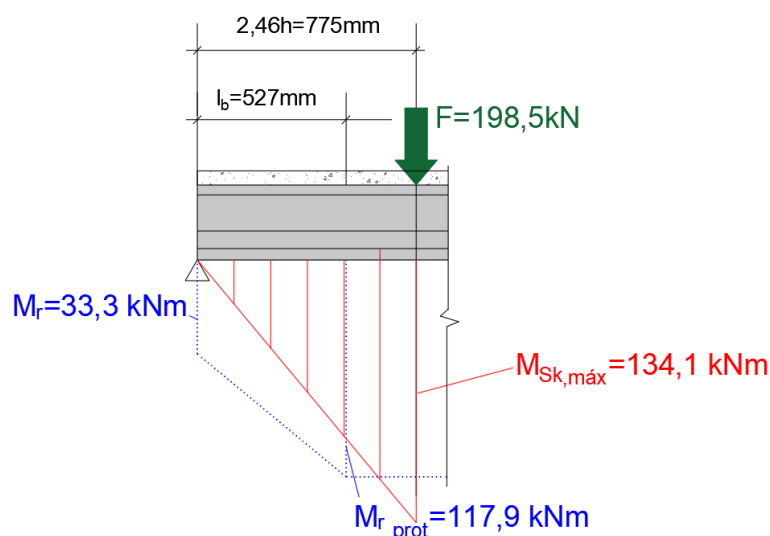
$$M_r = 33,3 \text{ kNm}$$

Para cálculo do momento de fissuração a partir da região onde a protensão está implantada, pode-se usar a Equação 72.

$$M_{r \text{ prot}} = \frac{1,3 \cdot 0,21 \cdot \sqrt[3]{50^2} \cdot 0,0015}{0,165} + \left( \frac{664 \cdot 0,0009}{0,1055 \cdot 0,130} + 97,42 \cdot 5,94 \cdot 0,0855 - 113,0 \cdot 0,76 \cdot ,105 \right)$$

$$M_{r \text{ prot}} = 117,98 \text{ kNm}$$

Figura 77: Momento fletor máximo alcançada no ensaio – Laje com capa



Fonte: Próprio autor

De acordo com as verificações de tensão na interface entre laje e capa, tendo a laje a possibilidade de resistir à força cortante pelo mecanismo de tração diagonal, a tensão máxima entre a laje a capa seria (Equação 45):

$$\tau(y) = \frac{173,33 \text{ kN}}{0,75 \text{ m} \cdot 39597979 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,0015} \cdot (0,29 \text{ m} - 0,165 \text{ m}) \cdot 30672463 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,75 \text{ m} \cdot 0,05 \text{ m}$$

$$\tau(y) = 565,86 \text{ kN/m}^2 = 0,566 \text{ MPa}$$

Sendo a superfície de lajes moldada lisa, de acordo com o Eurocode 2 (2004) e FIB (2019), tendo o valor de  $c$  igual a 0,2, a tensão resistente na interface é calculada (Equação 49). Como a tensão perpendicular  $\sigma_n$  não ocorre em todo o comprimento do elemento, ele será desconsiderado.

$$\tau_{Rki} = 0,2 \cdot 0,21 \cdot \sqrt[3]{30^2} < 0,5 \cdot \left( 0,6 \cdot \left( 1 - \frac{30}{250} \right) \right) \cdot 30$$

$$\tau_{Rki} = 0,4 \text{ MPa}$$

Com as prescrições do Model Code 10 (2010), a tensão resistente da interface é dada pela Equação 51. Considerando a face superior da laje como lisa,  $\tau_c$  tem valor entre 1,5 e 2,5. Utilizando o menor valor para  $\tau_c$ , tem-se que:

$$\tau_u = 1,5 \text{ MPa}$$

Sendo assim, pode-se ocorrer o destacamento da capa antes da ruptura da laje pelo Eurocode (2004) e FIB (2019), contudo, pelo Model Code 10, temos que a capa se manterá ligada à laje até a ruptura da seção composta.

Sendo assim, foi previsto que a ruptura acontece pelo mecanismo de tração diagonal.

Já a resistência teórica da laje alveolar com a geometria real é dada na Tabela 8 (Cálculo apresentado no Apêndice B).

Tabela 8: Resistência teórica da laje alveolar com capa ensaiada

Resistência Teórica da Laje Alveolar com Capa ensaiada	
Resistência Flexo-Cortante (kN) - $VR_{k,fl}$	159,15
Resistência Tração Diagonal (kN) - $VR_{k,cc}$	178,86

Fonte: Próprio autor

Entretanto, antes da realização do ensaio com capa, foi observado já um descolamento prévio da capa em relação à laje. A capa foi executada com a laje fora da posição do ensaio, pois foi concretada juntamente com o modelo com continuidade. Entende-se que, durante o transporte da laje com a capa, houve o descolamento prévio dela (Figura 79).

Esse descolamento também se dá pelo fato da superfície superior da laje alveolar estudada ser lisa, com ranhuras rasas, as quais diminuem a capacidade resistente da interface (Figura 78).

Com a realização do ensaio, a ação de ruptura alcançada foi de 146,3 kN (Figura 80), sendo, então, a força cortante máxima alcançada na laje com capa de 129,9 kN (Figura 81). Durante o ensaio, houve um estalo no instante em que a ação concentrada alcançou a intensidade 109,2 kN (75% da ação de ruptura), sendo observado que houve um aumento do descolamento na capa.

Figura 78: Rugosidade da superfície superior da laje ensaiada



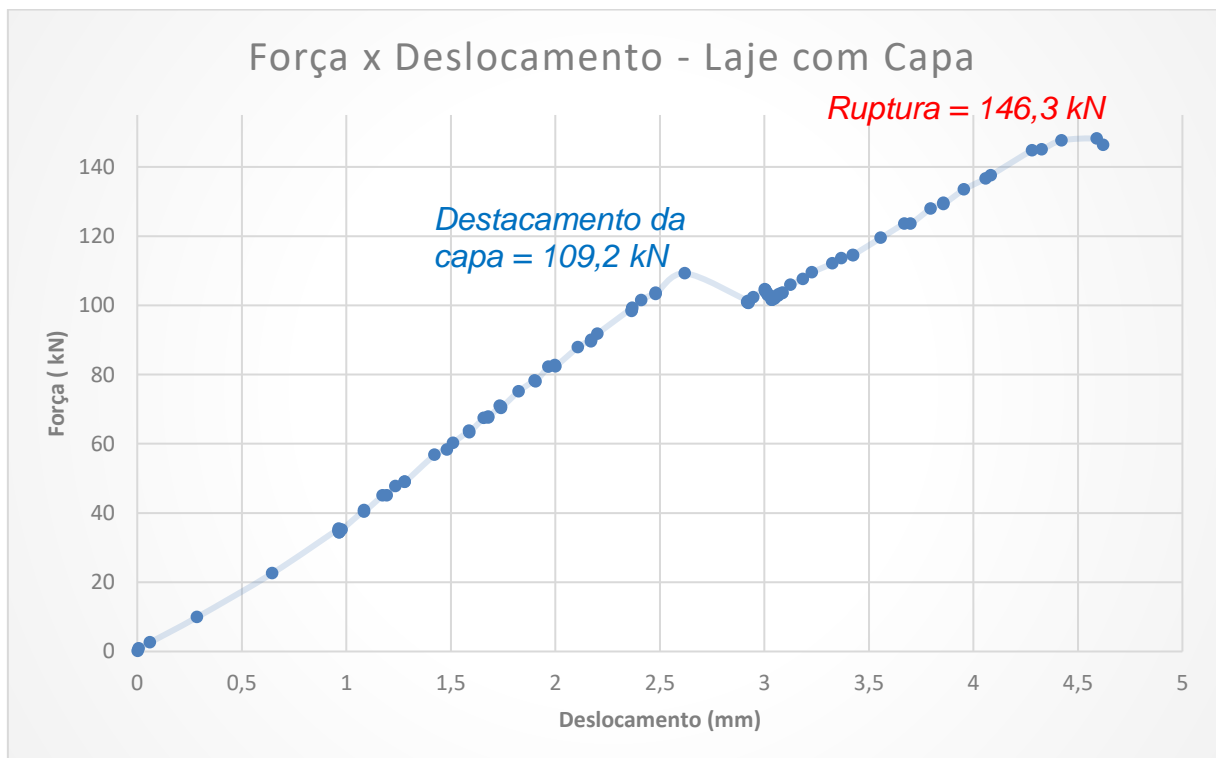
Fonte: Próprio autor

Figura 79: Capa de concreto com destacamento prévio



Fonte: Próprio autor

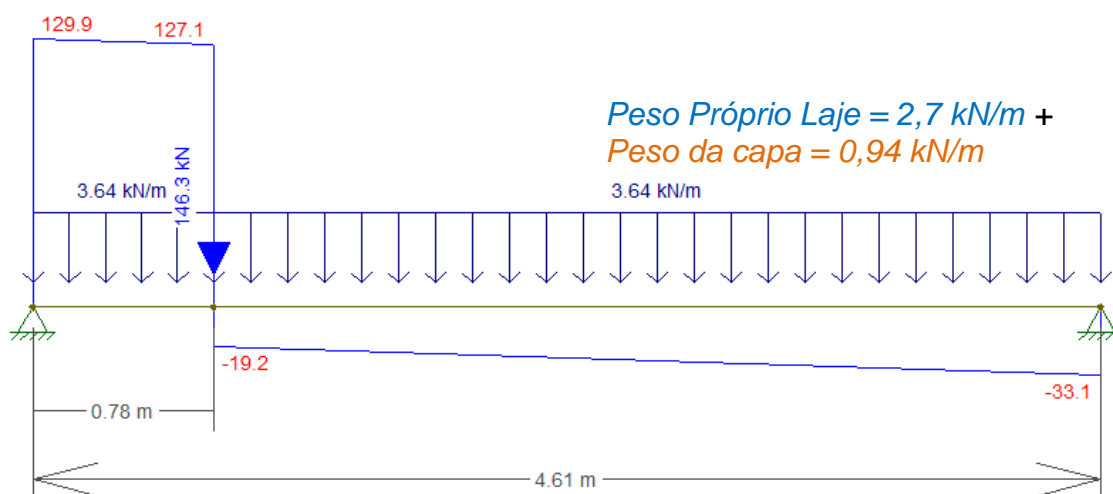
Figura 80: Diagrama Força-Deslocamento – Laje com capa



Fonte: Próprio autor



Figura 81: Força cortante máxima alcançada no ensaio – Laje com capa



Fonte: Próprio autor

Pode-se ver pelas Figuras 82 e 83 que o modo de ruptura da laje foi um conjunto dos mecanismos de flexo cortante minorado pelo fato da fissura de ruptura percorrer a região da interface entre laje alveolar e capa até a fissura devido tensões de cisalhamento, tendo a inclinação da fissura aproximadamente entre  $38^\circ$  e  $40^\circ$ .

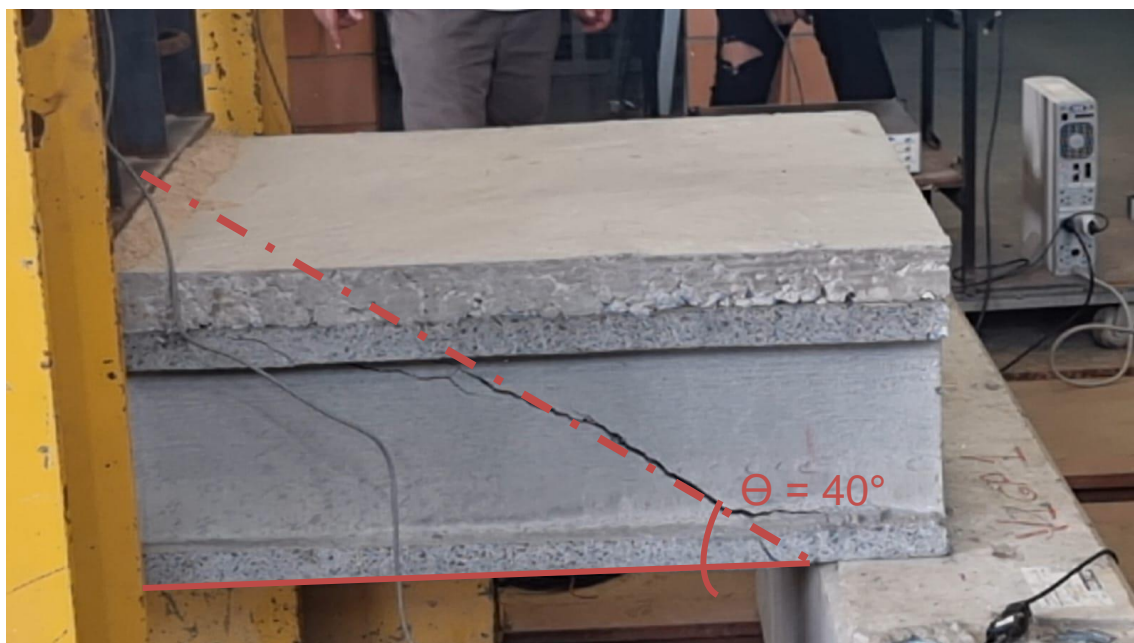
Figura 82: Fissura de ruptura – lado direito -laje com capa



Fonte: Próprio autor



Figura 83: Fissura de ruptura – lado esquerdo -laje com capa



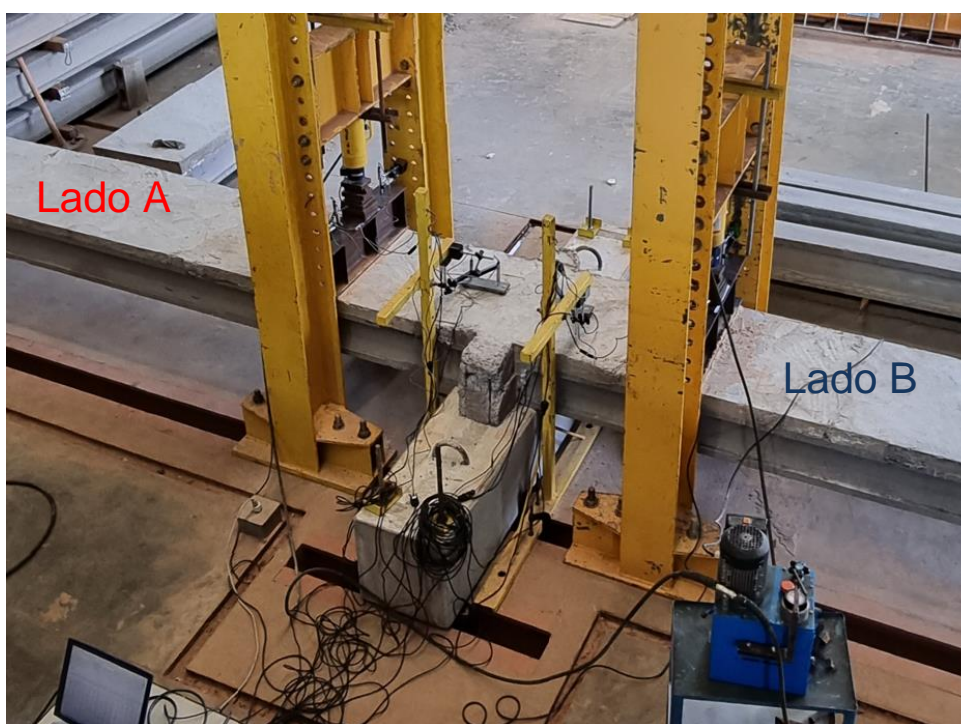
Fonte: Próprio autor

O valor encontrado no ensaio é comparado, então, com os valores teóricos, considerando as características indicadas em projetos e com os valores estimados a partir do ensaio de lajes sem capa, o que será discutido no capítulo sete.

## 6. ENSAIO DE LAJES ALVEOLARES COM CAPA E CONTÍNUAS

Nesta etapa de pesquisa, serão utilizadas duas lajes alveolares, ambas com 265 mm de altura, para executar um ensaio de cisalhamento em lajes contínuas. O ensaio executado é mostrado na Figura 84.

