

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO
CIVIL - PPGE Civ

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PREENCHIMENTO DE ALVÉOLOS EM LAJES
ALVEOLARES SUBMETIDAS À FORÇA CORTANTE**

GREGORY LEE PINHEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil e Estruturas da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Construção Civil e Estruturas**.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho

Co-orientador: Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho

São Carlos, 2014

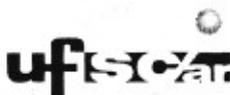
**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

P654ei Pinheiro, Gregory Lee.
Estudo da influência do preenchimento de alvéolos em lajes alveolares submetidas à força cortante / Gregory Lee Pinheiro. -- São Carlos : UFSCar, 2014.
114 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2014.

1. Construção civil. 2. Lajes alveolares. 3. Preenchimento de alvéolo. 4. Concreto pré-fabricado. 5. Ensaio de força cortante. I. Título.

CDD: 690 (20^a)

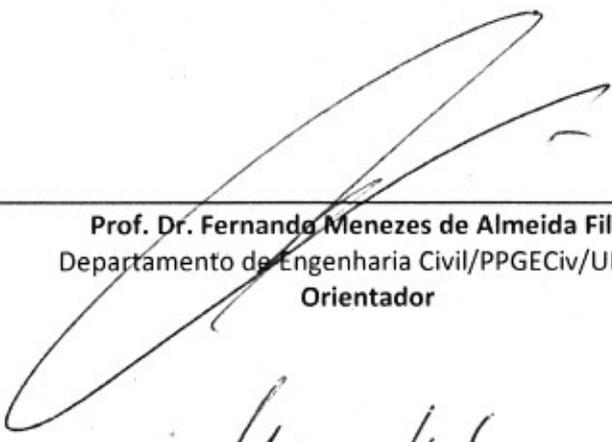


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil
Rod. Washington Luís, Km 235
13565-905 – São Carlos – SP
Fone: (16) 3351-8261 Fax (16) 3351-8262
e-mail: ppgeciv@ufscar.br site: www.ppgeciv.ufscar.br

GREGORY LEE PINHEIRO

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em vinte e oito de abril de 2014.

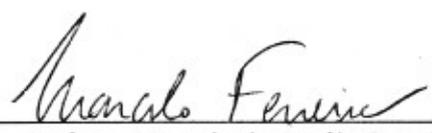
Banca Examinadora constituída pelos membros:



Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho
Departamento de Engenharia Civil/PPGECiv/UFSCar
Orientador



Prof. Fr. Mounir Khalil El Debs
SET/EESC/USP
Examinador externo



Prof. Dr. Marcelo de Araújo Ferreira
Departamento de Engenharia Civil/PPGECiv/UFSCar
Examinador interno

RESUMO

O emprego de elementos pré-fabricados tem se tornado crescente no Brasil, dado a necessidade de velocidade de produção e montagem de estruturas. Tendo em vista a rápida montagem e o preço competitivo deste tipo de estrutura, elementos pré-moldados tem ganhado campo no mercado nacional. Há um destaque pela procura de lajes alveolares, devido ao seu baixo peso próprio, decorrente de vazios proporcionados pelos alvéolos e maior otimização dos materiais em virtude da aplicação da técnica de pré-tração, tornando-a economicamente viável.

A Norma Técnica Nacional ABNT NBR 9062 que trata de estruturas pré-moldadas de concreto não apresenta critérios mais específicos para lajes alveolares, por outro lado a revisão em vigor de 2011 da ABNT NBR 14861 que aborda lajes alveolares pré-fabricadas traz aspectos relevantes tais como o método de verificação da resistência à força cortante de lajes alveolares com ou sem capeamento estrutural e com ou sem preenchimento de alvéolos. Tendo em vista o reduzido volume de pesquisas nacionais sobre o tema, esta pesquisa tem como objetivo fazer um estudo teórico-experimental das diferentes técnicas de preenchimento de alvéolos de lajes alveolares e o seu comportamento quando submetidas a ensaios de força cortante. Como consequência do processo de fabricação deste tipo de laje e do método de preenchimento dos alvéolos, falhas no preenchimento idealizado devido ao comportamento distinto dos materiais e técnicas inadequadas são comumente constatadas.

Palavras-chave: Lajes alveolares, preenchimento de alvéolo, concreto pré-fabricado, ensaio, força cortante.

ABSTRACT

The use of precast elements has become crescent in Brazil, due to the need of haste during production as well as while assembling the structures. Bearing in mind a quick assembly and the competitive price for this kind of frame, precast elements have been growing and spreading in this field throughout the country. There is something special about demanding hollow core slabs, in virtue of their own low weight, in face of the empty spaces generated by the hollows and a better use of materials because of pre-tension technique, making it economically feasible. The National Technical Code ABNT NBR 9062, which deals with precast concrete structures, shows no more specific criteria as far as hollow core slabs are concerned, but on the other hand the 2011 review in force to ABNT NBR 14861 which covers precast hollow core slabs brings about relevant aspects such as the method used to check the capacity of shear strength on precast hollow core slabs, both with and without concrete structural cover, and furthermore with and without hollow fillings.

Considering the reduced amount of national research on this topic, this study aims to develop and perform techniques in different ways of filling the hollows and the slabs and how they behave when exposed to shear strength tests. As a consequence to the manufacturing process of such type of slab and the hollow- filling method, failure in the idealized filling, in virtue of each material own behavior and inappropriate technique are commonly found.

Keywords: hollow core slab, hollow core filling, precast concrete, testing, shear force.

Pelo apoio e incentivo dedico este trabalho,

Aos meus pais João e Susana Pinheiro.

À meu irmão João Junior.

“O que é facilmente adquirido é facilmente desprezado”

(Isaac Newton)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmão pelo apoio incondicional. Pelo incentivo e palavras de esperança. Pela paciência e perseverança. Por acreditar e disseminar a importância dos valores morais que forjam o caráter de um homem.

Ao amigo, orientador e professor Fernando Almeida Filho, pela paciência, atenção, respeito, dedicação, ensinamento, ajuda em momentos difíceis, incentivo e pelos momentos de descontração.

Ao meu co-orientador Roberto Chust, pelo privilégio de tê-lo como professor e pela importante contribuição para esta pesquisa.

Ao professor Marcelo Ferreira, pela ajuda, apoio, vasto ensinamento ofertado, contribuição e incentivo.

Ao professor Mounir pela contribuição e avaliação deste trabalho.

Ao colega de trabalho e diretor da Cassol Pré-Fabricados Luis André Tomazoni, pelo apoio nos ensaios da pesquisa.

A Cassol Pré-Fabricados, por fornecer material, equipamentos e mão de obra para a execução do estudo experimental deste trabalho.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a realização desta pesquisa.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.2 Objetivos.....	7
1.3 Justificativa	8
1.4 Metodologia	10
1.5 Estrutura do texto	12
2. Revisão Bibliográfica.....	13
2.1 Lajes alveolares.....	13
2.1.1 Processos de produção.....	13
2.1.2 Controle de qualidade.....	16
2.2 Mecanismos de ruptura	17
2.2.1 Mecanismo de ruptura devido à flexão em lajes alveolares	19
2.2.2 Mecanismo de ruptura devido ao esforço cortante em lajes alveolares	20
2.3 Resistência ao esforço cortante	22
2.3.1 Resistência de projeto	22
2.3.2 Preenchimento de alvéolos	25
2.4 Procedimento de preenchimento dos alvéolos	26
2.4.1 Resistência ao esforço cortante de lajes alveolares com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão na pista.....	28
2.4.2 Resistência ao esforço cortante de lajes alveolares com alvéolos preenchidos após da liberação da protensão na pista.....	29
2.5 Exemplos numéricos dos efeitos do preenchimento de alvéolos	30
2.5.1 Resistência ao esforço cortante de lajes alveolares com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão na pista.....	31
2.5.2 Considerações finais	34
3. Programa experimental.....	35
3.1 Considerações iniciais.....	35
3.2 Materiais utilizados	36
3.2.1 Concreto	36
3.2.2 Cordoalhas	37
3.3 Modelos estudados	38
3.3.1 Tipologia	38
3.3.2 Geometria.....	39
3.4 Produção dos exemplares	40
3.4.1 Equipamentos utilizados.....	41
3.4.2 Materiais utilizados	43
3.4.3 Preparação da pista de concretagem.....	43
3.4.4 Protensão dos cabos.....	44
3.4.5 Extrusão	47
3.4.6 Preenchimento de alvéolos	49
3.5 Ensaio realizados	52
3.5.1 Equipamentos utilizados.....	52
3.5.2 Procedimentos e arranjos (<i>test set-up</i>).....	55
3.5.3 Execução dos ensaios.....	58
4 Considerações Finais.....	80
4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS – Ajuste dos ensaios	80

4.1.1 Ensaio da laje 01:.....	80
4.1.2 Ensaio da laje 02:.....	81
4.1.3 Ensaio da laje 03:.....	82
4.1.4 Ensaio da laje 04:.....	83
4.1.5 Ensaio da laje 05:.....	84
4.1.6 Ensaio da laje 06:.....	85
4.1.7 Ensaio da laje 07:.....	86
4.1.8 Ensaio da laje 08:.....	87
4.1.9 Ensaio da laje 09:.....	88
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	89
4.2.1 Valores experimentais	89
4.2.1 Valores de cálculo	90
4.2.2 Comparação entre ensaios no mesmo modelo:	92
4.2.3 Comparação entre valores teóricos e valores experimentais	94
4.2.3 Influência do instante de preenchimento dos alvéolos	95
5.2 Influência do número de alvéolos preenchidos.....	96
5.3 Influência do fator de contribuição do preenchimento dos alvéolos	99
5.3 Ajuste do fator de contribuição do preenchimento dos alvéolos.....	100
5 Conclusões	102