Figura 84: Ensaio em lajes alveolares contínuas

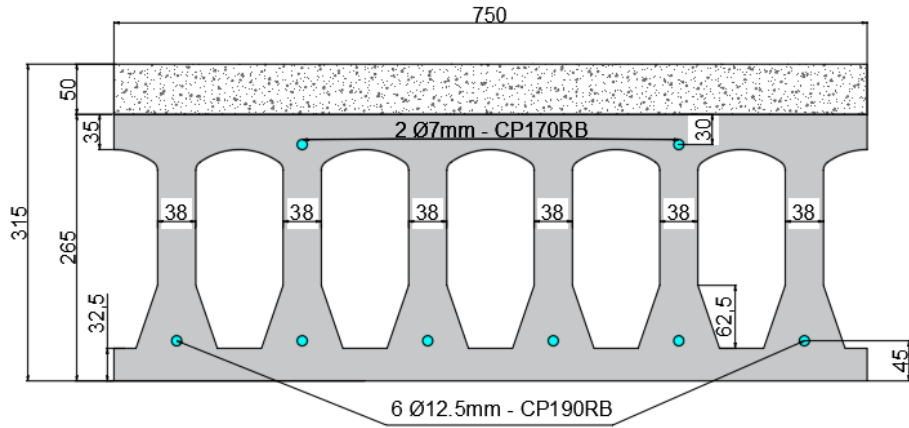


Fonte: Próprio autor (2023)

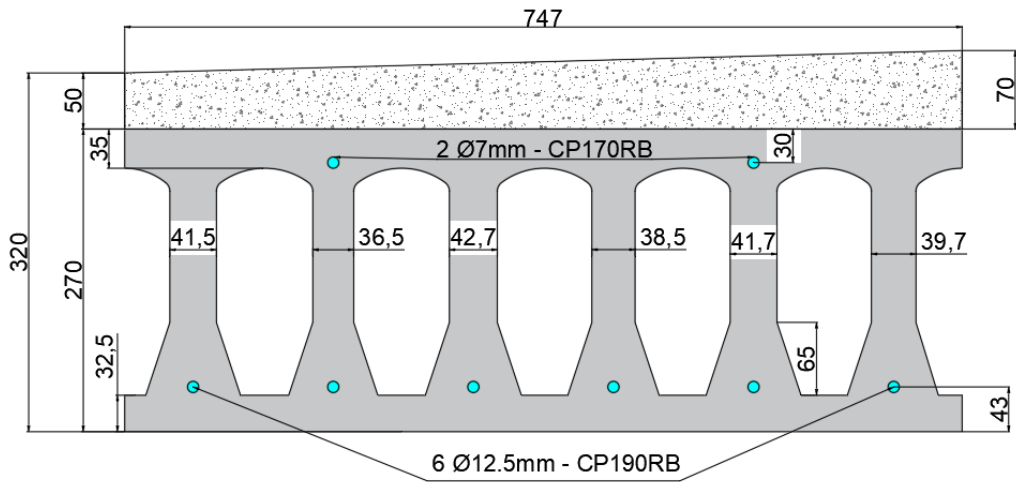
A continuidade dessas lajes é feita a partir de armadura passiva colocada na capa estrutural com resistência à compressão de 30 MPa, de 50 mm de espessura, na região do apoio central. Essa armadura é posicionada tendo um cobrimento de 25mm

Todas as lajes tiveram suas dimensões verificadas, sendo elas utilizadas para cálculo da resistência teórica ao cisalhamento do conjunto laje, capa e continuidade (Figura 85).

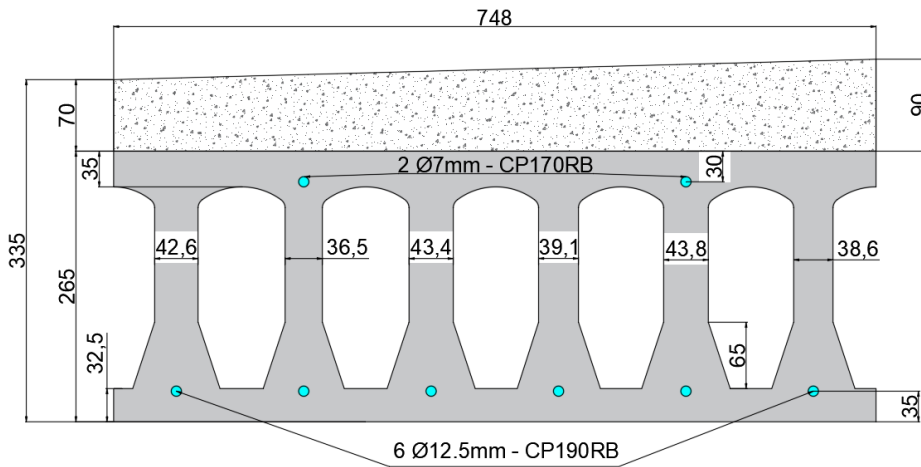
Figura 85: Seção Teórica e seções reais ensaiadas com medidas em mm: (a) Seção transversal teórica; (b) seção transversal da laje do Lado A com capa; (c) seção transversal da laje do Lado B com capa



(a)



(b)



(c)

Fonte: Próprio autor

Nestes ensaios, foram observados os seguintes pontos:

- Resistência ao cisalhamento;
- Verificação do modo de ruptura ao cisalhamento da laje com capa;
- Capacidade resistente da interface entre a laje alveolar e a capa de concreto;
- Escorregamento da capa em relação à superfície da laje alveolar.

O valor teórico de resistência da laje alveolar com capa à força cortante, considerando a seção transversal projetada para o equipamento de produção e capa estrutural de 50mm, são calculados, então, pela equação 44 e pela equação 74 com dados característicos e mostrados na Tabela 9 (cálculo apresentado no Apêndice B).

Tabela 9: Resistência teórica da laje alveolar com capa

Resistência Teórica da Laje Alveolar com Capa	
Resistência Flexo-Cortante (kN) - $VR_{k,fl}$	151,11
Resistência Tração Diagonal (kN) - $VR_{k,cc}$	173,33

Fonte: Próprio autor

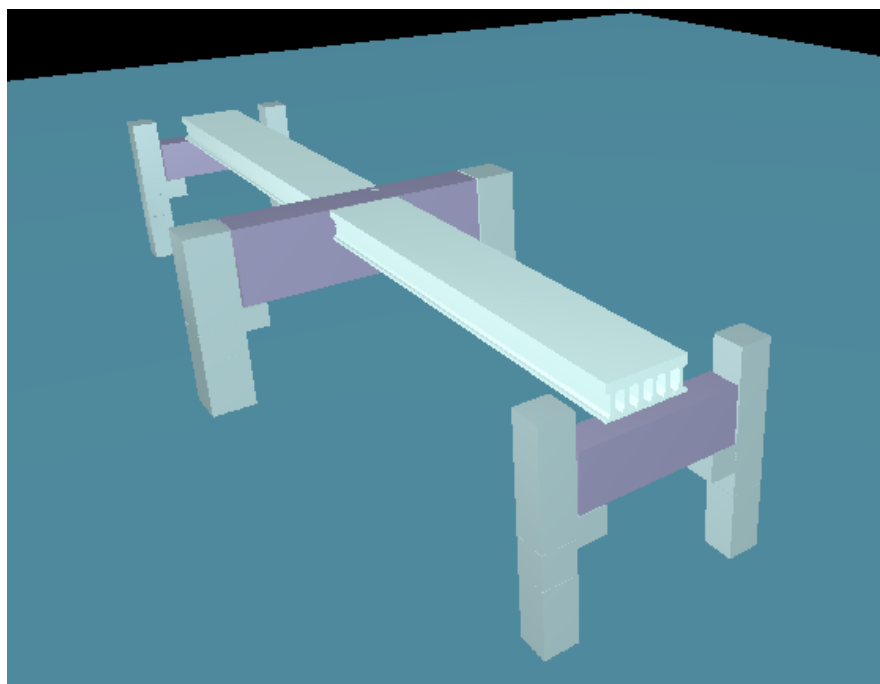
Para o dimensionamento da armadura necessária de continuidade, foi utilizada a máxima força concentrada de acordo com a resistência à força cortante. Como, de acordo com o incremento de carga, há a possibilidade de modificação da rigidez na ligação de continuidade das lajes, foi feito um modelo utilizando o software de cálculo estrutural TQS versão 20 para se calcular a força concentrada máxima (Figura 86).

Foi utilizado, então, o módulo de grelha não-linear, com o intuito de, a partir do incremento de carga sobre a estrutura, ter-se a redistribuição de esforços a cada seção fissurada. Com isso, foi possível encontrar a força concentrada máxima de 180 kN para se atingir a maior resistência a força cortante pelo mecanismo de tração-diagonal.

Considerando o sistema com rigidez constante, o momento fletor negativo solicitante é de 106,3 kNm (Figura 87 - sendo este o valor utilizado para dimensionamento da armadura de continuidade). Contudo, por existirem fissurações

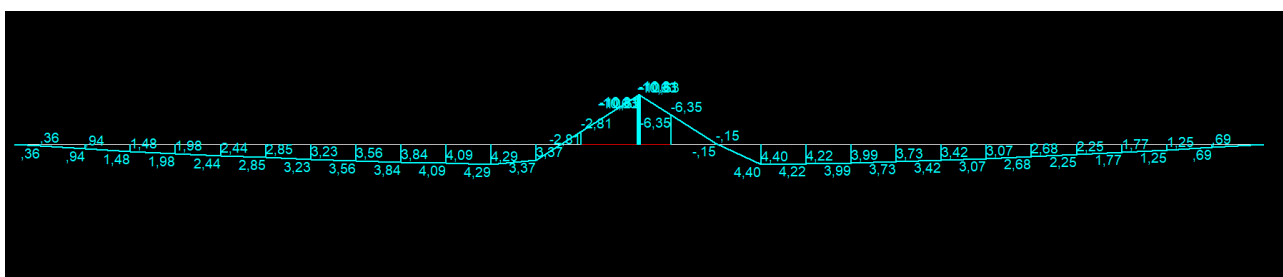
na região de continuidade, o momento que solicita a região da ligação é de 83,4 kNm (redistribuição de 22%, maior que o permitido pela ABNT NBR14861:2022 - Figura 88), e a força cortante atuando na região do apoio é a máxima resistida pelo mecanismo de tração diagonal (Figura 89).

Figura 86: modelo utilizado para estudo do sistema contínuo



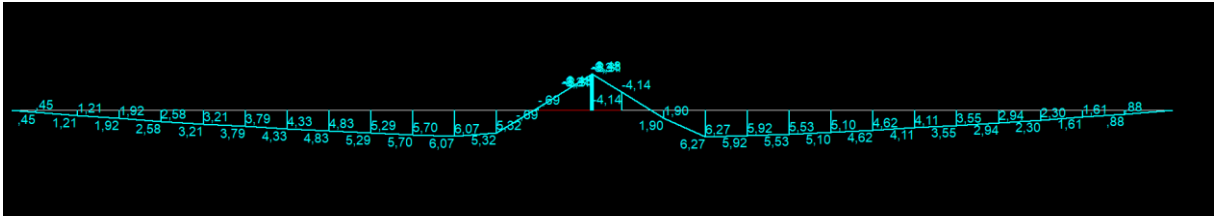
Fonte: Próprio autor

Figura 87: Momento fletor sem redistribuição de esforços



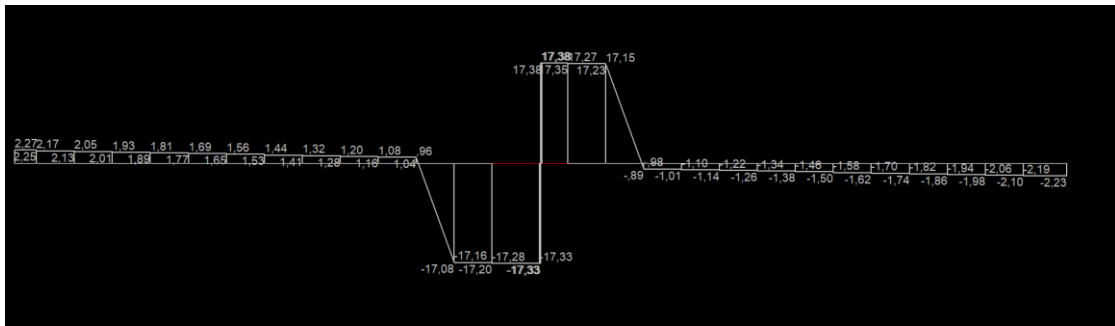
Fonte: Próprio autor

Figura 88: Momento fletor com redistribuição de esforços



Fonte: Próprio autor

Figura x89: Força cortante redistribuição de esforços



Fonte: Próprio autor

A partir do momento sem redistribuição, é calculada a área de aço necessária na ligação a partir do equilíbrio da seção transversal.

$$M_k = (0,85 \cdot f_{ck} \cdot b_w \cdot 0,8 \cdot x) \cdot (d - 0,4 \cdot x)$$

$$106,3 = (0,85 \cdot 50000 \cdot 0,75 \cdot 0,8 \cdot x) \cdot (0,285 - 0,4 \cdot x)$$

$$x = 0,0149m$$

$$z = d - 0,4 \cdot x$$

$$z = 0,285 - 0,4 \cdot 0,0149 = 0,279m$$

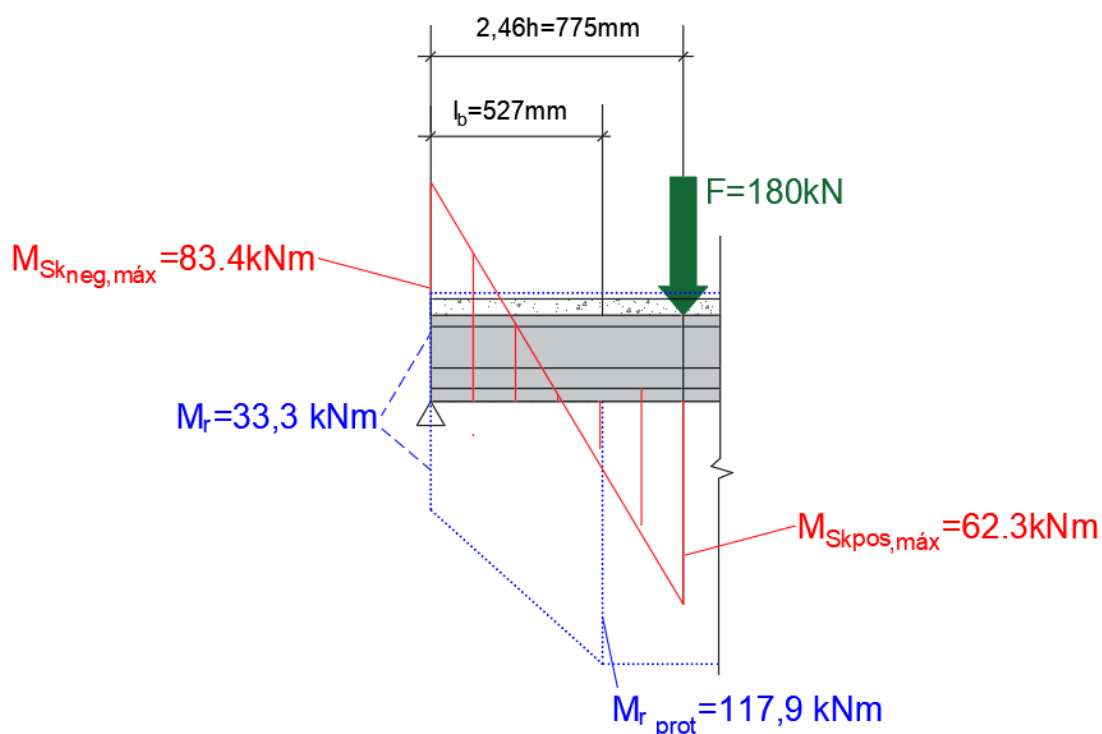
$$A_s = \frac{M_k}{z \cdot f_{yk}}$$

$$A_s = \frac{106,3}{0,279 \cdot 50} = 7,62cm^2$$

No ensaio, foram colocadas sete barras de 12,5 mm de diâmetro, com dois metros de comprimento, a cada 100mm de espaçamento e uma malha POP pesada, contabilizando uma área de 9,55cm<sup>2</sup> de armadura passiva.

Para a situação de máxima força concentrada possível, tem-se que o momento fletor negativo solicitante atuante é de 83,4kNm, e o momento positivo atuante de 62,3 kNm. Sendo assim, verifica-se que no comprimento de transferência da protensão não há fissuração na parte positiva, podendo se dizer que a ruptura se dará pelo mecanismo de tração diagonal (Figura 90).

Figura 90: Momento fletor máximo positivo e negativo alcançada no ensaio – Laje contínua



Fonte: Próprio autor

Para a verificação de fissuração na parte onde a protensão ainda não está implantada e também na região da capa, o momento de fissuração é calculado pela equação 73:

$$M_r = \frac{1,3 \cdot 0,21 \cdot \sqrt[3]{50^2} \cdot 0,0015}{0,165}$$

$$M_r = 33,3 \text{ kNm}$$

Para cálculo do momento de fissuração a partir da região onde a protensão está implantada, pode-se usar a Equação 72:

$$M_{r\ prot} = \frac{1,3 \cdot 0,21 \cdot \sqrt[3]{50^2} \cdot 0,0015}{0,165} + \left( \frac{664 \cdot 0,0009}{0,1055 \cdot 0,130} + 97,42 \cdot 5,94 \cdot 0,0855 - 113,0 \cdot 0,76 \cdot ,105 \right)$$

$$M_{r\ prot} = 117,98\ kNm$$

De acordo com as verificações de tensão na interface entre laje e capa, tendo a laje a possibilidade de resistir à força cortante pelo mecanismo de tração diagonal, a tensão máxima entre a laje a capa seria (Equação 45).

$$\tau(y) = \frac{173,33\ kN}{0,75\ m \cdot 39597979\ kN/m^2 \cdot 0,0015} \cdot (0,29\ m - 0,165\ m) \cdot 30672463\ kN/m^2 \cdot 0,75\ m \cdot 0,05\ m$$

$$\tau(y) = 565,86\ kN/m^2 = 0,566\ MPa$$

Sendo a superfície de lajes moldada lisa, de acordo com o Eurocode 2 (2004) e FIB (2019), tendo o valor de  $c$  igual a 0,2, a tensão resistente na interface é calculada (Equação 49). Como a tensão perpendicular  $\sigma_n$  não ocorre em todo o comprimento do elemento, ele será desconsiderado.

$$\tau_{Rki} = 0,2 \cdot 0,21 \cdot \sqrt[3]{30^2} < 0,5 \cdot \left( 0,6 \cdot \left( 1 - \frac{30}{250} \right) \right) \cdot 30$$

$$\tau_{Rki} = 0,4\ MPa$$

Com as prescrições do Model Code 10 (2010), a tensão resistente da interface é dada pela Equação 51. Considerando a face superior da laje como lisa,  $\tau_c$  tem valor entre 1,5 e 2,5. Utilizando o menor valor para  $\tau_c$ , tem-se que:

$$\tau_u = 1,5\ MPa$$



Sendo assim, pode-se ocorrer o destacamento da capa antes da ruptura da laje pelo Eurocode (2004) e FIB (2019). Contudo, pelo Model Code 10, temos que a capa se manterá ligada à laje até a ruptura da seção composta.

O valor teórico de resistência da laje alveolar com capa à força cortante e continuidade, considerando a seção transversal com a geometria real, é dada na Tabela 10 (Cálculo apresentado no Apêndice B).

Tabela 10: Resistência teórica da laje alveolar com capa e contínua

Resistência Teórica da Laje Alveolar com Capa Contínua		
	Laje A	Laje B
Resistência Flexo-Cortante (kN) - $VR_{k,fl}$	162,78	174,59
Resistência Tração Diagonal (kN) - $VR_{k,cc}$	189,14	199,79

Fonte: Próprio autor

A partir dos resultados calculados, foi realizado o ensaio para se analisar as falhas das lajes alveolares com capa e continuidade, com o intuito de compreender quais são os mecanismos existentes quando elas são submetidas a cargas concentradas. O ensaio foi realizado pelo método mostrado em 3.4.

O ensaio foi realizado oito dias após a concretagem da capa, aferindo-se a resistência do concreto da capa a partir de corpos de prova (Figura 91)

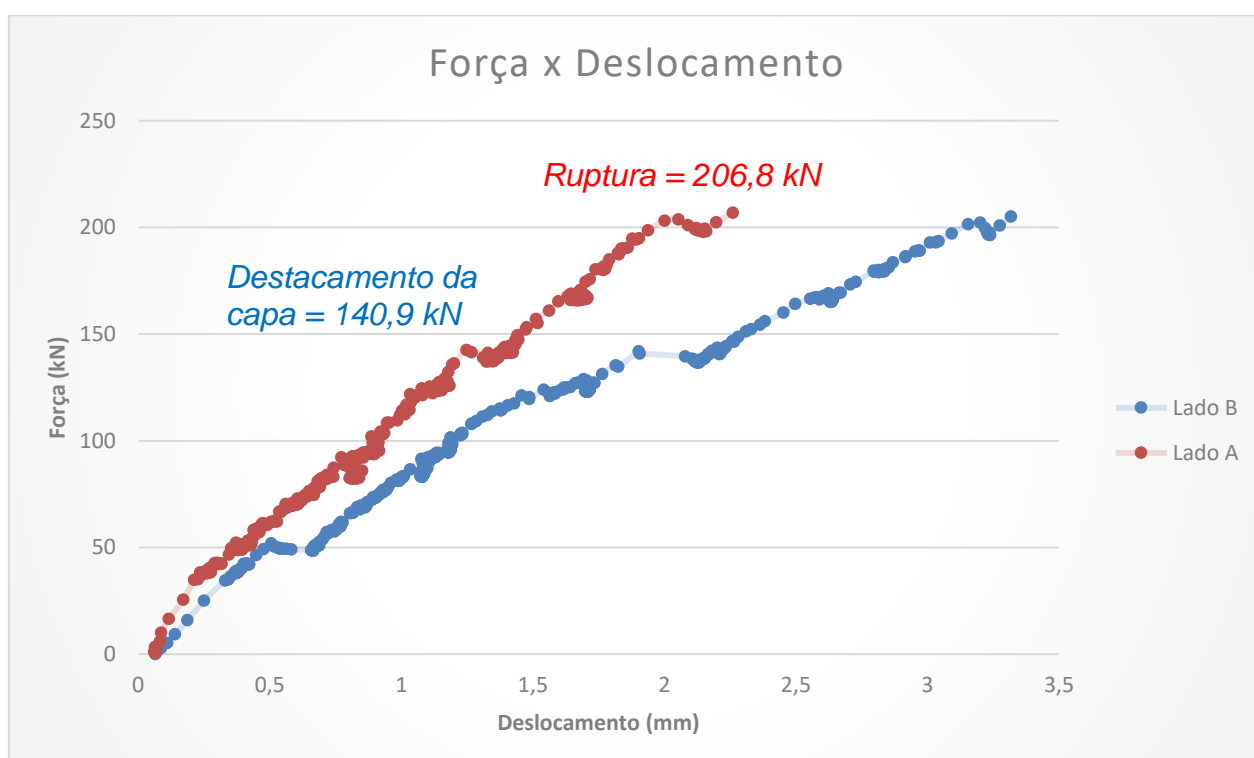


Na realização do ensaio, o lado A chegou à ruptura em primeiro lugar. Esse lado apresentava menor altura de capa estrutural (média de 60mm), e, com uma ação concentrada no valor de 206,8kN, veio a ruptura, sendo então a força cortante solicitante máxima de 195,5kN. Igualmente ao ensaio de laje com capa estrutural, houve um estalo durante o ensaio, no instante em que a ação concentrada alcançou a intensidade de 140,9kN (68% da ação de ruptura), sendo observado, então, o destacamento parcial da capa, tendo o comportamento corroborado pela presença de um maior deslocamento da laje apresentada na Figura 93.

Observa-se que, em relação aos extensômetros, obtiveram-se leituras localizadas acuradas apenas na laje B, chegando a uma tensão máxima na armadura na ruptura de 231 Mpa, e apresentado comportamento diferenciado próximo ao instante de destacamento da capa (Figura 94)

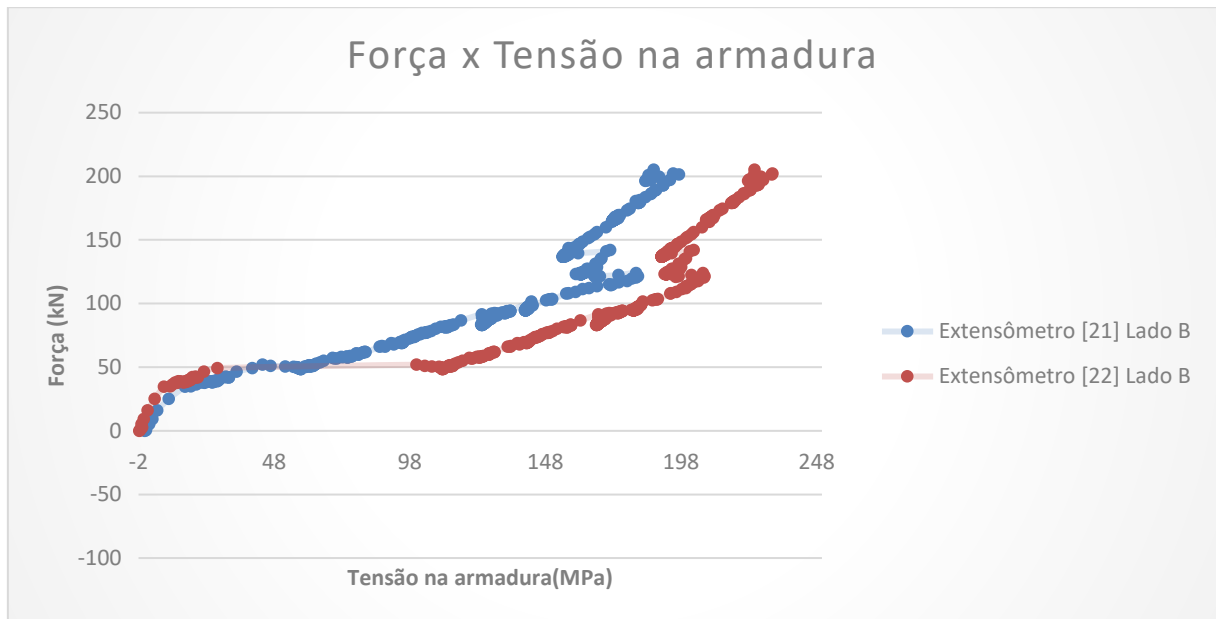
Em relação à rotação nos apoios (Figura 95), tem-se que o comportamento da ligação apresentou uma diminuição de rigidez para ação concentrada que gera momento fletor solicitante próximo ao momento de fissuração (38 kN e 36,6 kNm), e existiu uma pequena perturbação próximo à ação na qual houve o destacamento parcial da capa de concreto.

Figura 93: Diagrama Força-Deslocamento – Laje com capa e continuidade



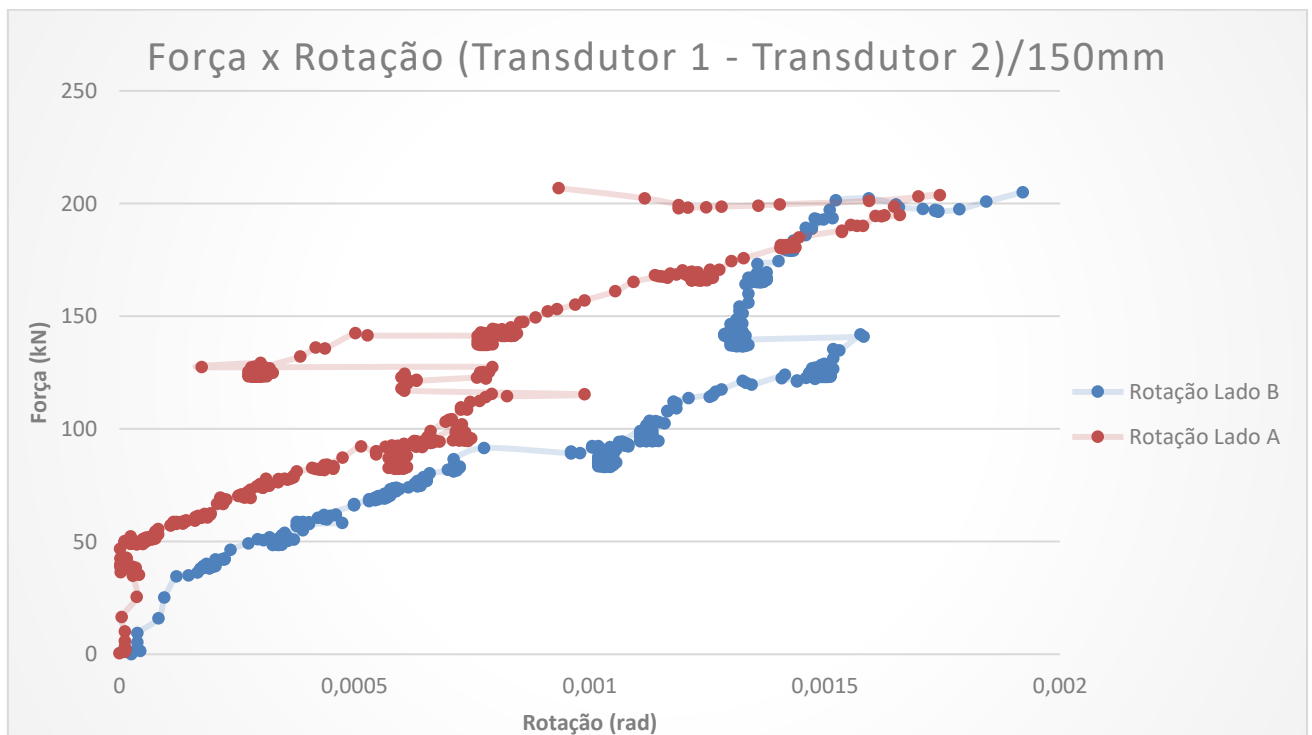
Fonte: Próprio autor

Figura 94: Diagrama Força-Tensão na armadura – Laje B com capa e continuidade



Fonte: Próprio autor

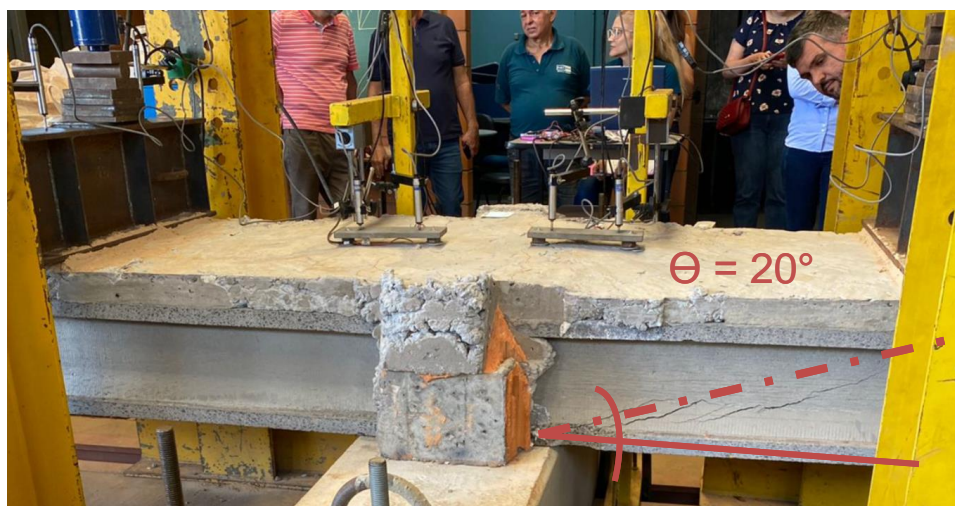
Figura 95: Diagrama Força-Rotação – Laje com capa e continuidade



Fonte: Próprio autor

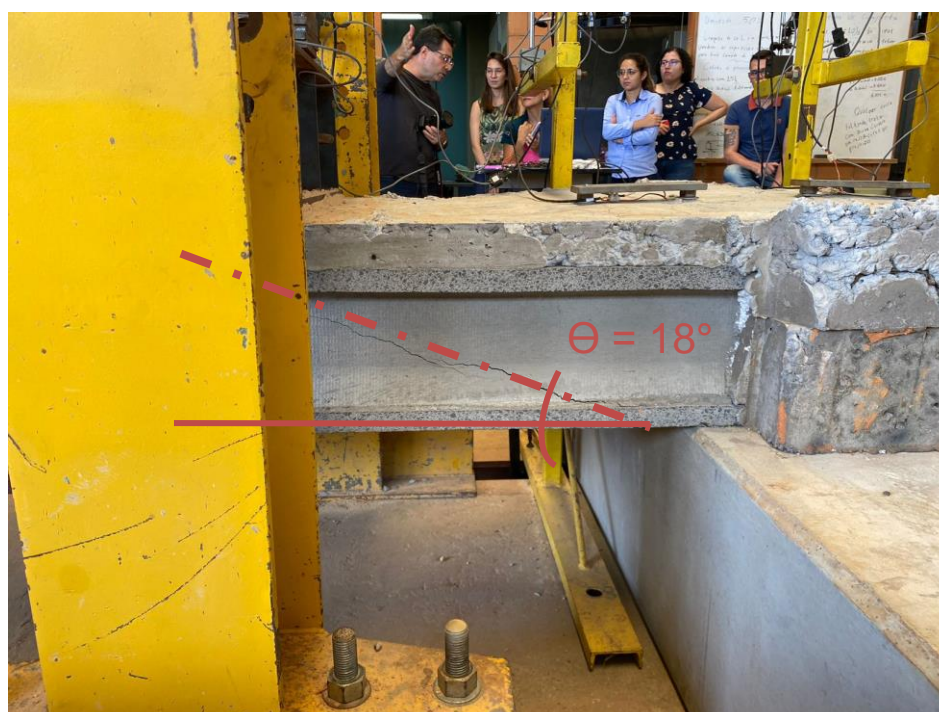
Pode-se ver pelas Figuras 96 e 97 que o modo de ruptura da laje foi pelo mecanismo de tração diagonal na Laje A, tendo a inclinação da fissura aproximadamente de 20°.