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados para o caso de lajes alveolares com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão	31
Tabela 2 – Resultados para o caso de lajes alveolares com alvéolos preenchidos após a liberação da protensão.	32
Tabela 3: Resultado do ensaio de tração das cordoalhas.....	38
Tabela 4 Tipologia de lajes, locais e tipos de preenchimento	39
Tabela 5: Valores experimentais de resistência ao esforço cortante.....	89
Tabela 6: Valores de cálculo de resistência à esforço cortante.....	90
Tabela 7: Valores teóricos de resistência ao esforço cortante.	91
Tabela 8: Valores teóricos de resistência à esforço cortante.	94
Tabela 9: Valores teóricos e experimentais de resistência ao esforço cortante.	102
Tabela 10: Valores teóricos e experimentais de resistência à esforço cortante.	103
Tabela 11: Comparação da resistência à compressão do concreto de preenchimento dos alvéolos.	104
Tabela 12: Comparação do instante de preenchimento do alvéolos.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Elementos de uma laje alveolar pré-fabricada protendida.....	4
Figura 2: Diferentes geometrias de alvéolos.	5
Figura 3: Seção de laje alveolar com capa estrutural de concreto.	5
Figura 4: Vista de laje alveolar com capa estrutural de concreto.	6
Figura 5: Esforços solicitantes em laje alveolar com preenchimento de alvéolos.	9
Figura 6: Esquema de ensaio de resistência à força cortante.	11
Figura 7: Máquina extrusora e tubos helicoidais para fabricação de lajes alveolares. ...	15
Figura 8: Posições para retirada de testemunhos em lajes alveolares.....	17
Figura 9: Elemento em concreto submetido a flexão e cisalhamento a) Fissuras na nervura decorrentes do cisalhamento; b) Fissuras de cisalhamento e flexão; c) Fissuras de flexão.	19
Figura 10: Fissuras na parte superior da peça que ocorrem no ato da liberação da protensão na fábrica.	20
Figura 11: Fissuras de flexão.	20
Figura 12 : Tensões normais e de cisalhamento em um elemento.	21
Figura 13 : Interação de fissuras de cisalhamento com fissuras de flexão.....	21
Figura 14 : Exemplo de seção transversal de laje alveolar com alvéolos preenchidos.	23
Figura 15: Posicionamento recomendado para preenchimento de concreto em dois alvéolos.	26
Figura 16 : Procedimento de abertura das janelas para preenchimento dos alvéolos, imediatamente após a extrusão da laje.	27
Figura 17. Tampões de poliestireno expandido (EPS) devidamente posicionados na laje.	27
Figura 18: Lançamento de concreto para preenchimento dos alvéolos e preenchidos com concreto.	27
Figura 19: Lajes com alvéolos preenchidos.....	28
Figura 20: Exemplos de seções transversais considerados para os cálculos.	30
Figura 21: Resultados para o caso de lajes alveolares com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão.	32
Figura 22: Resultados para o caso de lajes alveolares com alvéolos preenchidos depois da liberação da protensão.	33
Figura 23: Central de produção de concreto.	37
Figura 24: Gráfico carregamento (kN) x deformação (mm) do ensaio de tração da cordoalha.	37
Figura 25: Exemplo de rótulo para identificação do elemento.	38
Figura 26: Geometria das lajes [cm].	39
Figura 27: Equipamento para produção de lajes alveolares protendidas.	41
Figura 28: Pista de concretagem.	41
Figura 29: Equipamento para protensão.	42
Figura 30: Equipamento para corte no estado endurecido.	42
Figura 31: Limpeza da pista de concretagem.	44
Figura 32: Aplicação de desmoldante.	44
Figura 33: Posicionamento das cordoalhas.	45

Figura 34: Equipamento para protensão.....	45
Figura 35: Aplicação da tensão nas cordoalhas.....	45
Figura 36: Cunhas e porta-cunhas.....	46
Figura 37: Pista com cordoalhas protendidas.....	46
Figura 38: Tubos helicoidais para fabricação de lajes alveolares.....	47
Figura 39: Alimentação da máquina extrusora com concreto.....	47
Figura 40: Marcação dos locais de corte nas lajes.....	48
Figura 41: Superfície após tratamento de aderência.....	48
Figura 42: Abertura dos alvéolos.....	49
Figura 43: Preenchimento dos alvéolos.....	50
Figura 44: Cura a vapor.....	50
Figura 45: Ciclo típico de cura a vapor.....	51
Figura 46: Execução de corte em lajes.....	51
Figura 47: Transporte e armazenamento das lajes.....	52
Figura 48: Pórtico para ensaio.....	52
Figura 49: Célula de carga.....	53
Figura 50: Módulo de aquisição de dados.....	53
Figura 51: LVDT utilizado.....	53
Figura 52: Prensa para ensaio.....	54
Figura 53: Extensômetros utilizados.....	54
Figura 54: Retífica para os corpos-de-prova de concreto.....	54
Figura 55: Esquema de ensaio de resistência a força cortante – ELEVACÃO 1.....	55
Figura 56: Esquema de ensaio de resistência a força cortante – ELEVACÃO 2.....	55
Figura 57: Aparelho de apoio fixo.....	56
Figura 58: Aparelho de apoio móvel.....	57
Figura 59 : Aplicação de areia sobre a laje.....	57
Figura 60: Montagem do esquema de ensaio.....	58
Figura 61: Ensaio da laje: $L_{1,1}-A_0$	59
Figura 62: Ensaio da laje: $L_{1,2}-A_0$	59
Figura 63: Ensaio da laje: $L_{2,1}-P_{35}-A_2$	60
Figura 64: Ensaio da laje: $L_{2,2}-P_{35}-A_2$	61
Figura 65: Resultado dos ensaios na Laje 2.....	62
Figura 66: Ensaio da laje: $L_{3,1}-O_{35}-A_2$	63
Figura 67: Ensaio da laje: $L_{3,2}-O_{35}-A_2$	63
Figura 68: Resultado dos ensaios na Laje 3.....	64
Figura 69: Ensaio da laje: $L_{4,1}-P_{45}-A_2$	65
Figura 70: Ensaio da laje: $L_{4,2}-P_{45}-A_2$	66
Figura 71: Resultado dos ensaios na Laje 4.....	67
Figura 72: Ensaio da laje: $L_{5,1}-O_{45}-A_2$	68
Figura 73: Ensaio da laje: $L_{5,2}-O_{45}-A_2$	68
Figura 74: Resultado dos ensaios na Laje 5.....	69
Figura 75: Ensaio da laje: $L_{6,1}-P_{35}-A_4$	70
Figura 76: Ensaio da laje: $L_{6,2}-P_{35}-A_4$	71
Figura 77: Resultado dos ensaios na Laje 6.....	72
Figura 78: Ensaio da laje: $L_{7,1}-O_{35}-A_4$	73
Figura 79: Ensaio da laje: $L_{7,2}-O_{35}-A_4$	73
Figura 80 : Resultado dos ensaios na Laje 7.....	74
Figura 81: Ensaio da laje: $L_{8,1}-P_{45}-A_4$	75
Figura 82: Ensaio da laje: $L_{8,2}-P_{45}-A_4$	76
Figura 83: Resultado dos ensaios na Laje 8.....	77

Figura 84: Ensaio da laje: L _{9,1} -O ₄₅ -A ₄	78
Figura 85: Ensaio da laje: L _{9,2} -O ₄₅ -A ₄	78
Figura 86: Resultado dos ensaios na Laje 9	79
Figura 87: Ajuste nos ensaios na Laje 2	81
Figura 88: Resultado dos ensaios na Laje 3	82
Figura 89: Resultado dos ensaios na Laje 4	83
Figura 90: Resultado dos ensaios na Laje 5	84
Figura 91: Resultado dos ensaios na Laje 6	85
Figura 92: Resultado dos ensaios na Laje 7	86
Figura 93: Resultado dos ensaios na Laje 8	87
Figura 94: Resultado dos ensaios na Laje 9	88
Figura 95: Valores de cálculo de resistência ao esforço cortante	90
Figura 96: Valores teóricos de resistência ao esforço cortante	91
Figura 97: Comparativo entre ensaios no mesmo modelo – Lado A x Lado B	92
Figura 98: Máximos valores entre ensaios – Lado A x Lado B	93
Figura 99: Comparativo entre os valores teóricos com coeficiente de segurança, sem coeficiente de segurança e valores experimentais	95
Figura 100: Comparação entre preenchimento em obra VS preenchimento na pista	96
Figura 101: Comparação entre lajes com 2 e 4 alvéolos preenchidos com fck 35 MPa	97
Figura 102: Comparação entre lajes com 2 e 4 alvéolos preenchidos com fck 45 MPa	97
Figura 103: Ganho de resistência devido ao preenchimento	98
Figura 104: Comparação da resistência ao esforço cortante de ensaio com à resistência ao esforço cortante teórico	99
Figura 105: Comparativo entre os resistência teórica e resistência experimental após ajuste da parcela de contribuição	100
Figura 106: Porcentagem excedente da resistência experimental em relação à resistência teórica após ajuste da parcela de contribuição	101
Figura 107: Divergência do tipo de ruptura da Laje 3	103

Nas década de 50 houve um aumento significativo no uso de estruturas pré-fabricadas em concreto, em virtude do aumento do grau de industrialização bem como da maior demanda por estruturas no país.

No Brasil, as lajes alveolares passaram a ser empregadas a partir de década de 1980. Devido à sua produção automatizada e de rápida produtividade, favoreceram sua consolidação após 2001 com o rápido crescimento da aplicação das estruturas pré-moldadas na construção civil, ANTUNES (2011).

O crescente emprego de elementos pré-fabricados em concreto se da principalmente a economia e otimização dos materiais empregados em sua fabricação e montagem, tendo-se uma melhor utilização dos materiais e uma expressiva redução do desperdício.