Figura 96: Fissura de Ruptura – Laje A com capa e continuidade



Fonte: Próprio autor

Figura 97: Fissura de Ruptura – Laje B com capa e continuidade



Fonte: Próprio autor

Para verificação da capacidade total do sistema, levou-se os atuadores hidráulicos a suas extensões totais, com o intuito de se observar o comportamento da



ligação. Com a extensão total, houve uma grande abertura na região das fissuras causadas pela ruptura, porém as armaduras positivas protendidas não perderam a ancoragem na região do apoio central, não deixando as lajes caírem (Figura 98). É possível observar que, nessa situação final, a capa de concreto está completamente destacada da laje e já trabalha como um elemento isolado, sendo que sofreu ruptura, depois a abertura total dos atuadores hidráulicos (Figura 99)

Ao se retirar a viga central da posição do ensaio, ainda se tem aderência entre concreto da capa e concreto da laje na região onde existe a armadura exposta presente na viga de apoio (Figura 100). Com a retirada da viga e averiguação da situação das nervuras da laje alveolar, foi verificado que o concreto apresenta agregados pequenos e regiões de incorporação de ar na pasta, o que pode ter diminuído a capacidade de engrenamento dos agregados.

Figura 98: Ancoragem das armaduras após ruptura da laje – Laje B com capa e continuidade



Fonte: Próprio autor

Figura 99: Situação do sistema após ensaio



Fonte: Próprio autor

Figura 100: Aderência entre concreto da laje e da capa e situação do concreto nas nervuras



Fonte: Próprio autor

Os valores encontrados nos ensaios foram comparados, então, com os valores teóricos, considerando as características indicadas em projetos e com os valores estimados a partir do ensaio de lajes sem capa e com capa. A análise é apresentada no capítulo sete.



# 7. ANÁLISES DE RESULTADOS

A partir dos ensaios realizados, têm-se as análises dos dados e discussões. É feita a análise para a cada situação de ensaio, observando de maneira mais aprofundada os resultados obtidos durante o programa proposto.

## 7.1 ANÁLISE DE ENSAIO DE LAJE ALVEOLAR SEM CAPA

Para o ensaio de laje sem capa, foi observado que, de acordo com o padrão da fissura de ruptura, o mecanismo de falha se deu por tração diagonal. Pode-se afirmar que o modo de ruptura é de tração diagonal por três motivos:

1. Distância de regularização não apresenta fissuração por flexão;
2. A angulação da fissura observada está dentro do preconizado para esse tipo de ruptura ( $27^\circ$ );
3. Diagrama Força-Deslocamento mostra padrão de ruptura clássica por cisalhamento.

A partir do resultado do ensaio, é comparado o valor alcançado com os valores teóricos e mostrado na Tabela 11.

Tabela 11: Comparação de Resultado Teóricos x Resultados de Ensaio - Laje sem capa

Comparação de Resultado Teóricos x Resultados de Ensaio - Laje sem Capa		
	Teórico	Laje 1
Resistência Flexo-Cortante - $V_{Rk,fl}$ (kN)	129,91	137,50
Resistência Tração Diagonal - $V_{Rk,c}$ (kN)	152,60	157,25
Força Cortante Máxima Ensaio - $V_{Ensaio}$ (kN)	164,2	164,2
$V_{Ensaio}/V_{Rk,fl}$	1,26	1,19
$V_{Ensaio}/V_{Rk,c}$	1,08	1,04

Fonte: Próprio autor

Com a comparação de resultados, pode-se entender que as características da seção transversal e a tensão de protensão consideradas para a verificação a resistência da laje (cálculo no Apêndice A) estão dentro da realidade.

A partir dos resultados, também pode-se dizer que para a laje estudada a equação da norma ABNT NBR14861:2022 apresenta resultado compatível para seções de lajes alveolares poligonais, a qual modifica a posição do ponto crítico de acordo com a menor somatória da largura das nervuras.

Sendo assim, é entendido que o dimensionamento teórico das resistências das lajes com capa e contínuas tem seus parâmetros de cálculo utilizados em relação à resistência do concreto e tensão de protensão confirmados.

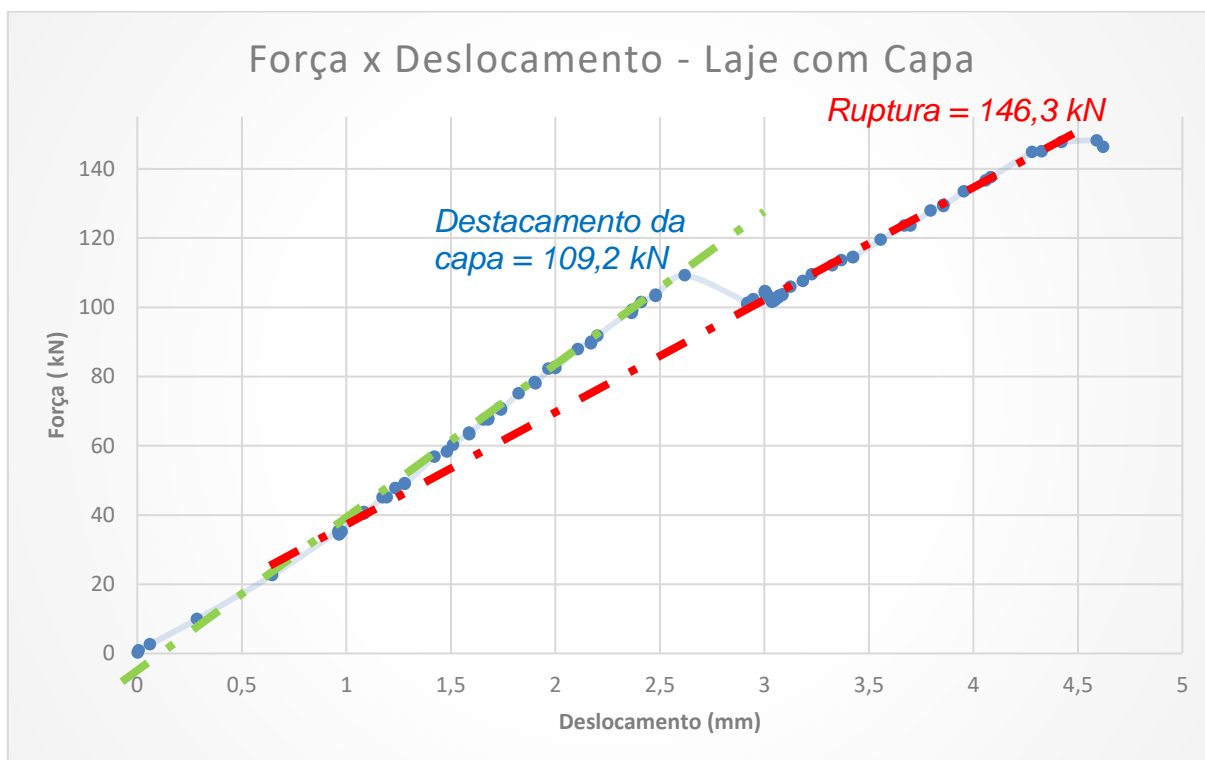
## **7.2 ANÁLISE DE ENSAIO DE LAJE ALVEOLAR COM CAPA**

Para o ensaio de laje com capa, foi observado que, de acordo com o padrão da fissura de ruptura, o mecanismo de falha se deu por flexo-cortante, contudo algumas situações de ensaio fizeram com que o resultado fosse abaixo do teórico.

Antes da realização do ensaio, foi verificado o destacamento prévio da capa em relação à laje. Esse destacamento pode ter ocorrido devido ao transporte da laje até o local do ensaio já com a capa colocada, mas também pode ter ocorrido devido aos esforços causados pelo aumento da contra-flecha por fluência durante a cura do concreto.

Durante o ensaio, houve um estalo no instante em que a ação concentrada alcançou a intensidade 109,2 kN (75% da ação de ruptura -  $\tau(y)=352,55 \text{ kN/m}^2 = 0,353 \text{ MPa}$ ), sendo observado que houve um aumento do destacamento na capa. Essa observação pode ser corroborada com o aumento de deslocamento da laje observado no diagrama força-deslocamento quando se alcança a ação de 109,2 kN e a partir do abatimento na reta força-deslocamento após o escorregamento (Figura 101).

Figura 101: Diagrama Força-Deslocamento com linhas de tendência – laje com capa



Fonte: Próprio autor

Com essa situação, no instante da ruptura, a força cortante alcançada foi menor que a calculada, o que se pode ver na Tabela 12 de comparação.

Tabela 12: Comparação de Resultado Teóricos x Resultados de Ensaio - Laje com capa

Comparação de Resultado Teóricos x Resultados de Ensaio - Laje com Capa		
	Teórico	Laje 1
Resistência Flexo-Cortante - $V_{Rk,fl}$ (kN)	151,11	159,15
Resistência Tração Diagonal - $V_{Rk,c}$ (kN)	173,33	178,86
Força Cortante Máxima Ensaio - $V_{Ensaio}$ (kN)	129,9	129,9
$V_{Ensaio}/V_{Rk,fl}$	0,86	0,82
$V_{Ensaio}/V_{Rk,c}$	0,75	0,73

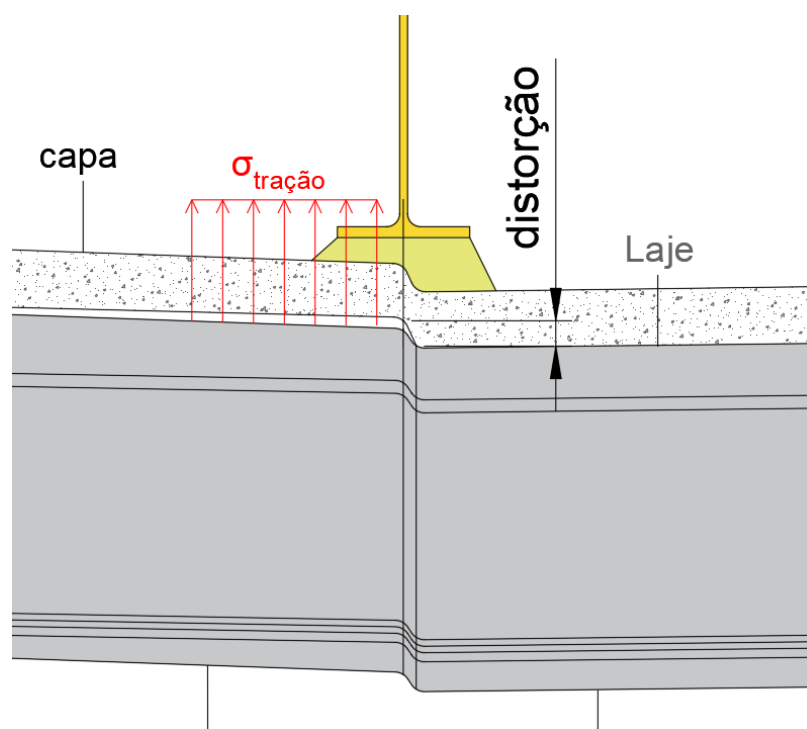
Fonte: Próprio autor

As razões observadas para modificação da resistência da laje em relação ao cisalhamento são a deformação imposta na laje devido à ação concentrada e à distância entre a ação concentrada e o centro do apoio.

Em relação à deformação da laje alveolar com capa quando existe uma ação concentrada, entende-se que a distorção na região da carga faz com que apareça

uma tensão de tração na interface entre laje e capa (Figura 102). Essa tensão de tração não é levada em consideração no dimensionamento da tensão solicitante na interface, sendo, então, o resultado encontrado para essa tensão solicitante inválido nessa situação.

Figura 102: Idealização da tensão de tração devido à distorção do sistema



Fonte: Próprio autor

Em relação à distância entre a ação concentrada e o apoio, o ensaio foi realizado para a situação da laje com capa de concreto formando uma seção composta. Com isso, a distância utilizada foi de 775mm (2,46h considerando h de 315mm).

Contudo, com o destacamento da capa, a altura resistente passou a ser a altura da laje simples (265mm) o que fez com a distância aumentasse para 2,92h, fazendo com que, possivelmente, ocorra fissurações na região de transferência de protensão e um aumento na possibilidade de escorregamento da armadura de protensão.

Com a fissuração e a presença de uma alta tensão de cisalhamento, a resistência na região é dada pela interação entre momento e cortante, fazendo com que a resistência da laje ao cisalhamento diminua.

Por esses motivos apresentados, entende-se a necessidade de inclusão de armadura de ligação entre a laje e capa quando existirem ações concentradas, para melhorar a eficiência na interface e garantir o funcionamento da seção composta.

### 7.3 ANÁLISE DE ENSAIO DE LAJE ALVEOLAR COM CAPA E CONTINUIDADE

Para o ensaio de lajes com capa e continuidade, foi observado que, de acordo com o padrão da fissura de ruptura, o mecanismo de falha se deu por tração diagonal, corroborando com o que foi previsto na verificação teórica do ensaio. A angulação da ruptura é de  $19^\circ$  em médio, o que está de acordo com o mecanismo verificado.

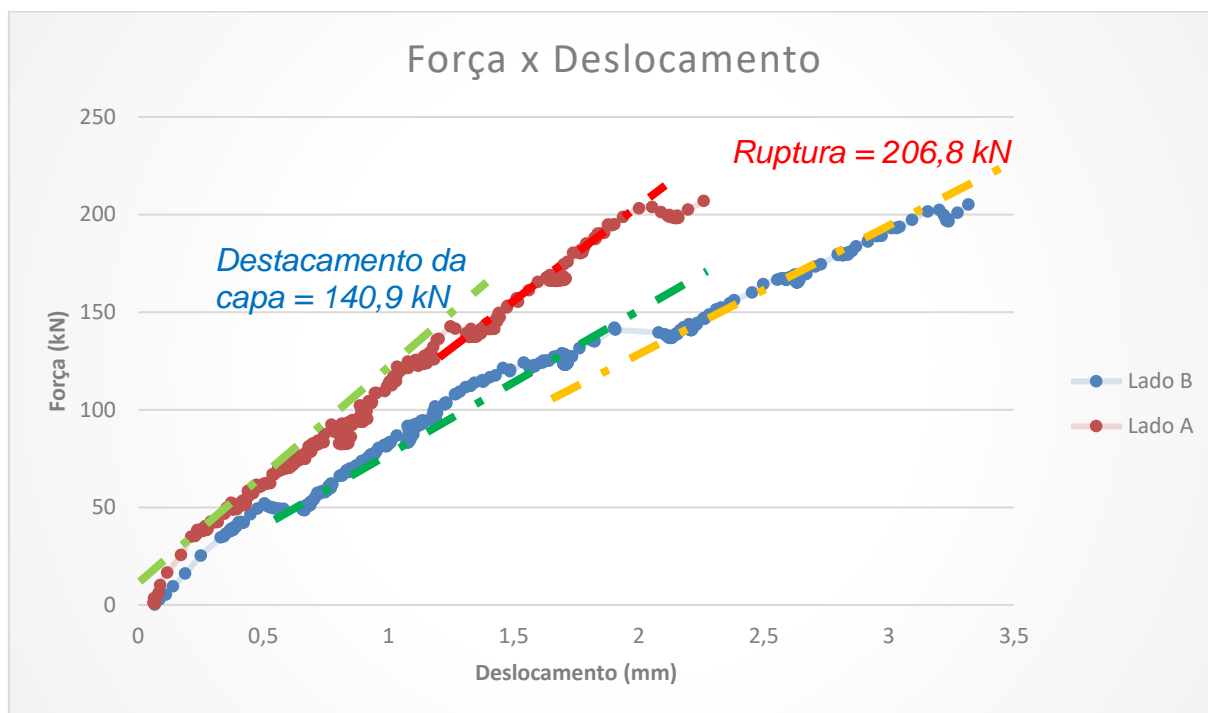
No ensaio, houve um estalo no instante em que a ação concentrada alcançou a intensidade 140,9 kN (68% da ação de ruptura -  $\tau(y)=459,9 \text{ kN/m}^2 = 0,460 \text{ MPa}$ ), sendo observado que houve o aparecimento do início do destacamento na capa no Lado B (Figura 103). Essa observação pode ser corroborada com o aumento de deslocamento da laje observado no diagrama força-deslocamento quando se alcança a ação de 140,6 kN, contudo não há modificação de rigidez visível no comportamento do sistema, pois não houve o abatimento da curva força deslocamento (Figura 104). O motivo do destacamento é o mesmo do observado no ensaio laje com capa biapoiado.

Figura 103: Início do destacamento da capa – laje com capa e continuidade



Fonte: Próprio autor

Figura 104: Diagrama Força-Deslocamento com linhas de tendência – laje com capa e continuidade



Fonte: Próprio autor

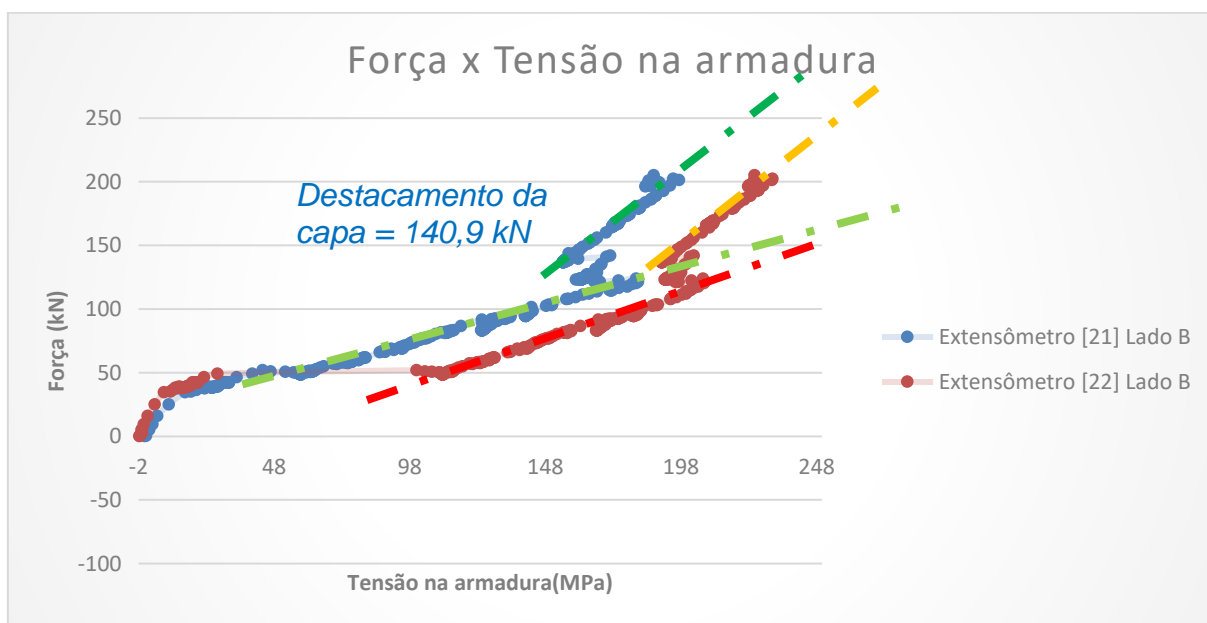
Em relação à leitura localizada dos extensômetros, obtiveram-se resultados possíveis de se comparar apenas no lado B do ensaio. Pode-se observar pelo diagrama força – tensão na armadura que as barras sofrem a mesma mobilização, tendo um instante de redistribuição próximo ao início do descolamento da capa e um aumento da sua mobilização após o descolamento (Figura 105). É provável que a partir do descolamento, a armadura da capa comece a atuar como um tirante, sendo ele ancorado na parte remanescente aderida da capa na laje alveolar.

No que se trata da verificação da rotação nos apoios, é possível observar uma perda de rigidez da ligação próximo à força que causa o momento de fissuração (38 kN e 36,6 kNm no lado B), pois há um abatimento nos diagramas força – rotação, mostrando que há um aumento do giro após a fissuração.

Existiu também uma pequena perturbação próximo da ação, a qual houve o descolamento parcial da capa de concreto. Contudo, ao se chegar na ação que ocorre o estalo durante o ensaio, é possível observar a modificação do comportamento da rigidez à rotação de ambos os lados, tendo o Lado A mantendo sua rigidez praticamente inalterada, enquanto do Lado B há um aumento da rigidez do sistema.

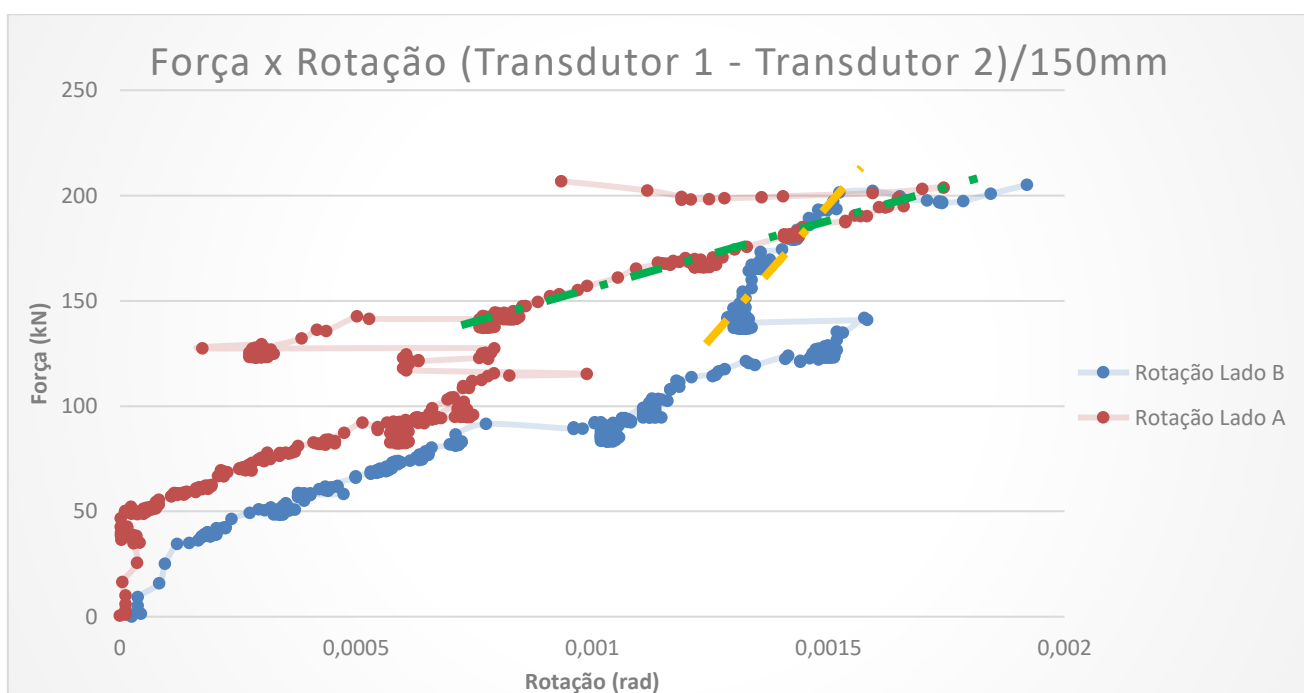
Com isso, é provável que a capa se manteve aderida na laje do Lado A, enquanto do Lado B o mecanismo resistente foi modificado, utilizando a armadura de continuidade como um tirante (Figura 106).

Figura 105: Diagrama Força-tensão na armadura com linhas de tendência – laje com capa e continuidade



Fonte: Próprio autor

Figura 106: Diagrama Força-rotação – laje com capa e continuidade



Fonte: Próprio autor

Sendo assim, a partir do resultado do ensaio, é comparado o valor alcançado com os valores teóricos e mostrado na Tabela 13. A resistência máxima foi considerada a do momento da ruptura na laje do Lado A.

Tabela 13: Comparação de Resultado Teóricos x Resultados de Ensaio - Laje com capa e continuidade

Comparação de Resultados Teóricos x Resultado de Ensaio - Laje com Capa e Contínua			
	Teórico	Laje A	Laje B
Resistência Flexo-Cortante - $V_{Rk,fl}$ (kN)	151,11	162,78	174,59
Resistência Tração Diagonal - $V_{Rk,c}$ (kN)	173,33	189,14	199,79
Força Cortante Máxima Ensaio - $V_{Ensaio}$ (kN)	195,5	195,5	195,5
$V_{Ensaio}/V_{Rk,fl}$	1,29	1,20	1,12
$V_{Ensaio}/V_{Rk,c}$	1,13	1,03	0,98*

\* A ruptura se deu na laje com menor resistência, não alcançando a capacidade da Laje B

Fonte: Próprio autor

A partir, então, dos resultados deste ensaio e da verificação feita em Santos (2014), tem-se que alguns pontos na situação de lajes alveolares contínuas precisam ser observados.

Em relação à carga concentrada sobre um elemento composto, há a possibilidade da deformação por distorção ser uma das causas do destacamento da capa. Tanto em Santos (2014), no qual o destacamento se iniciou com uma ação concentrada com 85% da intensidade da total, quanto no ensaio realizado nesse trabalho, no qual o destacamento se iniciou com a ação com 68% da total, observa-se a possibilidade do aparecimento de tensões de tração entre a capa e a laje, o que pode diminuir a capacidade resistente do sistema.

Ainda em relação ao destacamento entre a capa e a laje, é observado que em Santos (2014), pela ação acontecer mais ao centro da laje (6,67h), o efeito da distorção ocorreu com a ação mais alta, pois o deslocamento por flexão da laje foi preponderante. Já na situação do ensaio realizado neste trabalho, pela ação estar localizada próximo do apoio, o efeito da distorção ocorreu para ações menores, pois o deslocamento por flexão é pequeno.

Em ambos os casos, é entendido que para se alcançar a melhor eficiência da laje, é necessário adicionar armaduras de costura entre a laje alveolar e a capa.

Em relação à situação após a ruptura das lajes, percebe-se que há um mecanismo secundário de resistência, o qual foi responsável por não ocorrer a queda



das lajes de seus apoios mesmo com a ruptura por tração diagonal. É possível observar a presença de um possível modelo de biela e tirante, o qual aumenta a tensão de compressão na região do apoio da laje, garantindo, assim, a ancoragem das armaduras de protensão. Neste mesmo sistema, a armadura de continuidade se transforma em tirante, desde que ela esteja ancorada no concreto da capa ainda aderida na laje e também aderida na região do apoio devido à armadura necessária para seção composta. Essa idealização pode ser observada na Figura 107.

Figura 107: Mecanismo secundário – laje com capa e continuidade



Fonte: Próprio autor

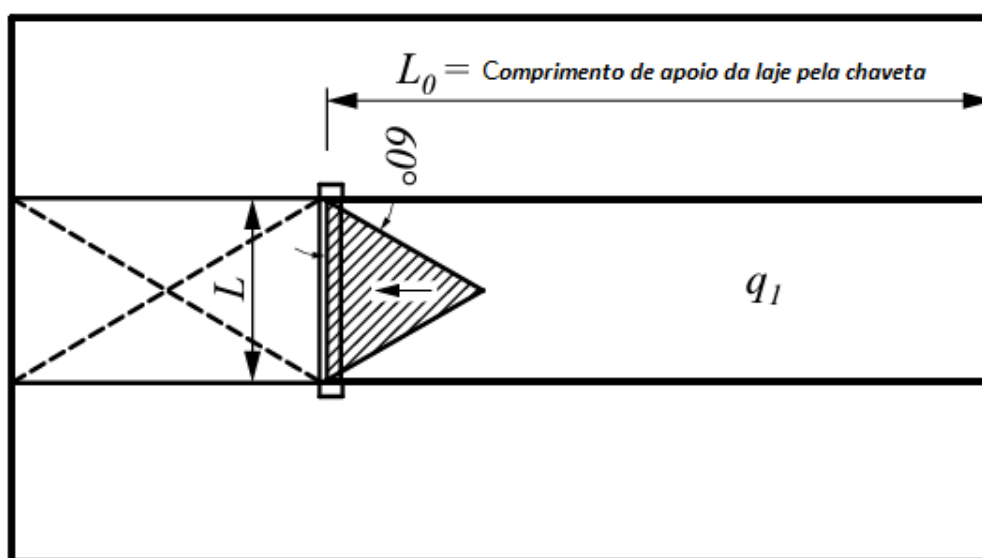
Sendo assim, é possível o mecanismo de falha por tração diagonal em elementos com ações concentradas. Contudo, é necessário que a interface entre a laje e a capa seja reforçada com a colocação de armaduras de costura, e que a região de transferência de protensão do aço e concreto esteja livre de possíveis fissuras de flexão, sendo, então, a continuidade uma saída para controle de esforços nessa região.

Finalmente, deve se salientar que a situação em que o ensaio foi realizado é crítica, pois apresenta apenas duas lajes contínuas. As obras as quais utilizam lajes alveolares apresentam diversas unidades adjacentes, o que faz com que a

possibilidade de redistribuição da ação de uma laje para as laterais possa ocorrer, como visto na revisão bibliográfica.

Diferentemente do que é visto tanto na FIB (2019) quanto no PCI (2015), entende-se que ao se existir o mecanismo secundário de resistência das lajes alveolares, há a possibilidade da redistribuição da ação concentrada perto dos apoios para lajes adjacentes pela chaveta. Tal mecanismo é visto no dimensionamento de elementos de apoio em lajes para execução e aberturas (Figura 108).

Figura 108: Distribuição de ações em lajes com aberturas



Fonte: Peikko (2016)

## 8. CONCLUSÃO

Lajes alveolares são elementos de vasta utilização nas construções atuais e, dessa forma, elas podem estar submetidas a diferentes tipos de carregamentos. É imprescindível, portanto, o entendimento dos mecanismos resistentes desse tipo de elemento.

Como verificado na revisão bibliográfica e em ensaios, informações sobre lajes alveolares contínuas com capa estrutural submetidas a ações concentradas ainda são escassas. Torna-se necessário realizar uma investigação mais profunda sobre o assunto, para que seja amplamente compreendido.

A partir do ensaio de laje sem capa, foi possível se observar que o resultado da equação de dimensionamento de lajes com alvéolos poligonais está compatível com o resultado experimental, considerando a modificação do ponto crítico da laje.

Para o ensaio de laje com capa, foi possível observar o destacamento da capa devido a ações concentradas que acontecem, e se entende que a causa desse destacamento é a presença de deformação por distorção na laje. A distorção causa então uma tensão de tração entre a capa e a laje, a qual só será resistida com a presença de armadura de costura entre esses elementos. Sem a presença da armadura de ligação, a laje deverá ser dimensionada como um elemento com seção simples, sendo necessário, então, verificar se é possível o dimensionamento a partir do mecanismo de tração diagonal.

Para lajes alveolares com capa e continuidade, foi verificado que é possível se alcançar o mecanismo de tração diagonal para cargas concentradas. Esse mecanismo pode ser até preponderante nas situações de continuidade por existir uma menor possibilidade de fissura por flexão na região do comprimento de transferência de protensão, garantindo, assim, a integridade da seção. Contudo, igualmente ao que acontece na situação com laje com capa sem continuidade, há a necessidade de imposição de armadura de costura entre laje e capa para se garantir o funcionamento da seção composta.

Pode-se observar também na situação com continuidade que, após a ruptura das lajes, mecanismos secundários de resistência acontecem no sistema (como o mecanismo de biela e tirante), garantindo que as armaduras de protensão se

mantenham ancoradas no apoio de continuidade, não deixando que ocorra a queda das lajes alveolares e garantindo uma redistribuição de ação para lajes adjacentes.

### **8.1 – PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS**

Muitos assuntos ainda devem ser aprofundados no estudo de lajes alveolares contínuas, ações concentradas e mecanismo resistente a partir da tração diagonal. Sendo assim, seguem algumas propostas que não foram aprofundadas nesse trabalho, mas que são de extrema importância para o desenvolvimento do sistema estrutural:

- Verificação do funcionamento em conjunto do pavimento de lajes alveolares com capa para ações concentradas com e sem continuidade;
- Verificação de mecanismo de ruptura para lajes alveolares contínuas com armadura de costura entre laje alveolar e capa de concreto moldada no local;
- Verificar a capacidade resistente de lajes alveolares com seções maiores que 400mm para o mecanismo de tração diagonal.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2006). NBR 9062: **Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado**. Rio de Janeiro, 42 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2022). NBR 14861: Laje pré-fabricada – painel alveolar de concreto protendido – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro,

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2014). NBR 6118: **Projeto de Estruturas de Concreto - procedimento**. Rio de Janeiro, 238 p.