O emprego das estruturas pré-fabricadas permite de modo geral a obtenção de uma estrutura eficiente e racional, por meio do emprego de estruturas mais esbeltas, com alcance de maiores vãos livres, com o menor uso possível de escoramentos para sua fabricação, alto índice de industrialização e com um melhor desempenho dos materiais empregados se comparado a outros sistemas.

Elementos pré-fabricados em concreto são empregados numa grande gama de áreas da construção civil, sendo visto em construções industriais, comerciais, residenciais, infraestrutura, saneamento, rodovias, ferrovias, aeroportos, dentre outros.

Segundo REVEL (1973), pré-fabricação no campo da construção civil significa fabricar certo elemento antes do seu posicionamento final na obra.

A ABNT NBR 9062 (2006) define o elemento pré-moldado como sendo aquele executado industrialmente, mesmo em instalações temporárias em canteiros de obra, ou em instalações permanentes de empresa destinada para este fim que atende aos requisitos mínimos de mão-de-obra qualificada; a matéria-prima dos elementos pré-

fabricados deve ser ensaiada e testada quando no recebimento pela empresa e previamente à sua utilização.

De modo mais abrangente pode-se dizer que a pré-fabricação é a produção de elementos de construção civil em indústrias, com posterior transporte e montagem das peças.

Elemento pré-fabricado pode ser definido como aquele que é produzido em escala industrial, obedecendo a manuais e especificações técnicas, por pessoal treinado e qualificado, em condições rigorosas de controle de qualidade, e que elemento pré-moldado é aquele executado fora do local de utilização definitiva na estrutura, produzido em condições menos rigorosas de controle de qualidade, mas sujeito a inspeção do próprio construtor.

O sistema pré-fabricado em concreto teve ascensão juntamente com a evolução da indústria da construção civil, tendo relação com a mecanização dos meios industriais de modo geral. Atualmente o seu desenvolvimento está ligado não só aos processos de fabricação, mas também aos processos de transporte e montagem dos elementos.

Segundo SERRA *et al.*(2005), a industrialização da construção civil, através da utilização de peças de concreto pré-fabricados promoveu no Brasil e no mundo, um salto de qualidade nos canteiros de obras, pois através de componentes industrializados com alto controle ao longo de sua produção, com materiais de boa qualidade, fornecedores selecionados e mão-de-obra treinada e qualificada, as obras tornaram-se mais organizadas e seguras.

É possível afirmar que os elementos pré-fabricados surgiram com a invenção do concreto armado, tendo em vista que o próprio nascimento do concreto armado ocorreu com a pré-moldagem de elementos, fora do local de seu uso.

O grande crescimento do sistema pré-fabricado na Europa foi consequência da necessidade de reconstrução, após a Segunda Guerra Mundial, sendo o período de 1945 a 1950 caracterizado pela expressiva demanda de construções, tais como habitação, escolas, hospitais, indústrias, pontes etc. No Brasil, o cenário histórico não foi o mesmo, o sistema foi impulsionado pela busca da racionalização com consequente diminuição de gastos e aumento de lucros, diante de um mercado em crescimento e em constante disputa.

No campo da pré-fabricação, existem as lajes alveolares protendidas, que apresentam-se como uma solução estrutural avançada para piso e forro, sendo que as primeiras lajes alveolares surgiram na década de 50, logo, seu uso e técnica de fabricação são bastante disseminados (COSTA, 2009).

Mesmo com um investimento inicial de produção relativamente elevado, em comparação a outros sistemas construtivos, devido ao grande nível de mecanização e automatização, quando aplicado em grande escala, seu custo torna-se extremamente competitivo. O produto é considerado racional por apresentar um baixo consumo relativo de concreto e de aço, além de dispensar escoramento, pela grande economia de formas e principalmente pela elevada velocidade de montagem das estruturas.

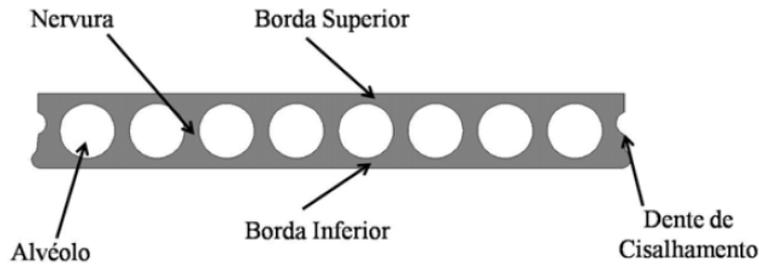
De acordo com COSTA (2009), lajes alveolares podem ser empregadas em diversos sistemas estruturais: concreto pré-moldado, concreto moldado in loco, estrutura metálica, alvenaria estrutural, dentre outros.

O mesmo autor comenta que por apresentar-se como uma solução interessante para pisos, o seu uso vem crescendo em diversas partes do mundo, destacando Europa, EUA e mais recentemente a partir da década de 80, no Brasil.

Segundo MELO (2004), por conta das lajes alveolares serem produtos industrializados e o número de horas/homem envolvido em sua produção ser baixo, sua produção aumenta consideravelmente, e o controle de qualidade durante o processo torna-se elevado devido ao nível de industrialização. O autor afirma ainda que: *“O sistema de pisos em lajes alveolares é o que obteve maior sucesso no mercado da construção civil. De fácil instalação, pode atingir grandes vãos, facilitando o layout e otimizando a estrutura, seja ela moldada in loco, metálica ou de elementos reticulados pré-fabricados”*.

As lajes alveolares pré-moldadas protendidas surgiram da necessidade de se obter um elemento estrutural com baixo peso próprio, baixo consumo de material e com grande alcance de vãos. A união dessas características torna o elemento viável técnica e economicamente. As lajes alveolares protendidas são geralmente usadas, para vencer vãos que variam de 4 a 20 metros, sendo que a altura do elemento varia de 100 a 400 milímetros, podendo variar em alguns casos e largura usual de 1200 milímetros. Conforme a Figura 1 é notável a reduzida área efetiva do material concreto, devido à otimização gerada pela pré-tração.

Figura 1: Elementos de uma laje alveolar pré-fabricada protendida.



Fonte: COSTA (2009)

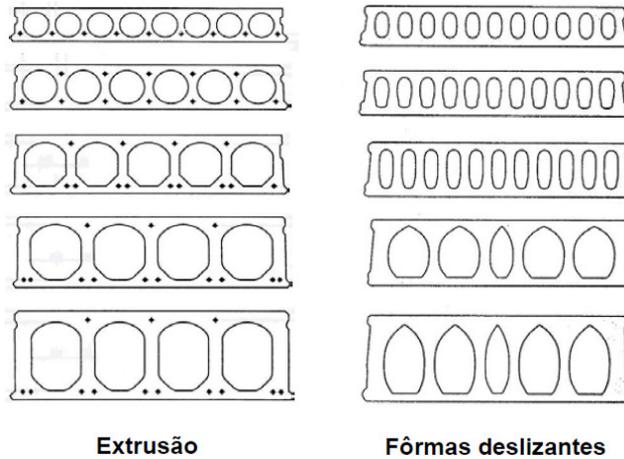
A ABNT NBR 14861 (2011) define laje alveolar como: *“peça de concreto produzida industrialmente, fora do local de utilização definitiva, sob rigorosas condições de controle de qualidade. É caracterizada por armadura longitudinal ativa, que engloba totalmente a armadura inferior de tração necessária e por ausência de armadura transversal de cisalhamento”*.

Conforme COSTA (2009), a viabilidade econômica do sistema depende do aspecto da modulação da estrutura. Na venda e no projeto de lajes alveolares, o produto é considerado inteiro, caso existam cortes estes podem ser dados como desperdício, sendo de suma importância a paginação do empreendimento. Lajes alveolares protendidas são elementos estruturais que devem ser projetados para serem modulares, ou seja, a viabilidade econômica do produto se dá também pela concepção do projeto arquitetônico.

Diversas seções transversais estão disponíveis no mercado, com alvéolos de diferentes geometrias e diversas disposições e quantidades de cordoalhas. O formato do alvéolo é definido pelo tipo de equipamento utilizado para a produção da laje, sendo oval quando se utiliza forma deslizante e circular quando se faz uso de extrusora, conforme Figura 2

Figura 2: Diferentes geometrias de alvéolos.

Figura 2: Diferentes geometrias de alvéolos.

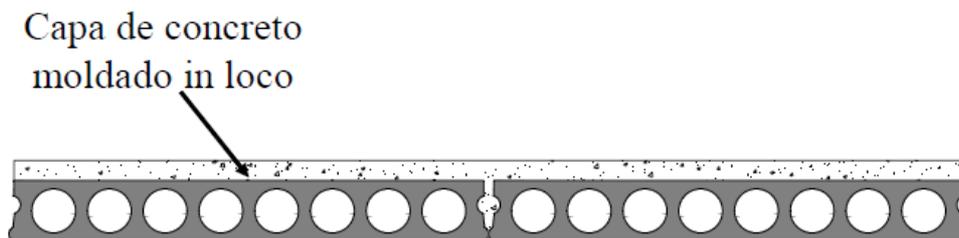


Fonte: CATOIA (2011)

Segundo FERNANDES (2007), as lajes alveolares podem suportar cargas de utilização superiores a 30 kN/m^2 podendo ser utilizadas até mesmo para pavimentos destinados a estacionamento.

É usual o emprego de lajes alveolares com capa estrutural de concreto moldado in loco, que em geral possuem espessura acima de 5 cm, buscando formar uma seção composta e conseqüentemente aumentar a capacidade resistente à flexão e melhorar o desempenho do elemento como diafragma horizontal na estrutura Figura 3.

Figura 3: Seção de laje alveolar com capa estrutural de concreto.