ASSOCIATION OF MANUFACTURERS OF PRESTRESSED HOLLOW CORE FLOORS (ASSAP). The hollow core floor design and applications.1.ed. Belfiore, Verona, Italy, 2002.

ASWAD, A.; JACQUES, F. J.. Behavior of hollow-core slabs subject to edge loads. PCI Journal. 1992.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Eurocode 2: Design of Concrete Structures: Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings**. British Standards Institution, 2004.

CARVALHO, R. C. Estruturas em concreto protendido – pós-tração – pré-tração – cálculo e detalhamento. 2.ed. Sao Paulo: PINI, 2017.

CATOIA, B. Lajes alveolares protendidas: cisalhamento em região fissurada por flexão. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de Sao Paulo, Sao Carlos, 2011.

DERKOWSKI, W.; SURMA, M. Composite action of precast hollow core slabs with structural topping. Technical Transactions. 2015

DERKOWSKI, W.; SURMA, M. Torsion of precast hollow core slabs. Technical Transactions. 2015

EL DEBS, **Concreto Pré-moldado: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo. Oficina de textos, 2017.

ELLIOTT, K. S. Transmission length and shear capacity in prestressed concrete hollow core slabs. Magazine of Concrete Research v.66, n.12, p.585-602, 2014.

ELLIOTT, K. S.; JOLLY, C. **Multi-storey precast concrete framed structures**. Wiley, 2013.

EUROCODE 2 Commentary. European Concrete Platform ASBL. 2008.

FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINTE (FIP). Guide to Good Practice – Composite Floor Structures. London. United Kingdom. 1998

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). Design of precast prestressed hollow core floors, Draft. Belgium, 2019.

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON (FIB). Model code 2010 – First complete draft. Lausanne, Switzerland, 2010.

GIRHAMMAR, U. A.; PAJARI, M. Tests and analysis on shear strength of composite slabs of hollow core units and concrete topping. Construction and Building Materials. v.22, n.8, p.1708-1722, Aug. 2008.

HEDMAN, O.; LOSBERG, A. Design of concrete structures with regard to shear forces. In Shear and Torsion. CEB Bulletin d'Information no 126. Paris, 1978.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE (FIB). Special design considerations for precast prestressed hollow core floors. Lausanne, Switzerland, 2000.

KONG, F. K.; EVANS, R. H. Reinforced and prestressed concrete. Spon Press, United Kingdom, 2001.

LAGUE, D. J.. Load distribution tests on precast prestressed hollow-core slab construction. PCI Journal. 1971.

MACIEL, A. M. M. Influência da variação geométrica dos alvéolos na capacidade resistente ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas. 137f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2017.

MARQUESI, M. L. G. Contribuição ao estudo dos mecanismos resistentes à força cortante em lajes alveolares protendidas. 2014. 144p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, Sao Carlos, 2014.

PAJARI M. Resistance of prestressed hollow core slabs against web shear failure. VTT Technical Research Centre of Finland, Research Notes 2292, 2005.

PAJARI, M. Design of prestressed hollow core slabs. Technical research center of Finland. Espoo, Finland. Rep 567, 1989.

PEIKKO GROUP. **Petra slab hanger**: Hollow-core support for slab openings: catálogo de produtos. 2016. 34 p.

PÉRES, C.; PADILLA, P.; MUTTONI, A.; FERNÁNDEZ RUIZ, M. Effect of load distribution and variable depth on shear resistance of slender beams without stirrups. *Aci Structural Journal*, v. 109 n. 5, p. 595- 603, 2012

PETRUCELLI, N. S. Considerações sobre projeto e fabricação de lajes alveolares protendidas. 2009. 103p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. PCI Manual for the design of hollow core slabs. Prestressed Concrete Institute., 2015.

REINECK, K. H. **Shear transfer actions determining the shear capacity of slender structural concrete members without stirrups**. FIB Technical report v. 85 p. 81- 99, September 2016

RETTNE, L.; EDEKLING, K. Improved design method for webs shear tension failure in hollow core units. Master's Thesis – Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2006.

REVISTA INDUSTRIALIZAR EM CONCRETO. n.17, jul. 2019. 58 p.

SANTOS, A. P. Análise da continuidade em lajes alveolares: estudo teórico e experimental. 2014. 370p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola

de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SANTOS, L. C. A questão do método na investigação científica. Tecbaia Revista Baiana de Tecnologia, v.19, Maio/dez., 2004, p.5-12.

SONG, J., et al. Load distribution factors for hollow core slabs with in-situ reinforced concrete joints. International journal of concrete structures and materials. 2009.

STANTON, J. F. Response of hollow core slab floors to concentrated loads. PCI Journal. 1992

TUE, N. V; TUNG N. D. **Study on the influence of M/V-combination on the shear behavior of slender reinforced concrete beams without stirrups**. FIB Technical report v. 85 p. 100- 120, September 2016

WIGHT J.K.; MACGREGOR J.C.. Reinforced concrete – Mechanics and design. 6ª Ed. Pearson, 2012.

YANG, L. Design of prestressed hollow core slabs with reference to web shear failure. Journal of Structural Engineering. American Society of Civil Engineers (ASCE). Reston, VA, U.S.A. v.120, n.9, p.2675-2696, Sep. 1994.



## Apêndice A – Dimensionamento da laje alveolar protendida teórica

O dimensionamento para validação das lajes alveolares é feito a partir dos preceitos de concreto protendido presentes na norma ABNT NBR6118:2014 e Carvalho (2017). É feita a verificação de tensão de protensão após as perdas de protensão na seção da distância de regularização, a qual é utilizada para verificação de resistência à força cortante das lajes alveolares.

A verificação é feita tanto para a seção sem (mostrada no capítulo quatro) quanto para a seção com capa (mostrada no capítulo cinco) de concreto de 50mm de espessura, considerando que a resistência do concreto na liberação da protensão é de 30 Mpa, e a resistência total é de 50 MPa.

Para situação sem capa estrutural, tem-se que as características da laje são dadas na Tabela A1.

Tabela A1 – Características da seção sem capa

Seção Transversal - Sem capa								
Características Concreto			Características Armadura Inferior			Características Armadura Superior		
$f_{cj,libera}$	30	MPa	Aço	12,7	RB	Aço	7	RB
$f_{ck}$	50	MPa	$f_{ptk}$	1900	MPa	$f_{ptk}$	1700	MPa
$L_{laje}$	4,61	m	$f_{pyk}$	1710	MPa	$f_{pyk}$	1530	MPa
$b$	750	mm	$d'_{inf}$	45,00	mm	$d'_{sup}$	30	mm
$\sum b_w$	228	mm	$d_{laje,inf}$	220	mm	$d_{laje,sup}$	235	mm
$h_{tot,laje}$	265	mm	$A_{p,inf,cordoalha}$	99	mm <sup>2</sup>	$A_{p,sup,cordoalha}$	37,9	mm <sup>2</sup>
Área	105545,84	mm <sup>2</sup>	$n_{cordoalha,inf}$	6		$n_{cordoalha,sup}$	2	
$I_x$	898202287,56	mm <sup>4</sup>	$A_{p,inf}$	594,00	mm <sup>2</sup>	$A_{p,sup}$	75,80	mm <sup>2</sup>
$y_i$	130,53	mm	$e_{p,inf}$	85,53	mm	$e_{p,sup}$	104,47	mm
$W_i$	6881194,27	mm <sup>3</sup>	$\sigma_{pi,inf,máx}$	1453,50	MPa	$\sigma_{pi,sup,máx}$	1300,50	MPa
$W_s$	6679573,79	mm <sup>3</sup>	$E_p$	200000	MPa	$E_p$	200000	MPa
$y$	86,26	mm	$F_{pi,inf,máx}$	143,90	kN	$F_{pi,sup,máx}$	49,29	kN
$A$	51565,12	mm <sup>2</sup>	$F_{pi,inf,utilizado}$	122,72	kN	$F_{pi,inf,utilizado}$	47,12	kN
$S_x$	4448007,54	mm <sup>3</sup>	$\sigma_{pi,inf,utilizado}$	1239,60	MPa	$\sigma_{pi,inf,utilizado}$	1243,27	MPa

Fonte: Próprio autor

A partir das características da laje sem capa teórica, foram calculadas as perdas imediatas de protensão, que são devido à acomodação da ancoragem, à relaxação inicial e à deformação imediata do concreto no momento da liberação da protensão.

A primeira perda a ocorrer é a por acomodação da ancoragem, que é calculada a partir da lei de Hooke (Equação A1):

$$\Delta\sigma_{def,anc} = E_p \cdot \varepsilon = E_p \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad \text{Equação A1}$$

Na qual:

- $\Delta l$ : valor da acomodação da ancoragem fornecido pelo fabricante (6mm);
- $L$ : comprimento da pista de protensão (100m);
- $\varepsilon$ : deformação relativa provocado pela encurtamento da cordoalha.

Sendo assim, a perda por acomodação da ancoragem é calculada na tabela A2:

Tabela A2 – Cálculo da perda por acomodação da ancoragem

Perda por acomodação da ancoragem			
$\Delta l$	6	mm	
$L_{pista}$	100	m	
$\Delta\sigma_{def,anc}$	12	MPa	
$\sigma_{p01,sup}$	1231,27	MPa	0,97%
$\sigma_{p01,inf}$	1227,60	MPa	0,97%

Fonte: Próprio autor

A relaxação é a segunda perda imediata que ocorre. É um efeito que ocorre no aço quando solicitado sob alta tensão. Quando este se encontra tracionado, há uma tendência natural de perder tensão. Na pré-tração, esse efeito ocorre em dois momentos, sendo o primeiro quando a cordoalha esta alongada na pista de protensão antes de sua solidarização com o concreto, e o segundo a partir do momento em que a armadura passa a atuar junto ao concreto.

Sabendo qual essa relação, pode-se obter o valor do coeficiente  $\Psi_{1000}$  definido pela tabela 8.4 da NBR 6118:2014 (Tabela A3):

Tabela A3 – Perdas por relaxação para mil horas

**Tabela 8.4 – Valores de  $\Psi_{1000}$ , em porcentagem**

$\sigma_{po}$	Cordoalhas		Fios		Barras
	RN	RB	RN	RB	
0,5 $f_{ptk}$	0	0	0	0	0
0,6 $f_{ptk}$	3,5	1,3	2,5	1,0	1,5
0,7 $f_{ptk}$	7,0	2,5	5,0	2,0	4,0
0,8 $f_{ptk}$	12,0	3,5	8,5	3,0	7,0

Onde  
RN é a relaxação normal;  
RB é a relaxação baixa.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014

Considera-se que a protensão é liberada em um dia, sendo assim de acordo a ABNT NBR 6118:2014, a relaxação inicial é calculada a partir da equação A2:

$$\Psi_{(t,t_0)} = \Psi_{1000} * \left(\frac{t-t_0}{41,67}\right)^{0,15} \quad \text{Equação A2}$$

A perda calculada é mostrada na tabela A4.

Tabela A4 – Cálculo da perda por relaxação inicial

Perda por relaxação inicial					
$R_{inf}$	0,65	cordoalha	$R_{sup}$	0,72	fio
0,5	0,00		0,5	0,00	
0,6	1,30		0,6	1,00	
0,7	2,50		0,7	2,00	
0,8	3,50		0,8	3,00	
$\Psi_{1000}$	1,85		$\Psi_{1000}$	2,24	
$t_{liberação}$	0,83	dias	t	0,83	dias
$\psi(t,t_0)$	1,03		$\psi(t,t_0)$	1,25	
$\Delta\sigma_r$	12,65	MPa	$\Delta\sigma_r$	15,36	MPa
$\sigma_{p02,sup}$	1215,92	MPa	2,20%		
$\sigma_{p02,inf}$	1214,94	MPa	1,99%		

Fonte: Próprio autor

No momento em que a protensão passa a atuar na viga, ocorre uma deformação de encurtamento, provocado pela compressão do elemento. Como a armadura está aderida ao concreto, esse encurtamento ocorre, também, na armadura.

A definição dessa perda é obtida pela seguinte Equação A3:

$$\Delta\sigma_{def,conc} = \alpha_{p,i} * \left( \frac{N_p}{A} + \frac{N_p * e_p^2}{I} - \frac{M_{g1} * e_p}{I} \right) \quad \text{Equação A3}$$

Onde:

- $\alpha_{p,i}$ : relação  $E_p / E_c$  na idade da efetivação da;
- $N_p$ : força de protensão;
- $e_p$ : excentricidade entre a força de protensão e o centro de gravidade da seção de concreto;
- $M_{g1}$ : momento fletor do peso próprio da viga;
- $A$ : área da seção transversal da viga;
- $I$ : momento de inércia da seção transversal da viga.

Como se pode observar na equação, a perda por deformação do concreto ocorre de forma variada, dependendo do momento fletor de peso próprio atuando na seção. Analisando da seção em que termina a distância de regularização até o centro do vão (verificando também todas as seções intermediárias a cada 10% do vão), tem-se na tabela A5 e A6 a perda por deformação imediata do concreto.

Tabela A5 – Informações para cálculo da perda por deformação imediata do concreto

Perda por encurtamento imediato		
$N_{p,total}$	813,84	kN
$N_{p,sup}$	92,17	kN
$N_{p,inf}$	721,68	kN
$M_{p,sup}$	9628,62	kNmm
$M_{p,inf}$	61725,04	kNmm
$\alpha_{p,i}$	6,52	

Fonte: Próprio autor

Tabela A6 – cálculo da perda por deformação imediata do concreto por seção

Perda por encurtamento imediato							
	S Inicial	S1	S2	S3	S4	S5	
x	0,53	0,46	0,92	1,38	1,84	2,30	m
M <sub>g1</sub>	2,84	2,52	4,48	5,88	6,71	6,99	kNm
$\Delta\sigma_{p,sup}$	12,92	12,68	14,16	15,22	15,86	16,07	MPa
$\Delta\sigma_{p,inf}$	80,86	81,06	79,85	78,98	78,46	78,28	MPa
$\sigma_{p0,sup}$	1203,00	1203,24	1201,75	1200,69	1200,05	1199,84	MPa
	3,24%	3,22%	3,34%	3,42%	3,48%	3,49%	
$\sigma_{p0,inf}$	1134,08	1133,88	1135,10	1135,97	1136,49	1136,66	MPa
	8,51%	8,53%	8,43%	8,36%	8,32%	8,30%	

Fonte: Próprio autor

Calculadas as perdas imediatas, a tensão nas armaduras de protensão é a tensão no tempo zero. Essa tensão é utilizada como referência para cálculo das perdas diferidas, que são as perdas por retração do concreto, por fluência do concreto e por relaxação total da armadura.

Para o cálculo da retração e fluência, são necessárias algumas informações, sendo elas:

- U: Umidade média do ambiente;
- T: Temperatura média do ambiente;
- Slump do concreto da laje;
- Tipo de Cimento utilizado;
- u': Perímetro em contato com o ar de acordo com a etapa a ser considerada;
- t: idade final do elemento em dias;
- t<sub>0</sub>: idade inicial da imposição da ação.

Com isso, a Tabela A7 apresenta todas as informações necessárias para cálculo das perdas.

A retração é a variação volumétrica do concreto que tende a reduzir seu volume. Dentre outras coisas, ocorre pela saída de água que não reagiu com o cimento. Alguns parâmetros que interferem neste fenômeno são: temperatura ambiente; umidade do ambiente; geometria da seção e a plasticidade do concreto.

Sendo um processo que interfere no concreto, sua perda é uniforme para todas as seções. Seu cálculo depende da deformação de retração, que pode ser encontrado a partir do anexo A da ABNT NBR 6118:2014. Ao se calcular a deformação por retração, o cálculo da perda é feito a partir da Equação A4:

$$\Delta\sigma_{\text{retração}} = E_p * \varepsilon_{cs}(t,t_0) \quad \text{Equação A4}$$

Tabela A7 – Informações para cálculo das perdas diferidas – laje sem capa

Perdas Diferidas							
Protensão/ Peso próprio - M <sub>g1</sub>			PP capa - M <sub>g2</sub>			Carga Pontual - M <sub>g3</sub>	
t	30,00	dias	t	0,00	dias	t	38,00 dias
t <sub>0</sub>	0,83	dias	t <sub>0</sub>	0,00	dias	t <sub>0</sub>	38,00 dias
PP	2,64	kN/m	PP capa	0,00	kN/m		
U	70,00	%	U'-laje <sub>ar</sub>	4690,25	mm	Comb. Q. Perm.	0,40
T	20,00	°C	U'-laje+capa <sub>ar</sub>	3940,25	mm	α <sub>p,f</sub>	5,05
Slump	0,00	cm	U' - etapa 3	2769,38	mm		
Cimento	CP V-ARI		U' - etapa 4	2019,38	mm		
			U' - etapa 5	750	mm		

Fonte: Próprio autor

A deformação de retração é calculada na Tabela A8. Já a perda por retração é calculada na Tabela A9.

Tabela A8 – Cálculo de deformação de retração para data específica pelo anexo A da ABNT NBR 6118:2014

Retração			
γ	1,45	A	40
h (cm)	6,522927	B	8,38
h <sub>fic</sub> (cm)	4,50	C	40,13
ε <sub>15</sub> (5-9)	-4,98	D	28,02
ε <sub>15</sub> (10 <sup>4</sup> )	-3,73	E	0,76
ε <sub>25</sub>	1,22	β <sub>s</sub> (t <sub>0</sub> )	0,18
ε <sub>cs∞</sub> (10 <sup>4</sup> )	-4,57	β <sub>s</sub> (t)	0,48
t <sub>0</sub> fic (dias)	3	ε <sub>cs</sub> (‰)	-0,14
t fic (dias)	30		

Fonte: Próprio autor

Tabela A9 – Cálculo da perda por retração para data específica

Perdas por retração							
	S ini	S1	S2	S3	S4	S5	
x	0,53	0,46	0,92	1,38	1,84	2,30	m
$\epsilon_{cs}(t, t_0)$	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	‰
$\Delta\sigma_{p,s}$	27,80	27,80	27,80	27,80	27,80	27,80	MPa

Fonte: Próprio autor

De forma simplificada, a fluência ocorre como consequência de uma ação introduzida em um determinado momento e que se mantém aplicada ao longo do tempo, como é o caso da protensão atuando de forma contínua no concreto.

A fluência varia de seção para seção, e seu cálculo implica em definir o coeficiente de fluência ( $\varphi_{(t_{\infty}, t_0)}$ ) pelo anexo A da ABNT NBR 6118:2014, de forma semelhante àquela ocorrida na retração.

Em seguida, é preciso definir qual a tensão no concreto na altura do centro de gravidade da armadura considerando os carregamentos permanentes (Equação A5).

$$\sigma_{CG,p} = \frac{N_p}{A} + \frac{N_p * e_p^2}{I} - \frac{(\sum M_g + \Psi_2 * M_q) * e_p}{I} \quad \text{Equação A5}$$

Onde:

- $N_p$ : força de protensão no tempo zero;
- $e_p$ : excentricidade entre a força de protensão e o centro de gravidade da seção de concreto;
- $\sum M_g$ : somatório dos momentos fletores decorrentes de ações permanentes;
- $M_q$ : momento fletor decorrente da ação acidental;
- $\Psi_2$ : coeficiente de combinação de ações quase permanente;
- $A$ : área da seção transversal da viga;
- $I$ : momento de inércia da seção transversal da viga

O coeficiente de fluência é calculado na Tabela A10. Já a perda por fluência é calculada na tabela A11.

Tabela A10 – Cálculo do coeficiente de fluência para data específica pelo anexo A da ABNT NBR 6118:2014.

Fluência			
$f_c(t_0)$	11,49	$t_0$ fic (dias)	9
$f_c(t_\infty)$	36,26	t fic (dias)	90
h (cm)	6,52	$\beta_d(t)$	0,67
$h_{fic}$ (cm)	4,50	A	149,88
$\varphi_a$	0,55	B	175,14
$\varphi_{1c}$ (5-9)	2,00	C	254,10
$\varphi_{1c}$	1,50	D	4102,70
$\varphi_{2c}$	1,90	$\beta_f(t_0)$	0,07
$\varphi_{f\infty}$	2,85	$\beta_f(t)$	0,62
$\varphi(t,t_0)$	2,38		

Fonte: Próprio autor

A perda por fluência é, então, calculada pela Equação A6.

$$\Delta\sigma_{fluência} = \alpha_{p,f} * \sigma_{cgp} * \varphi(t_\infty, t_0)$$

Equação A6

Onde:

- $\alpha_{p,f}$ : relação  $E_p / E_c$  na idade de 28 dias do concreto;

Tabela A11 – Cálculo da perda por fluência para data específica

Perdas por fluência							
	S ini	S1	S2	S3	S4	S5	
x	0,53	0,46	0,92	1,38	1,84	2,30	m
$N_{p,Sup}$	91,19	91,21	91,09	91,01	90,96	90,95	kN
$N_{p,Inf}$	673,64	673,53	674,25	674,76	675,07	675,18	kN
$M_{p,Sup}$	9,53	9,53	9,52	9,51	9,50	9,50	kNm
$M_{p,Inf}$	57,62	57,61	57,67	57,71	57,74	57,75	kNm
$N_{p,total}$	764,83	764,73	765,34	765,78	766,04	766,13	kN
$M_{g1}$	2,84	2,52	4,48	5,88	6,71	6,99	kNm
$\varphi_1$	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38	
$M_{g2}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	kNm
$\varphi_2$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
$M_{g3}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	kNm
$\varphi_3$	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	
$\Delta\sigma_{p,cr,Sup}$	23,86	23,42	26,13	28,06	29,22	29,61	MPa
$\Delta\sigma_{p,cr,Inf}$	139,04	139,38	137,29	135,79	134,90	134,60	MPa

Fonte: Próprio autor



Por último, a relaxação total é calculada encontrando a porcentagem de perda para o tempo infinito a partir da Equação A7.

$$\Psi_{(\infty,t_0)} = 2,5 * \Psi_{1000} \quad \text{Equação A7}$$

O cálculo da perda por relaxação é dado na Tabela A12.

Tabela A12 – Cálculo da perda por relaxação para data específica

Perdas por Relaxação Total							
	S ini	S1	S2	S3	S4	S5	
x	0,53	0,46	0,92	1,38	1,84	2,30	m
$\sigma_{p0,sup}$	1203,00	1203,24	1201,75	1200,69	1200,05	1199,84	MPa
R	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	
$\psi_{1000}$	2,08	2,08	2,07	2,06	2,06	2,06	%
$\psi(t,t_0)$	1,97	1,97	1,96	1,96	1,95	1,95	%
$\Delta\sigma_{p,r}$	23,68	23,70	23,57	23,48	23,42	23,40	MPa
$\sigma_{p0,inf}$	1134,08	1133,88	1135,10	1135,97	1136,49	1136,66	MPa
R	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	
$\psi_{1000}$	1,26	1,26	1,27	1,27	1,28	1,28	%
$\psi(t,t_0)$	1,19	1,19	1,20	1,21	1,21	1,21	%
$\Delta\sigma_{p,r}$	13,54	13,52	13,63	13,70	13,75	13,76	MPa

Fonte: Próprio autor

Como as perdas diferidas são calculadas isoladamente, pode-se, de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014, fazer o cálculo das perdas progressivas a partir da Equação A8.

$$\Delta\sigma_p(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{cs}(t,t_0) \cdot E_p - \alpha_p \cdot \sigma_{c,p0g} \cdot \phi(t,t_0) - \sigma_{p0} \cdot \chi(t,t_0)}{\chi_p + \chi_c \cdot \alpha_p \cdot \eta \cdot \rho_p} \quad \text{Equação A8}$$

Sendo assim, as perdas progressivas e as tensões de protensão na armadura no instante do ensaio são mostradas na Tabela A13.

Tabela A13 – Perdas progressivas e tensões na armadura no instante do ensaio

Perdas Diferidas Totais - Progressiva							
	S ini	S1	S2	S3	S4	S5	
x	0,53	0,46	0,92	1,38	1,84	2,30	m
$\chi_p$	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	
$\chi_c$	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	
$\eta$	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	
$\rho_p$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
$\alpha_p$	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	
$\Delta\sigma_{pt}$	72,58	72,18	74,67	76,44	77,51	77,87	MPa
$\sigma_{pso,Inf}$	1130,42	1131,06	1127,09	1124,25	1122,54	1121,97	MPa
	9,08%	9,03%	9,35%	9,57%	9,71%	9,76%	%
$\chi_p$	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	
$\chi_c$	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	
$\eta$	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	
$\rho_p$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
$\alpha_p$	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	
$\Delta\sigma_{pt}$	159,93	160,22	158,45	157,18	156,43	156,17	MPa
$\sigma_{pso,Inf}$	974,15	973,66	976,65	978,78	980,06	980,49	MPa
	20,65%	20,69%	20,44%	20,27%	20,16%	20,13%	%

Fonte: Próprio autor

Posto isso, a tensão de protensão existente na seção após a distância de regularização é de 974,15MPa para a armadura de protensão inferior, e 1130,42MPa para a armadura de protensão superior.

Para a situação da laje com capa, há modificações nas características geométricas da seção transversal (Tabela A14) e nas perdas diferidas (Tabela A15 a A21).

Tabela A14 – Características Geométricas da seção com capa

Seção Transversal - Com capa					
$f_{ck,capa}$	30	MPa	$\alpha_{E,laje}$	1	Granito e Gnaiss
$h_{capa}$	50	mm	$\alpha_{E,capa}$	1	Granito e Gnaiss
$\sum b_w$	228	mm	$E_{ci,fcj}$	30672,46	MPa
$h_{tot,composto}$	315	mm	$E_{ci,fck}$	39597,98	MPa
$d_{composto}$	270,00	mm	$E_{ci,capa}$	30672,46322	MPa
Área <sub>homogen</sub>	134593,22	mm <sup>2</sup>	$\alpha$	0,77	
$I_{x, homogen}$	1483515060,74	mm <sup>4</sup>	$b_{ef}$	580,95	mm
$y_{i,composto}$	164,95	mm			
$W_i$	8993725,74	mm <sup>3</sup>			
$W_{s,mod}$	14827736,74	mm <sup>3</sup>			
$y'$	88,51	mm			
$A'$	72765,67	mm <sup>2</sup>			
$S'_x$	6440489,73	mm <sup>3</sup>			
$e_{p,Sup}$	120,05	mm			
$e_{p,inf}$	119,95	mm			

Fonte: Próprio autor

Tabela A15 – Informações para cálculo das perdas diferidas – laje com capa

Perdas Diferidas								
Protensão/ Peso próprio - $M_{g1}$			PP capa - $M_{g2}$			Carga Pontual - $M_{g3}$		
t	30,00	dias	t	30,00	dias	t	38,00	dias
$t_0$	0,83	dias	$t_0$	22,00	dias	$t_0$	38,00	dias
PP	2,64	kN/m	PP capa	0,94	kN/m			
U	70,00	%	$u'$ -laje <sub>ar</sub>	4690,25	mm	Comb. Q. Perm.	0,40	
T	20,00	°C	$u'$ -laje+capa <sub>ar</sub>	3940,25	mm	$\alpha_{p,f}$	5,05	
Slump	0,00	cm	$u'$ - etapa 3	2769,38	mm			
Cimento	CP V-ARI		$u'$ - etapa 4	2019,38	mm			
			$u'$ - etapa 5	750	mm			

Fonte: Próprio autor

Tabela A16 – Cálculo de deformação de retração para data específica pelo Anexo A da ABNT NBR 6118:2014 e laje com capa

Retração			
$\gamma$	1,45	A	40
h (cm)	8,832964	B	12,51
$h_{fic}$ (cm)	6,09	C	39,92
$\epsilon_{1s}$ (5-9)	-4,98	D	41,52
$\epsilon_{1s}$ ( $10^4$ )	-3,73	E	1,96
$\epsilon_{2s}$	1,16	$\beta_s(t_0)$	0,13
$\epsilon_{c\infty}$ ( $10^4$ )	-4,32	$\beta_s(t)$	0,41
$t_0$ fic (dias)	3	$\epsilon_{cs}$ (‰)	-0,12
t fic (dias)	30		

Fonte: Próprio autor

Tabela A17 – Cálculo da perda por retração para data específica e laje com capa

Perdas por retração							
	S ini	S1	S2	S3	S4	S5	
x	0,53	0,46	0,92	1,38	1,84	2,30	m
$\epsilon_{cs}(t, t_0)$	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	‰
$\Delta\sigma_{p,s}$	24,37	24,37	24,37	24,37	24,37	24,37	MPa

Fonte: Próprio autor

Tabela A18 – Cálculo do coeficiente de fluência para data específica pelo Anexo A da ABNT NBR 6118:2014 e laje com capa.

Fluência – laje e protensão				Fluência - capa			
$f_c(t_0)$	11,49	$t_0$ fic (dias)	9	$f_c(t_0)$	48,73	$t_0$ fic (dias)	66
$f_c(t_\infty)$	36,26	t fic (dias)	90	$f_c(t_\infty)$	60,43	t fic (dias)	90
h (cm)	8,83	$\beta_d(t)$	0,67	h (cm)	14,09	$\beta_d(t)$	0,47
$h_{fic}$ (cm)	6,09	A	162,24	$h_{fic}$ (cm)	9,72	A	189,01
$\varphi_a$	0,55	B	239,31	$\varphi_a$	0,27	B	374,01
$\varphi_{1c}$ (5-9)	2,00	C	279,24	$\varphi_{1c}$ (5-9)	2,00	C	336,25
$\varphi_{1c}$	1,50	D	4809,04	$\varphi_{1c}$	1,50	D	6297,77
$\varphi_{2c}$	1,84	$\beta_f(t_0)$	0,07	$\varphi_{2c}$	1,74	$\beta_f(t_0)$	0,35
$\varphi_{f\infty}$	2,76	$\beta_f(t)$	0,60	$\varphi_{f\infty}$	1,17	$\beta_f(t)$	0,57
$\varphi(t, t_0)$	2,28			$\varphi(t, t_0)$	0,71		

Fonte: Próprio autor

Tabela A19 – Cálculo da perda por fluência para data específica e laje com capa

Perdas por fluência							
	S ini	S1	S2	S3	S4	S5	
x	0,53	0,46	0,92	1,38	1,84	2,30	m
$N_{p,Sup}$	91,19	91,21	91,09	91,01	90,96	90,95	kN
$N_{p,Inf}$	673,64	673,53	674,25	674,76	675,07	675,18	kN
$M_{p,Sup}$	9,53	9,53	9,52	9,51	9,50	9,50	kNm
$M_{p,Inf}$	57,62	57,61	57,67	57,71	57,74	57,75	kNm
$N_{p,total}$	764,83	764,73	765,34	765,78	766,04	766,13	kN
$M_{g1}$	2,84	2,52	4,48	5,88	6,71	6,99	kNm
$\varphi_1$	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	
$M_{g2}$	1,01	0,89	1,59	2,09	2,39	2,49	kNm
$\varphi_2$	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	
$M_{g3}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	kNm
$\varphi_3$	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	
$\Delta\sigma_{p,cr,Sup}$	23,21	22,75	25,63	27,68	28,92	29,33	MPa
$\Delta\sigma_{p,cr,Inf}$	132,46	132,82	130,58	128,98	128,03	127,71	MPa

Fonte: Próprio autor

Tabela A20 – Cálculo da perda por relaxação para data específica e laje com capa

Perdas por Relaxação Total							
	S ini	S1	S2	S3	S4	S5	
x	0,53	0,46	0,92	1,38	1,84	2,30	m
$\sigma_{p0,sup}$	1203,00	1203,24	1201,75	1200,69	1200,05	1199,84	MPa
R	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	
$\psi_{1000}$	2,08	2,08	2,07	2,06	2,06	2,06	%
$\psi(t,t_0)$	1,97	1,97	1,96	1,96	1,95	1,95	%
$\Delta\sigma_{p,r}$	23,68	23,70	23,57	23,48	23,42	23,40	MPa
$\sigma_{p0,inf}$	1134,08	1133,88	1135,10	1135,97	1136,49	1136,66	MPa
R	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	
$\psi_{1000}$	1,26	1,26	1,27	1,27	1,28	1,28	%
$\psi(t,t_0)$	1,19	1,19	1,20	1,21	1,21	1,21	%
$\Delta\sigma_{p,r}$	13,54	13,52	13,63	13,70	13,75	13,76	MPa

Fonte: Próprio autor

Tabela A21 – Perdas progressivas e tensões na armadura no instante do ensaio para laje com capa

Perdas Diferidas Totais - Progressiva							
	S ini	S1	S2	S3	S4	S5	
x	0,53	0,46	0,92	1,38	1,84	2,30	m
$\chi_p$	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	
$\chi_c$	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	
$\eta$	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	
$\rho_p$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
$\alpha_p$	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	
$\Delta\sigma_{pt}$	68,68	68,25	70,91	72,81	73,94	74,32	MPa
$\sigma_{pso,Inf}$	1134,32	1134,99	1130,85	1127,89	1126,11	1125,52	MPa
	8,76%	8,71%	9,04%	9,28%	9,42%	9,47%	%
$\chi_p$	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	
$\chi_c$	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	
$\eta$	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	1,86	
$\rho_p$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
$\alpha_p$	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	5,05	
$\Delta\sigma_{pt}$	151,43	151,74	149,84	148,47	147,66	147,39	MPa
$\sigma_{pso,Inf}$	982,65	982,14	985,26	987,49	988,83	989,28	MPa
	19,95%	19,99%	19,74%	19,56%	19,45%	19,41%	%

Fonte: Próprio autor

Sendo assim, a tensão de protensão existente na seção após a distância de regularização é de 982,65MPa para a armadura de protensão inferior, e 1134,32MPa para a armadura de protensão superior.