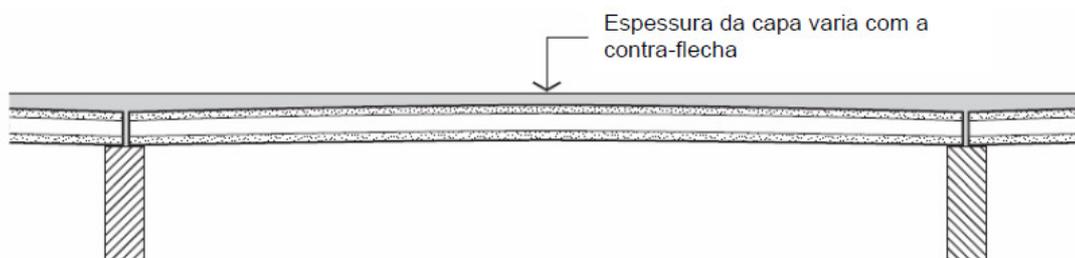
Fonte: COSTA (2009)

Em edifícios de múltiplos pavimentos e de altura elevada, as lajes alveolares possuem a capacidade de transferência de esforços horizontais, tendo importante papel como diafragma rígido.

Ao se garantir a aderência entre a capa e a superfície da laje junto ao apoio, a capa moldada in loco pode contribuir para o aumento da capacidade da resistência ao cisalhamento.

A capa estrutural tem ainda a finalidade de conferir acabamento, assegurando o nivelamento da superfície da laje e corrigindo a contra-flecha causada pela protensão, Figura 4.

Figura 4: Vista de laje alveolar com capa estrutural de concreto.



Fonte: COSTA (2009)

Em decorrência do processo de fabricação, por extrusão ou forma deslizante, as lajes alveolares não possuem armadura transversal para resistir à força cortante. No Brasil, até 2011, a resistência ao esforço cortante era calculada segundo o item de lajes sem armadura para resistir à força cortante da ABNT NBR 6118 (2007). Assim, devido a carência de informações pertinentes a produção e projeto, neste mesmo ano foi publicada a revisão da norma brasileira ABNT NBR 14861 (2011), que passa a tratar de projeto, produção e montagem de lajes alveolares.

FRANÇA (2012), afirma em seu trabalho que o engenheiro calculista comumente se depara com a situação em que as lajes alveolares resistem ao momento fletor, entretanto, não resistem ao esforço cortante calculado através das equações das normas. Como solução, o preenchimento dos alvéolos com concreto nas extremidades da laje pode ser adotado, aumentando a resistência ao esforço cortante por meio do aumento da área e da largura mínima da seção transversal de concreto da laje na região próxima aos apoios.

Contudo, em estudos publicados por FERREIRA *et al.* (2008), COSTA (2009) e CATOIA (2011) demonstraram que o preenchimento dos alvéolos com concreto aumenta a resistência ao cisalhamento das lajes alveolares em uma proporção significativamente menor do que o valor calculado, aumentando-se a área da seção transversal e a largura mínima da laje, na equação fornecida pela ABNT NBR 6118 (2007).

O Manual de Qualidade para Lajes Alveolares da FIP (1992), afirma que a resistência à tração do concreto esta diretamente relacionada com a forma geométrica dos alvéolos, traço de concreto e método de produção.

Pesquisas mostram que o principal parâmetro a ser considerado no projeto das lajes alveolares protendidas é a resistência à tração do concreto, tendo em vista que o mesmo é considerado no cálculo da resistência ao cisalhamento, onde a armadura transversal é dispensada.

1.2 Objetivos

Este estudo tem como objetivo principal avaliar a influência do preenchimento de alvéolos em de lajes alveolares pré-fabricadas e protendidas, por meio de ensaios para avaliação da resistência à força cortante.

Como objetivos específicos, espera-se:

- i. Por meio dos ensaios de força cortante nas lajes alveolares com preenchimento de alvéolo, verificar o valor mínimo do equacionamento presente na ABNT NBR 14861 (2011) com relação aos resultados experimentais;
- ii. Comparar os resultados de ensaios em lajes alveolares com o preenchimento do alvéolo realizado antes da liberação da protensão da pista ou após a liberação da protensão da pista;
- iii. Avaliar a influência da resistência à compressão do concreto do material de preenchimento do alvéolo na resistência à força cortante da laje alveolar;

Espera-se que, com essa pesquisa, seja possível contribuir para um maior entendimento sobre o assunto e fornecer subsídios para a norma brasileira de lajes alveolares (ABNT NBR 14861, 2011).

1.3 Justificativa

Com o crescimento da indústria da construção civil no Brasil, aliado a necessidade de estruturas com maior nível de racionalização, novas tecnologias vem sendo desenvolvidas.

As estruturas em concreto pré-fabricado ganham espaço em meio ao mercado da construção civil, que se torna cada vez mais competitivo. A busca por elementos estruturais mais otimizados, com maior qualidade e confiabilidade, e principalmente com custos reduzidos, ampliam as pesquisas e investimentos no concreto pré-fabricado.

Nesse cenário, o uso de lajes alveolares protendidas tende a crescer cada vez mais, e junto a esse crescimento, dúvidas e incertezas em relação a algumas características do comportamento desses elementos tendem a surgir perante a comunidade científica.

A Norma Técnica Nacional ABNT NBR 9062 (2006) que trata de estruturas pré-moldadas de concreto não apresenta critérios mais específicos para lajes alveolares, por outro lado a revisão de 2011 vigor da ABNT NBR 14861 (2002) que aborda lajes alveolares pré-fabricadas traz aspectos relevantes tais como o método de verificação da resistência à força cortante de lajes alveolares com ou sem capeamento estrutural e com ou sem preenchimento de alvéolos.

Tendo em vista o reduzido volume de pesquisas nacionais sobre o tema, esta pesquisa busca abordar diferentes técnicas de preenchimento de alvéolos de lajes alveolares e o seu comportamento quando submetidas a ensaios de força cortante.

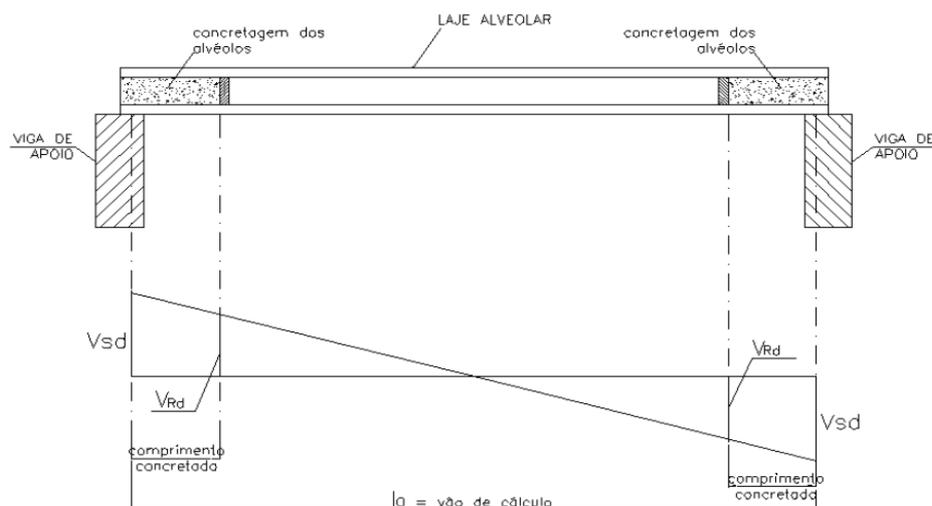
Como consequência do processo de fabricação deste tipo de laje e do método de preenchimento dos alvéolos, é notado que mesmo utilizando-se o mesmo material, concreto, porém em etapas distintas na produção e dosagens distintas, há o surgimento de falhas no preenchimento idealizado devido ao comportamento distinto dos materiais.

Segundo COSTA (2009), a norma de estruturas pré-moldadas de concreto no Brasil, ABNT NBR 9062 (2006), estabelece, para algumas situações específicas, que parte do procedimento de projeto pode ser executado baseando-se em verificações experimentais. Ainda segundo esta norma, os ensaios podem ser realizados buscando: estabelecer diretamente a resistência última ou o comportamento em serviço de elementos estruturais; obter propriedades específicas de materiais (para avaliação de novos materiais); reduzir incertezas de parâmetros de carga ou modelos de resistência.

A revisão da ABNT NBR 14861 (2011) apresenta em seu texto que os mecanismos de ruptura de uma laje alveolar com esforços cortantes podem ocorrer de duas formas: sendo a primeira, quando a tensão de cisalhamento supera a resistência à tração diagonal do concreto na nervura do alvéolo, e a segunda quando a tensão de cisalhamento se combina com as tensões de tração oriundas da protensão ou da flexão da peça.

Em certos casos em que o esforço cortante solicitante em uma laje alveolar protendida é maior que o esforço cortante resistente calculado, a alternativa utilizada para aumentar a resistência ao cisalhamento é o preenchimento de alguns alvéolos nas extremidades da laje com concreto adicional, podendo ser realizado na fábrica ou na obra. Um exemplo de laje alveolar com alvéolos preenchidos em suas extremidades e com gráfico do esforço cortante solicitante de cálculo é mostrado na Figura 5.

Figura 5: Esforços solicitantes em laje alveolar com preenchimento de alvéolos.



Fonte: FRANÇA (2012)

Na revisão da ABNT NBR 14861 (2011) é dado o método de verificação do cálculo da resistência à força cortante de lajes alveolares com ou sem capeamento estrutural e com ou sem preenchimento de alvéolos, para região fissurada.

Tendo em vista o explicitado, o presente trabalho visa estudar a influência do preenchimento de alvéolos em de lajes alveolares submetidas a esforço cortante além de fornecer parâmetros para pesquisadores e projetistas.

Por meio dos ensaios de força cortante nas lajes alveolares com preenchimento de alvéolo, busca-se verificar os equacionamentos normativos com relação aos resultados experimentais, assegurando maior entendimento e economia aos projetos.

A realização de ensaios em lajes alveolares com o preenchimento sendo realizado na pista de protensão e fora desta, ou seja, antes da liberação da protensão e após a sua liberação, tendem a indicar qual processo é o mais viável para uma dada situação de projeto.

Finalmente, a avaliação do impacto da resistência à compressão do concreto do material de preenchimento do alvéolo na resistência à força cortante da laje alveolar.

1.4 Metodologia

Este trabalho teórico-experimental foi dividido em três etapas, sendo elas:

A primeira etapa consiste da análise teórica sobre o comportamento e formulações para o projeto de lajes alveolares, bem como a análise de ensaios realizados por outros pesquisadores.

A segunda etapa consiste da experimentação física de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas, moldadas em fábrica de elementos pré-fabricados e, por sua vez, ensaiadas em ambiente de fábrica. Serão avaliadas: o número de preenchimento de alvéolos, a resistência à compressão do concreto de preenchimento, o instante do preenchimento do alvéolo (na pista de protensão e fora da pista) e a implantação do ensaio em ambiente de fábrica.

Para avaliar o estudo da influência do preenchimento de alvéolos em lajes alveolares submetidas ao esforço cortante será utilizado o ensaio padrão indicado no manual da FIP (1992) e na norma europeia EN1168 (2005). Será levado em consideração que a tensão de cisalhamento não é oriunda de momento torsor, ou seja,

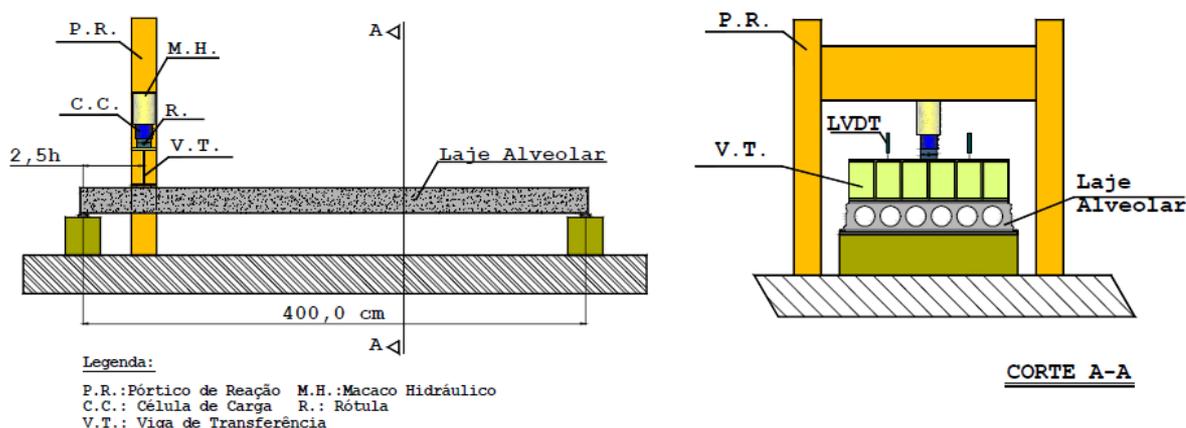
será garantido que a laje em estudo estará perfeitamente apoiada de modo a evitar esforços diferenciais.

Visando a uniformidade e maior confiabilidade dos ensaios a serem realizados, as amostras em estudo deverão pertencer ao mesmo lote de fabricação, ou seja, deverão possuir a mesma classe de concreto, o mesmo tipo de cordoalha, as mesmas dimensões e deverão ser submetidas às mesmas situações de ensaio.

Buscando ainda uma maior proximidade a condições reais de uso do elemento, as lajes alveolares deverão ser monitoradas desde a escolha de seus materiais constituintes antes do início de sua fabricação até a fase final dos ensaios e análises.

Os ensaios, conforme comentado anteriormente, seguirão as recomendações presentes em COSTA (2009), onde o desempenho de lajes alveolares foi avaliado por meio de ensaios que incluem os de força cortante, de acordo com Figura 6.

Figura 6: Esquema de ensaio de resistência à força cortante.



Fonte: Costa (2009)

Ao todo, é proposto neste trabalho que sejam estudadas 9 lajes alveolares pré-fabricadas protendidas, sendo que estas serão ensaiadas nas suas duas extremidades, totalizando 18 ensaios.

A terceira etapa da pesquisa consiste de analisar os resultados dos ensaios e compará-los com a formulação normativa da ABNT NBR 14861 (2011).

Finalmente, espera-se contribuir para o melhor entendimento sobre o preenchimento dos alvéolos e fornecer informações para o projeto de revisão futuro da ABNT NBR 14861 (2011).

1.5 Estrutura do texto

Este trabalho está dividido em:

1. Introdução:

Nesse item são apresentadas as considerações iniciais a respeito do tema lajes alveolares pré-fabricadas protendidas, bem como seu histórico de fabricação e emprego no país.

2. Objetivos:

O capítulo descreve os principais objetivos envolvidos no trabalho.

3. Justificativa:

As justificativas são expostas e argumentadas com base nas revisões bibliográficas e objetivos estabelecidos.

4. Metodologia:

A metodologia empregada é baseada no manual FIP com modificações amparadas no trabalho de CATOIA (2011).

5. Revisão Bibliográfica (literatura e estudo numérico):

Esse item aborda as considerações dos principais trabalhos desenvolvidos por pesquisadores ao redor do país. São discutidas as normas técnicas brasileiras a respeito do tema lajes alveolares protendidas. Um estudo numérico amparado nos equacionamentos e prescrições normativas é desenvolvido e discutido.

6. Programa experimental:

No programa experimental são apresentados os ensaios realizados nas lajes alveolares pré-fabricadas protendidas.

7. Análise dos resultados:

Na análise dos resultados são discutidos os resultados dos ensaios realizados.

8. Conclusões:

Neste item são estabelecidas as conclusões obtidas a partir do estudo e ensaios realizados nesse trabalho.

LAJES ALVEOLARES

Esse capítulo descreve os procedimentos de produção das lajes alveolares protendidas pré-fabricadas de acordo com a literatura técnica disponível e procedimentos de fábrica.

Serão descritos ainda os aspectos teóricos de projeto e norma técnica, por meio de uma análise teórica de exemplos numéricos.

2.1 Lajes alveolares

O processo de produção de lajes alveolares seguindo a discussão de diversos autores será exposto a seguir:

2.1.1 Processos de produção

Segundo FERNANDES (2007), as lajes alveolares protendidas podem apresentar diferentes geometrias internas, sendo o formato dos vazios: circular, oval, semi-ogival ou retangular. A diferença entre os formatos de alvéolos ocorre em função do sistema de produção, ou seja, do tipo de equipamento utilizado.

Usualmente são empregados dois métodos básicos de produção de lajes alveolares, sendo a fabricação por extrusão ou por fôrma deslizante. Existe a possibilidade de fabricação por formas fixas com tubos sacados ou mesmo com forma perdida, porém não é o convencional.

O processo de fabricação das lajes se dá pela execução de uma peça única ao longo de toda a pista, sendo essa normalmente longa, chegando a extensão de 200 metros.

As pistas podem ser constituídas tanto de formas metálicas quanto de concreto, com trilhos para apoiar a máquina de moldagem e as máquinas de corte que se deslocam sobre eles.

A primeira etapa para a produção das lajes alveolares protendidas trata-se da limpeza da pista de concretagem, eliminando qualquer tipo de resíduo sólido ou líquido que possa comprometer a qualidade visual e estrutural do elemento. Após a etapa de limpeza, os cabos de protensão são posicionados sobre a pista de concretagem e posteriormente são protendidos, por meio de macacos hidráulicos com uma determinada tensão.

Em seguida a ancoragem das cordoalhas por meio de cunhas de ancoragem é realizada na cabeceira da pista.

Petrucci (2009) explica que nas lajes alveolares protendidas é utilizada a pré-tração, pois a armadura é tracionada antes do lançamento do concreto, e a protensão se dá com a aderência entre o concreto e a mesma, após seu endurecimento.

A ABNT NBR 6118 (2007), define concreto com armadura ativa pré-tracionada (protensão com aderência inicial) como sendo o concreto protendido em que o pré-alongamento da armadura ativa é feito utilizando-se apoios independentes do elemento estrutural, antes do lançamento do concreto, sendo a ligação da armadura de protensão com os referidos apoios desfeita após o endurecimento do concreto, e salienta que a ancoragem no concreto é dada somente por aderência.

Normalmente os cabos são tensionados separadamente, por macacos hidráulicos que aplicam tensão em apenas um deles.

Segundo PETRUCCELLI (2009), o ideal é aplicar a protensão em todo o conjunto de uma só vez, pois a tensão do primeiro cabo esticado gera uma pequena deformação na cabeceira da pista, afetando o alongamento do segundo cabo. Sendo assim, cada cabo influencia o seguinte, havendo uma diferença entre os alongamentos medidos.

Após a etapa de protensão, o desmoldante é aplicado cuidadosamente sobre a pista de modo que não exista contato desse material com as cordoalhas.

FRANÇA (2012) afirma que no processo de fabricação por extrusão, o concreto com pequeno abatimento é empurrado para a pista pela máquina e que os alvéolos são

formados pela compactação do concreto por meio de tubos helicoidais, conforme a Figura 7.

Figura 7: Máquina extrusora e tubos helicoidais para fabricação de lajes alveolares.



Fonte: FRANÇA (2012)

Após a mistura, o concreto é lançado na parte superior da máquina. O concreto para utilizado pelo equipamento necessita possuir um pequeno abatimento, com valores próximos a zero. Para tanto, somente concretos com relação água/cimento (a/c) baixa, aproximadamente 0,30 a 0,40, são adotados.