## Apêndice B – Cálculo da força cortante resistente teórica e real

O dimensionamento da resistência a força cortante é feito tanto para a seção transversal teórica, quanto para as seções transversais reais.

Para o dimensionamento da resistência à força cortante pelo mecanismo de tração diagonal, é necessário o encontro do comprimento de transferência da protensão. Como as lajes apresentam armadura superior com dois fios de 7mm com aço CP170RB e seis cordoalhas com 12,7mm de diâmetro na armadura inferior, com aço CP190RB, é utilizado, então, o maior comprimento para as duas situações de armadura.

Para o dimensionamento do comprimento de transferência, foram usadas as equações 15 e 18 da revisão bibliográfica com seus dados característicos. O comprimento de transferência utilizado no dimensionamento é para a armadura inferior (Tabela B1).

Tabela B1 – Cálculo do comprimento de transferência para armadura inferior com diâmetro de 12,7mm

Comprimento Inferior		
$\eta_1$	3,20	
$\eta_2$	1,00	
$f_{ctk,inf}$	2,03	MPa
$f_{bpt}$	6,49	MPa
$\alpha_1$	1,25	
$\alpha_2$	0,19	
$\phi$	12,70	mm
$\sigma_{p0}$	1133,88	MPa
$l_{bpt}$	527,13	mm
$l_b$	412,62	mm

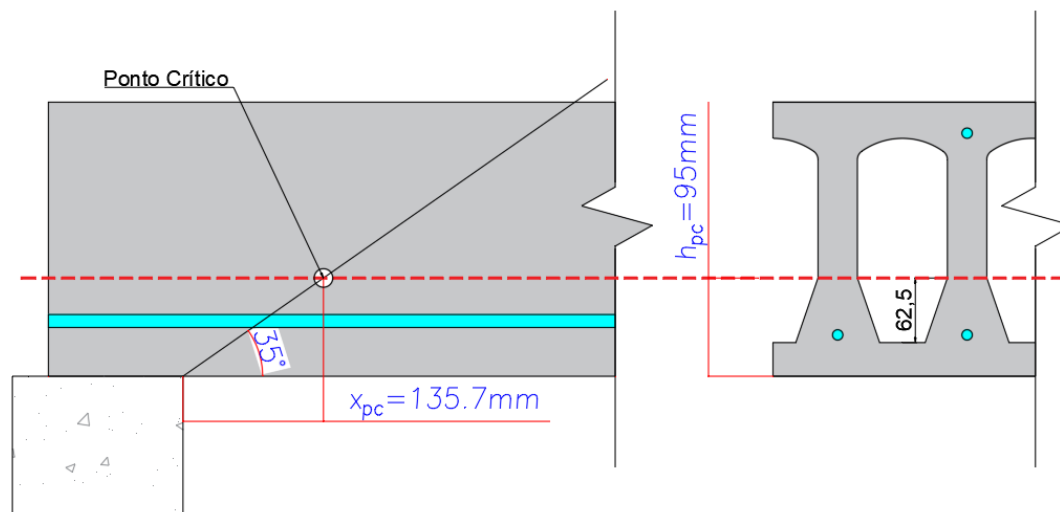
Fonte: Próprio autor

Para o dimensionamento da resistência à força cortante pelo mecanismo de flexo-cortante, foi utilizada a equação 74 da revisão bibliográfica com os valores

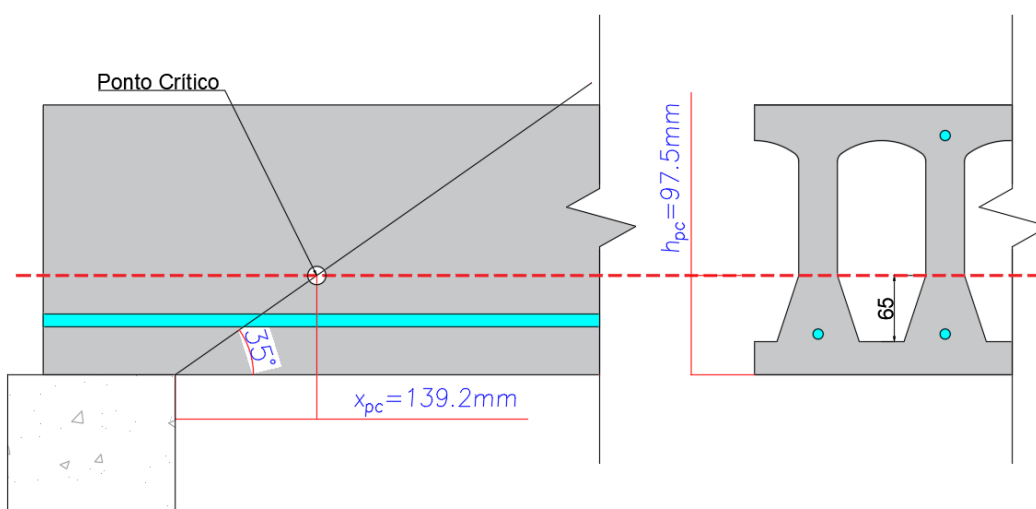
característicos. Nela, considerou-se que a parcela de força de protensão age apenas na área da seção transversal da laje alveolar, a normal de protensão advém tanto da armadura inferior quanto da armadura superior, e a taxa de armadura ( $\rho$ ) é calculada com apenas a área de aço na borda inferior da laje.

Para o dimensionamento da resistência à força cortante pelo mecanismo de tração diagonal, é necessário saber a altura do ponto crítico ( $h_{pc}$ ) e a distância horizontal do ponto crítico até a face interna do apoio ( $x_{pc}$ ). Tais valores são necessários para cálculo do  $\alpha_{pc}$  (Equação 42) e do  $\beta_{pc}$  (Equação 43). Na verificação das dimensões das seções transversais, existem duas possibilidades devido à altura do chanfro da seção transversal, sendo elas mostradas na Figura B1.

Figura B1 – Posição do ponto crítico: (a) Ponto crítico para laje teórica, laje para ensaio sem capa, laje para ensaio com capa; (b) Ponto crítico para laje A e laje B do ensaio de continuidade



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor



A partir das Equações 41 (tração diagonal sem capa para alvéolos poligonais), 44 (tração diagonal com capa) e 74 (flexo cortante), considerando suas variáveis com valores característicos, são feitos os dimensionamentos das resistências à força cortante nas tabelas B2 a B5. As tensões de protensão consideradas foram calculadas no Apêndice A.

Tabela B2 – Cálculo da resistência à força cortante da laje teórica sem e com capa

Laje Teórica - Sem capa					
Flexo-cisalhamento - Sem Capa			Tração diagonal - Sem Capa		
$f_{ctk,inf}$	2,85	MPa	$I_x$	89820,23	cm <sup>4</sup>
$d$	220	mm	$S_x$	4448,01	cm <sup>3</sup>
$\sum b_w$	228	mm	$f_{ctj,inf}$	2,03	MPa
$k$	1,38		$f_{ctk,inf}$	2,85	MPa
$\rho$	0,01		$f_{bpt}$	6,49	MPa
$V_{c,1}$	82,55	kN	$l_{bpt}$	52,71	cm
$N_p$	664,33	kN	$l_{pt2}$	63,26	cm
$A$	1055,46	cm <sup>2</sup>	$h$	26,50	cm
$\sigma_{cp,1}$	0,63	kN/cm <sup>2</sup>	$h_{pc}$	9,50	cm
$\alpha$	0,15		$l_a$	13,00	cm
$V_{p,1}$	47,36	kN	$x_{pc}$	13,57	cm
$V_{Rk,fl}$	129,91	kN	$L_x$	26,57	cm
			$\beta_{pc}$	0,86	
			$\alpha_{pc}$	0,42	
			$\sigma_{cp}$	0,63	kN/cm <sup>2</sup>
			$V_{Rk,c}$	152,60	kN
Laje Teórica - Com capa					
Flexo-cisalhamento - Com Capa			Tração diagonal - Com Capa		
$f_{ctk,inf}$	2,85	MPa	$I_{x,homogen}$	148351,51	cm <sup>4</sup>
$k$	1,33		$S'_x$	6440,49	cm <sup>3</sup>
$d_{comp}$	270,00	mm	Apoio Laje	130	mm
$b_w$	228,00	mm	$h_{tot,composto}$	315,00	mm
$\rho$	0,01		$V_{Sk}$	7,44	kN
$V_{c,1}$	92,52	kN	$V_{Rk,cc}$	173,33	kN
$\sigma_{cp,1}$	0,63	kN/cm <sup>2</sup>			
$\alpha$	0,15				
$V_{p,1}$	58,59	kN			
$V_{Rk,fl}$	151,11	kN			

Fonte: Próprio autor

Tabela B3 – Cálculo da resistência à força cortante da laje do ensaio sem capa e laje do ensaio com capa

Laje 1 - Sem capa					
Verificação Cortante					
Flexo-cisalhamento - Sem Capa - Laje 1			Tração diagonal - Sem Capa - Laje 1		
$f_{ctk,inf}$	2,85	MPa	$I_x$	90785,32	cm <sup>4</sup>
$d$	230,00	mm	$S_x$	4519,21	cm <sup>3</sup>
$\sum b_w$	237,5	mm	$f_{ctj,inf}$	2,03	MPa
$k$	1,37		$f_{ctk,inf}$	2,85	MPa
$\rho$	0,01		$f_{bpt}$	6,49	MPa
$V_{c,1}$	87,18	kN	$l_{bpt}$	52,71	cm
$N_p$	664,33	kN	$l_{pt2}$	63,26	cm
$A$	1081,87	cm <sup>2</sup>	$h$	26,50	cm
$\sigma_{cp,1}$	0,61	kN/cm <sup>2</sup>	$h_{pc}$	9,50	cm
$\alpha$	0,15		$l_a$	13,00	cm
$V_{p,1}$	50,31	kN	$x_{pc}$	13,57	cm
$V_{Rk,fl}$	137,50	kN	$L_x$	26,57	cm
			$\beta_{pc}$	0,86	
			$\alpha_{pc}$	0,42	
			$\sigma_{cp}$	0,62	kN/cm <sup>2</sup>
			$V_{Rk,c}$	157,72	kN
Laje - Ensaio com capa					
Flexo-cisalhamento - Com Capa - Laje Ensaio			Tração diagonal - Com Capa - Laje Ensaio		
$f_{ctk,inf}$	2,85	MPa	$I_{x,homogen}$	150015,52	cm <sup>4</sup>
$k$	1,32		$S'_x$	6538,10	cm <sup>3</sup>
$d_{comp}$	280	mm	Apoio Laje	130	mm
$b_w$	237,5	mm	$h_{tot,composto}$	315,00	mm
$\rho$	0,01		$V_{Sk}$	7,566	kN
$V_{c,1}$	97,40	kN	$V_{Rk,cc}$	178,86	kN
$\sigma_{cp,1}$	0,62	kN/cm <sup>2</sup>			
$\alpha$	0,15				
$V_{p,1}$	61,74	kN			
$V_{Rk,fl}$	159,15	kN			

Fonte: Próprio autor

Tabela B4 – Cálculo da resistência à força cortante da laje do lado A do ensaio de continuidade

Laje Lado A - Sem capa					
Verificação Cortante					
Flexo-cisalhamento - Sem Capa - Laje 2			Tração diagonal - Sem Capa - Laje 2		
$f_{ctk,inf}$	2,85	MPa	$I_x$	95359,09	cm <sup>4</sup>
$d$	227,00	mm	$S_x$	4664,88	cm <sup>3</sup>
$\sum b_w$	240,6	mm	$f_{ctj,inf}$	2,03	MPa
$k$	1,37		$f_{ctk,inf}$	2,85	MPa
$\rho$	0,01		$f_{bpt}$	6,49	MPa
$V_{c,1}$	87,36	kN	$l_{bpt}$	52,71	cm
$N_p$	664,33	kN	$l_{pt2}$	63,26	cm
$A$	1100,48	cm <sup>2</sup>	$h$	27,00	cm
$\sigma_{cp,1}$	0,60	kN/cm <sup>2</sup>	$h_{pc}$	9,75	cm
$\alpha$	0,15		$l_a$	13,00	cm
$V_{p,1}$	49,46	kN	$x_{pc}$	13,92	cm
$V_{Rk,fl}$	136,82	kN	$L_x$	26,92	cm
			$\beta_{pc}$	0,86	
			$\alpha_{pc}$	0,43	
			$\sigma_{cp}$	0,60	kN/cm <sup>2</sup>
			$V_{Rk,c}$	166,45	kN
Laje Lado A - Continuidade					
Flexo-cisalhamento - Com Capa - Laje A			Tração diagonal - Com Capa - Laje A		
$f_{ctk,inf}$	2,85	MPa	$I_{x,homogen}$	170570,43	cm <sup>4</sup>
$k$	1,31		$S'_x$	7128,02	cm <sup>3</sup>
$d_{comp}$	287	mm	Apoio Laje	130	mm
$b_w$	240,6	mm	$h_{tot,composto}$	330,00	mm
$\rho$	0,008602		$V_{Sk}$	8,02	kN
$V_{c,1}$	99,75	kN	$V_{Rk,cc}$	189,14	kN
$\sigma_{cp,1}$	0,61	kN/cm <sup>2</sup>			
$\alpha$	0,15				
$V_{p,1}$	63,03	kN			
$V_{Rk,fl}$	162,78	kN			

Fonte: Próprio autor

Tabela B5 – Cálculo da resistência à força cortante da laje do lado B do ensaio de continuidade

Laje Lado B - Sem capa					
Verificação Cortante					
Flexo-cisalhamento - Sem Capa - Laje 3			Tração diagonal - Sem Capa - Laje 3		
$f_{ctk,inf}$	2,85	MPa	$I_x$	91080,88	cm <sup>4</sup>
$d$	230,00	mm	$S_x$	4549,20	cm <sup>3</sup>
$\sum b_w$	244	mm	$f_{ctj,inf}$	2,03	MPa
$k$	1,37		$f_{ctk,inf}$	2,85	MPa
$\rho$	0,01		$f_{bpt}$	6,49	MPa
$V_{c,1}$	88,93	kN	$l_{bpt}$	52,71	cm
$N_p$	664,33	kN	$l_{pt2}$	63,26	cm
$A$	1096,04	cm <sup>2</sup>	$h$	26,50	cm
$\sigma_{cp,1}$	0,61	kN/cm <sup>2</sup>	$h_{pc}$	9,75	cm
$\alpha$	0,15		$l_a$	13,00	cm
$V_{p,1}$	51,43	kN	$x_{pc}$	13,92	cm
$V_{RK,fl}$	139,96	kN	$L_x$	26,92	cm
			$\beta_{pc}$	0,87	
			$\alpha_{pc}$	0,43	
			$\sigma_{cp}$	0,61	kN/cm <sup>2</sup>
			$V_{RK,c}$	166,79	kN
Laje Lado B - Continuidade					
Flexo-cisalhamento - Com Capa - Laje B			Tração diagonal - Com Capa - Laje A		
$f_{ctk,inf}$	2,85	MPa	$I_{x,homogen}$	193715,08	cm <sup>4</sup>
$k$	1,29		$S'_x$	7815,60	cm <sup>3</sup>
$d_{comp}$	310,00	mm	Apoio Laje	130	mm
$b_w$	244	mm	$h_{tot,composto}$	325,00	mm
$\rho$	0,007853		$V_{Sk}$	8,79	kN
$V_{c,1}$	105,27	kN	$V_{RK,cc}$	199,79	kN
$\sigma_{cp,1}$	0,61	kN/cm <sup>2</sup>			
$\alpha$	0,15				
$V_{p,1}$	69,32	kN			
$V_{RK,fl}$	174,59	kN			

Fonte: Próprio autor