Em decorrência da alta compactação aliada a baixa porosidade (reduzido número de vários proporcionado pelo baixo fator água/cimento), valores elevados de resistência do concreto podem ser obtidos, variando de aproximadamente 50 MPa a 75 MPa para resistência à compressão, e de 4 a 7 MPa para resistência à tração. A esses fatores soma-se ainda uma otimização de materiais, pois todos são utilizados de maneira adequada a se obter o melhor desempenho e menor consumo.

Após a extrusão, se houver a necessidade de cortes longitudinais, estes são realizados com o material ainda no estado fresco por meio de uma serra que desloca-se sobre trilhos instalados na pista de concretagem. Para corte transversais, feitos com o concreto já curado, uma outra serra com maior potencia é colocada sobre os trilhos e após marcados os locais de corte realiza-se o procedimento. Para o caso de lajes que terão seus alvéolos preenchidos, os mesmos são abertos em suas extremidades com o concreto ainda fresco.

De acordo com Petrucelli (2009), as curas a vapor e térmica são mais indicadas para acelerar o procedimento de liberação da protensão da pista e permitir uma nova etapa de produção.

FRANÇA (2012) afirma que ao tratar-se da produção de lajes alveolares protendidas, não é conveniente adotar a utilização da cura química, pois ao aplicar o produto na superfície do elemento, pode-se comprometer a interface de aderência entre laje e capa, quando realizar o capeamento.

2.1.2 Controle de qualidade

Para a realização de qualquer tipo de estudo que envolva ensaios laboratoriais, é necessário o conhecimento profundo das características de todos os materiais envolvidos, buscando o domínio das variáveis contidas e minimizando incertezas.

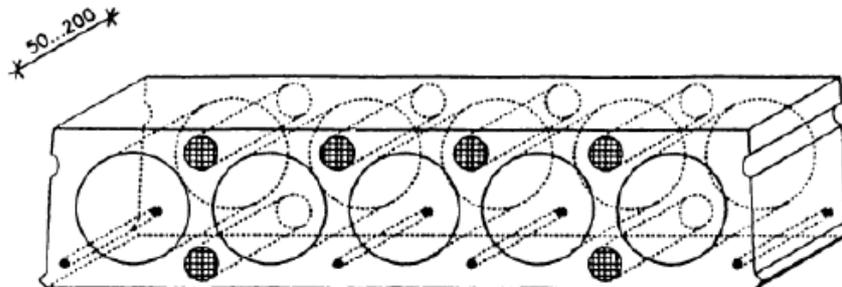
Para o estudo de lajes alveolares pré-fabricadas protendidas, seus componentes devem ser devidamente estudados, por meio de ensaios de caracterização dos materiais empregados em sua fabricação, tais como o aço e o concreto.

O aço por se tratar de um material industrializado, seu controle de qualidade naturalmente torna-se muito superior ao concreto, que muitas vezes é produzido no próprio local de fabricação das lajes. As características do aço normalmente são emitidas pela siderúrgica de origem. Informações cruciais como relaxação, deformação, resistência a tração, dentre outros, devem ser conhecidas por meio de certificados emitidos pelo fabricante, caso não seja de conhecimento, ensaios de caracterização devem obrigatoriamente ser realizados.

Segundo a FIP (1992), os valores característicos de resistência do concreto podem ser determinados a partir de ensaios de compressão normal (resistência a compressão) e compressão diametral (resistência a tração), realizado por meio de três a seis testemunhos cilíndricos de 50 a 200mm, sendo estes extraídos por meio de serra copo, da laje após a cura do concreto e ensaiados imediatamente ao fim da extração, Figura 8. A FIP afirma ainda que mesmo aceitando os corpos de prova extraídos como parâmetro de resistência, esse tipo de amostra possui desvio padrão superior a corpos de prova moldados. Por outro lado, a confecção de corpos de prova por meio da moldagem, torna-se muito difícil levando em conta o baixo fator

agua/cimento da mistura, logo seria necessário vibrar energicamente o material, algo que poderia levar a valores elevados e não confiáveis de resistência a compressão.

Figura 8: Posições para retirada de testemunhos em lajes alveolares.



Fonte:(FIP-1992)

A FIP (1992) menciona ainda que corpos de prova cúbicos ou cilíndricos podem ser utilizados, e que a correlação entre os seus valores de resistência relativa é apresentada no Código Modelo do CEB-FIP e em normas internacionais.

Os corpos de prova devem ser moldados com o mesmo concreto utilizado nas lajes, ou seja, sem qualquer tipo de modificação do material.

2.2 Mecanismos de ruptura

A fim de se evitar o colapso e assegurar o perfeito funcionamento, as lajes alveolares pré-fabricadas protendidas devem ser verificadas, embasando-se na literatura que mostra situações onde os colapsos ocorrem ou estão na eminência de acontecer.

O comportamento dos materiais constituintes das lajes sob essas situações serão abordados como mecanismos de ruptura, e nos ensaios realizados serão verificadas as ocorrências de tais padrões.

As características físicas (geométricas) das lajes alveolares influenciam nos mecanismos de ruptura, ou seja, altura efetiva da laje, espessura das nervuras, formato dos alvéolos, nível de protensão, resistência a compressão e a tração do concreto, aderência entre concreto e armadura ativa, aderência da capa estrutural, dentre outros, são determinantes no comportamento do elemento.

Segundo CATOIA (2011), normalmente as lajes alveolares apresentam diferentes mecanismos de ruptura próximo a seu colapso, tais como:

- i. Falha por perda de ancoragem, quando ocorre o escorregamento da armadura);
- ii. Falha por cisalhamento (onde a tensão no ponto crítico da nervura é superior a resistência de tração do concreto);
- iii. Falha por cisalhamento em região fissurada (ocorrência do efeito combinado de cisalhamento, flexão e escorregamento);
- iv. Falha por cisalhamento combinado com torção (surge em peças que não são totalmente planas);
- v. Falha por flexão (Estado Limite Ultimo – ELU, onde há grande possibilidade de escorregamento de armadura próximo ao apoio);
- vi. Falha por interação dos mecanismos de flexão e cisalhamento (sendo possível ocorrer em peças que possuem menores vãos e grandes carregamentos);
- vii. Falha por combinação de flexão e escorregamento da armadura ativa;
- viii. Separação da capa de concreto estrutural da laje.

Há basicamente dois tipos de aplicação de tensão em peças pré-fabricadas, a pré-tração, onde a protensão é imposta ao elemento e assegurada pela aderência entre a armadura ativa e o concreto, e a pós-tração, onde existem dispositivos mecânicos para introdução do esforço de protensão.

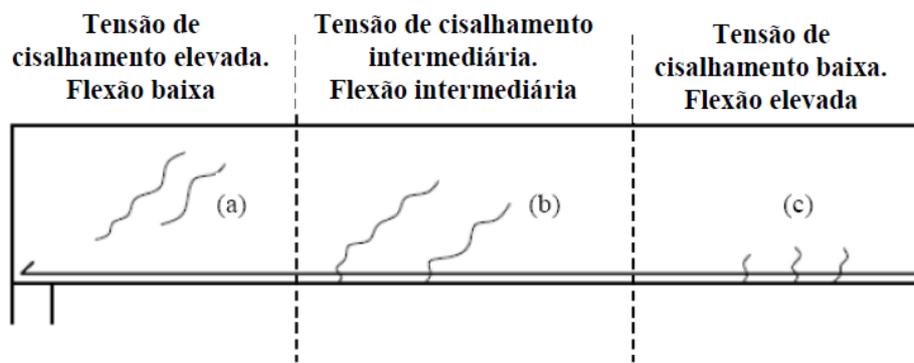
Em elementos com o uso de pré-tração, a falha de ancoragem é mais comum, se comparado a peças com pós-tração.

Os diversos mecanismos de ruptura dependem da flexão, do cisalhamento decorrente do cortante ou ainda de ambos combinados. Na Figura 9 há três padrões diferentes de fissuras. Na região próxima ao apoio, onde o cisalhamento tem seu máximo valor e o momento tem seu mínimo, as fissuras inclinadas de cisalhamento tendem a aparecer quando a tensão de tração atingir a resistência a tração do concreto, conforme (a). Para uma situação com carregamento distribuído, onde as

regiões localizadas entre os dois apoios apresentam os maiores valores de momento e os menores de cisalhamento, fissuras de flexão irão aparecer, (c).

Em regiões intermediárias, ou seja, $\frac{1}{4}$ ou $\frac{3}{4}$ do vão, as fissuras de flexão podem se propagar em fissuras inclinadas de cisalhamento, ou seja, há o surgimento de um padrão misto, (b), que são denominadas de fissuras de cisalhamento e flexão devido à interação dos mecanismos.

Figura 9: Elemento em concreto submetido a flexão e cisalhamento a) Fissuras na nervura decorrentes do cisalhamento; b) Fissuras de cisalhamento e flexão; c) Fissuras de flexão.



Fonte: COSTA (2009)

Segundo COSTA (2009), da mesma forma que o cortante pode vir a provocar fissuras decorrentes de seu efeito isolado ou em combinação com efeitos da flexão, a torção também pode provocar fissuras devido a efeitos isolados ou combinados a flexão.

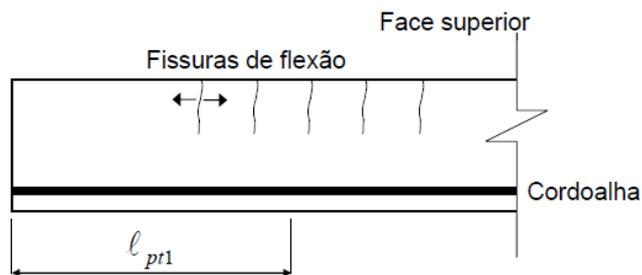
O mesmo autor afirma ainda que quando se possui um elemento composto (laje e capa estrutural), submetido a flexão, há o surgimento de tensões de cisalhamento entre as superfícies da capa e da laje, e que se esse valor for maior que o resistente do concreto, haverá a separação entre elementos.

2.2.1 Mecanismo de ruptura devido à flexão em lajes alveolares

PAJARI (1989) e EDEKLING (2006), afirmam que os mecanismos de ruptura de lajes alveolares, na flexão, podem estar associados a mecanismos isolados ou combinados, podendo ser:

- i. Ruptura da face superior da laje por tração decorrente da protensão, considerando o elemento sem armadura superior, caracterizada pelo aparecimento de fissuras junto a borda superior e próximas ao apoio. Esse padrão de ruptura não irá ocorrer durante um ensaio, e sim no ato da liberação da protensão na fábrica, Figura 10.

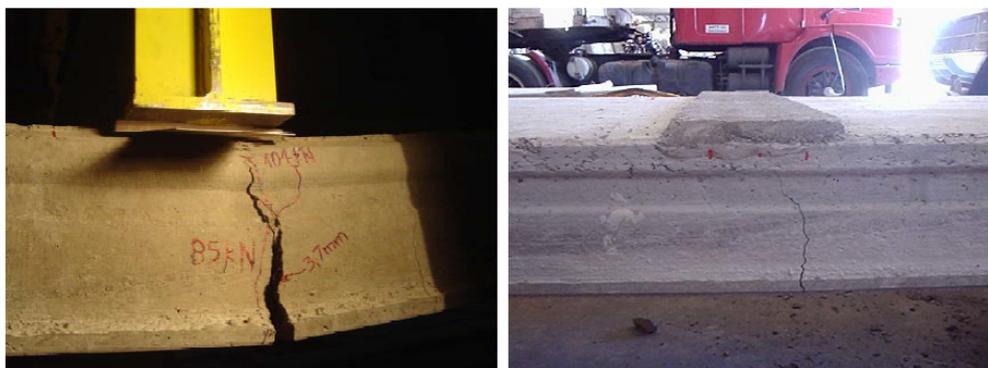
Figura 10: Fissuras na parte superior da peça que ocorrem no ato da liberação da protensão na fábrica.



Fonte: CATOIA (2011)

- ii. Ruptura das cordoalhas por tração em decorrência da solicitação por flexão;
- iii. Ruptura do concreto a compressão em decorrência da solicitação por flexão (Figura 11);
- iv.

Figura 11: Fissuras de flexão.



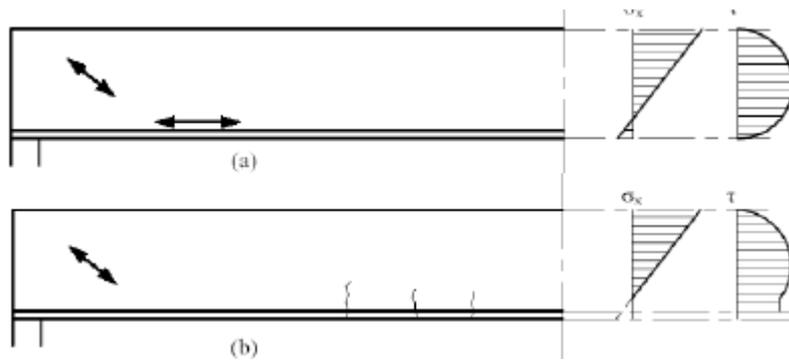
Fonte: CATOIA (2011)

2.2.2 Mecanismo de ruptura devido ao esforço cortante em lajes alveolares

A seguir são apresentados os principais mecanismos de ruptura por cisalhamento.

- i. Falha da nervura por tração decorrente do cisalhamento (Figura 12);

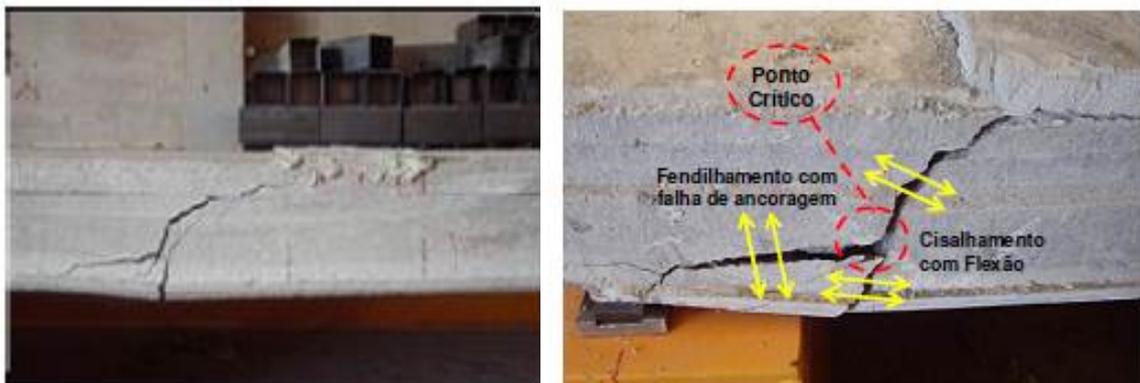
Figura 12 : Tensões normais e de cisalhamento em um elemento.



Fonte: CATOIA (2011)

- ii. Fissuração do concreto decorrente da interação entre cisalhamento e flexão (Figura 13);

Figura 13 : Interação de fissuras de cisalhamento com fissuras de flexão.



Fonte: CATOIA (2011)

- iii. Falha por compressão no concreto decorrente do cisalhamento;
- iv. Falha por escorregamento devido ao cisalhamento ao longo de uma fissura inclinada;
- v. Falha por falta de ancoragem dos cabos;

2.3 Resistência ao esforço cortante

Neste item serão apresentadas as formulações presentes na ABNT NBR 14861 (2011) referentes ao cálculo da resistência ao esforço cortante de lajes alveolares pré-fabricadas protendidas com e sem preenchimento de alvéolos.

2.3.1 Resistência de projeto

Um dos principais objetivos deste trabalho é o estudo da resistência de lajes alveolares protendidas ao esforço cortante.

Atualmente no Brasil, a análise da resistência de lajes alveolares em regiões próximas ao apoio é feita por meio da ABNT NBR 14861 (2011) e pela ABNT NBR 6118 (2007), sendo esta baseada em normas técnicas europeias.

Segundo ABNT NBR 14861 (2011), a verificação à força cortante deve ser feita na seção transversal mais crítica ao longo do vão do elemento, a partir da distância de 0,5 da altura da extremidade do seu apoio. Esta norma prevê que a resistência deve ser considerada satisfatória quando atender as seguintes condições:

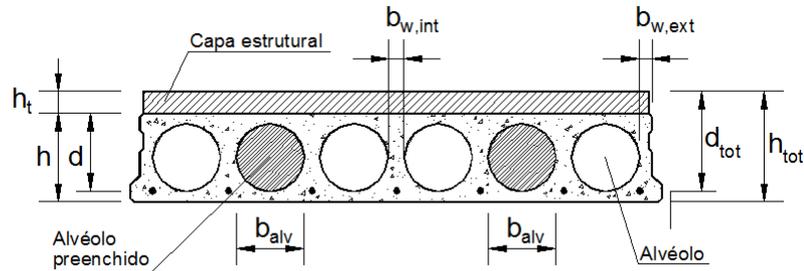
$$V_{Sd} \leq V_{Rd1} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2} \quad \text{ou} \quad V_{Sd} \leq V_{Rd2, \text{capa}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Considerando que V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo na seção; V_{Rd1} é a força cortante resistente de cálculo na seção; V_{Rd2} é a força cortante resistente de cálculo na seção para as diagonais comprimidas de concreto; e, $V_{Rd2, \text{capa}}$ é a força cortante resistente de cálculo na seção, das diagonais comprimidas de concreto da laje alveolar com capa estrutural de concreto e alvéolos preenchidos.

A Figura 14 mostra o esquema da seção transversal da laje alveolar com as dimensões consideradas para o cálculo e o preenchimento de alvéolos.

Figura 14 : Exemplo de seção transversal de laje alveolar com alvéolos preenchidos.



Fonte: ABNT NBR 14861 (2011)

De acordo com a equação (Eq. 1), tem-se:

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2} \cdot \nu \cdot f_{cd} \cdot 0,9 \cdot d \cdot \Sigma b_{w,1} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$V_{Rd2,capa} = \frac{1}{2} \cdot \nu \cdot f_{cd} \cdot 0,9 \cdot d_{tot} \cdot \Sigma b_{w,2} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\nu = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0,5 \quad (\text{Eq. 5})$$

Sendo:

- $\Sigma b_{w,1}$ e $\Sigma b_{w,2}$ são o somatório das nervuras (internas e externas) de laje alveolar e da parcela da seção com alvéolos, respectivamente;
- d é a altura útil da seção transversal da laje alveolar;
- d_{tot} é a altura útil da seção transversal da laje alveolar mais capa estrutural;
- f_{cd} é a resistência de cálculo a compressão do concreto.

Segundo a ABNT NBR 14861 (2011) a resistência ao esforço cortante em lajes alveolares pode ser aumentada com o preenchimento dos alvéolos. Quando este procedimento for adotado, o comprimento longitudinal deste ao longo dos alvéolos deve ser pelo menos maior que L_{pr} .

$$L_{pr} = L_{pt2} + L_{fc} \quad (\text{Eq. 6})$$

Sendo:

- L_{pt2} é o valor superior de projeto para o comprimento de transmissão;
- L_{fc} é a soma do comprimento necessário para atender as solicitações de força cortante com altura da seção transversal.

Segundo CAMILLO (2012), a resistência ao esforço cortante de uma laje alveolar depende diretamente da resistência do concreto e da cordoalha. Porém, utiliza-se sempre para o caso de cálculo da cortante a armadura tracionada na região que está sendo analisada. Decorrendo disso, ao se analisar o esforço cortante na região onde existe continuidade entre as lajes alveolares, deve-se utilizar para o cálculo somente a armadura tracionada, desconsiderando-se, portanto a parcela da armadura ativa que estará colaborando para a resistência à cortante.

Tanto o projeto de norma ABNT NBR 14861 (2011) quanto a ABNT NBR 6118 (2007), definem que a resistência à força cortante das lajes alveolares, numa determinada seção transversal, é calculada por meio da expressão (Eq. 7).

$$V_{Rd} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_t) + 0,15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad (\text{Eq. 7})$$

Sendo:

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

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

- f_{ctd} é a resistência tração de projeto do concreto;
- ρ_t corresponde à taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré-moldada;
- σ_{cp} é a tensão de compressão do concreto devido à força de protensão de projeto para o caso da laje sem alvéolo preenchido;
- b_w largura das nervuras internas e externas da laje alveolar;
- d altura útil da seção transversal.

Para se ter uma situação a favor da segurança, deve-se considerar que a resistência média em ensaios $V_{rup,med}$ seja superior a resistência última de cálculo V_{Ru} , calculada por meio da expressão (Eq. 8).

$$V_{rup,med} \geq V_{Ru} \quad (\text{Eq. 8})$$

Assim, o valor de $V_{rup,med}$ trata-se de um valor experimental e deverá ser comparado com o resultado teórico de V_{Ru} levando em conta ou não o coeficiente de segurança para se ter uma comparação dos resultados.

2.3.2 Preenchimento de alvéolos

O projeto ABNT NBR 14861 (2011) indica que para o preenchimento dos alvéolos, deve ser usado concreto adequado, com mesma resistência e durabilidade do concreto do elemento a ser preenchido.

A seção pode ser considerada como única, ou seja, há um comportamento conjunto entre a capa estrutural, a seção de projeto e a área dos alvéolos preenchidos, desde que seja garantida a aderência entre a capa estrutural e a superfície da laje alveolar bem como entre o concreto lançado no alvéolo e a superfície do alvéolo da laje alveolar. Dessa forma, o preenchimento dos alvéolos influencia nas considerações de cálculo.

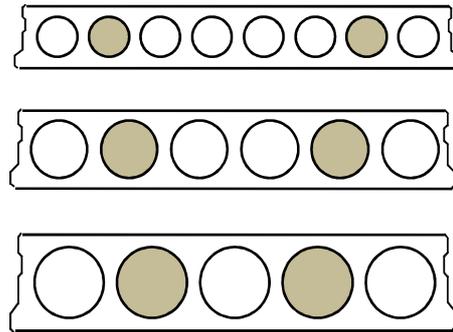
O projeto de norma ainda observa a necessidade de se garantir o completo preenchimento dos alvéolos, havendo controle da retração do concreto, para que não ocorram efeitos desfavoráveis para a aderência entre a laje e o concreto lançado nos alvéolos.

Segundo o projeto ABNT NBR 14861 (2011) o preenchimento dos alvéolos pode ocorrer tanto anteriormente à liberação da protensão, ou seja, logo após a extrusão ou moldagem da laje na pista de protensão (dependendo do processo de fabricação da laje) quanto posterior à liberação da protensão, na fábrica ou no local da obra.

Segundo CAMILLO (2012) o preenchimento de alvéolos, quando adotado, deve considerar somente até dois alvéolos preenchidos, com contribuição de 50% da largura do alvéolo.

A Figura 15 mostra o posicionamento recomendado para os alvéolos preenchidos, segundo a ABNT NBR 14861 (2011), para acréscimo da força cortante.

Figura 15: Posicionamento recomendado para preenchimento de concreto em dois alvéolos.



Fonte: ABNT NBR 14861 (2011)

Vale salientar que a ABNT NBR 14861 (2011) considera lajes com dois alvéolos preenchidos, e sugere que para casos onde exista consideração em projeto de mais do que dois alvéolos preenchidos, é necessário que haja uma base de amparo em evidência científica, com base em literatura técnica ou normalização internacional, estrangeira ou validação experimental.

2.4 Procedimento de preenchimento dos alvéolos

Segundo FRANÇA (2012) o processo de preenchimento de alvéolos consiste em produzir as lajes com aberturas na parte superior dos alvéolos para a entrada do concreto durante o processo de concretagem dos alvéolos. Tampões de poliestireno expandido (EPS) são posicionados para que a concretagem seja limitada a uma dada distância, ou seja, evitar que todo o alvéolo seja preenchido aumentando o peso da laje e o consumo de concreto desnecessariamente. Anteriormente a concretagem dos alvéolos, a superfície da parte interna dos alvéolos devem ser limpas e saturadas com água para não absorverem a água de amassamento do concreto do preenchimento.

Da Figura 16 a Figura 19, é mostrado o procedimento de preenchimento de alvéolos.

Figura 16 : Procedimento de abertura das janelas para preenchimento dos alvéolos, imediatamente após a extrusão da laje.



Fonte: FRANÇA (2012)

Figura 17. Tampões de poliestireno expandido (EPS) devidamente posicionados na laje.



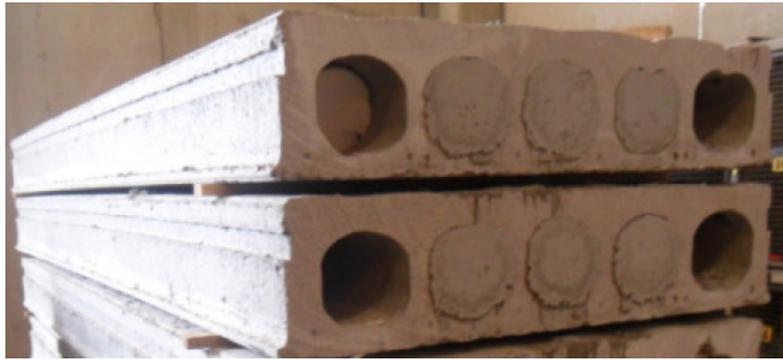
Fonte: FRANÇA (2012)

Figura 18: Lançamento de concreto para preenchimento dos alvéolos e preenchidos com concreto.



Fonte: FRANÇA (2012)

Figura 19: Lajes com alvéolos preenchidos.



Fonte: FRANÇA (2012)

A autora afirma ainda que há dois modos de se executar o preenchimento dos alvéolos:

- i. Preenchimento após a liberação da protensão na pista de concretagem. Nesse caso a laje é concretada e com a laje protendida os alvéolos são preenchidos, ou seja, depois que a força de protensão seja transmitida para o concreto;
- ii. Preenchimento antes da liberação da protensão na pista de concretagem. Nesse caso o preenchimento dos alvéolos é feito com as lajes ainda na pista de concretagem, antes da liberação da protensão, ou seja, antes que a força de protensão seja transmitida para o concreto.

2.4.1 Resistência ao esforço cortante de lajes alveolares com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão na pista

Um dos casos possíveis de se executar o preenchimento dos alvéolos é no instante após a concretagem da laje alveolar, ou seja, fazer o preenchimento antes da liberação da protensão na pista.

$$V_{Rd,a1} = V_{c,2} + V_{p,2} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$V_{c,2} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_2) \cdot \Sigma b_{w,2} \cdot d \quad (\text{Eq. 10})$$

$$V_{p,2} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,2} \cdot \Sigma b_{w,2} \cdot d \quad (\text{Eq. 11})$$

Sendo:

ρ_2 corresponde a taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré-moldada com o alvéolo preenchido;

$\Sigma b_{w,2}$ Somatória das espessuras das nervuras internas e externas da laje alveolar e parcela da seção com alvéolos preenchidos;

$$\Sigma b_{w,2} = \Sigma b_{w,1} + 0,5 \cdot d_{av} \cdot \frac{E_c}{E_p} \quad (\text{Eq. 12})$$

$\sigma_{cp,2}$ é a tensão de compressão do concreto devido à força de protensão de projeto para o caso da laje com alvéolo preenchido antes da liberação da protensão.

2.4.2 Resistência ao esforço cortante de lajes alveolares com alvéolos preenchidos após da liberação da protensão na pista

A outra possibilidade de se executar o preenchimento dos alvéolos é após a liberação da protensão.

$$V_{Rd,a2} = V_{c,2} + V_{p,1} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$V_{c,2} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_2) \cdot \Sigma b_{w,2} \cdot d \quad (\text{Eq. 14})$$

$$V_{p,1} = 0,15 \cdot \sigma_{cp,1} \cdot \Sigma b_{w,1} \cdot d \quad (\text{Eq. 15})$$

Sendo:

ρ_2 corresponde a taxa de armadura específica para a seção da laje alveolar pré-moldada sem o alvéolo preenchido;

$\Sigma b_{w,1}$ Somatória das espessuras das nervuras internas e externas da laje alveolar sem a parcela da seção com alvéolos preenchidos;

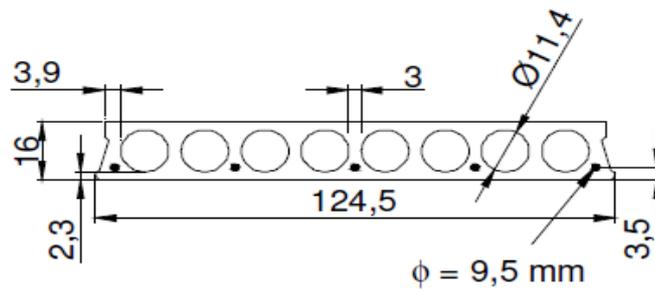
$\sigma_{cp,1}$ é a tensão de compressão do concreto devido à força de protensão de projeto para o caso da laje sem alvéolo preenchido antes da liberação da protensão.

2.5 Exemplos numéricos dos efeitos do preenchimento de alvéolos

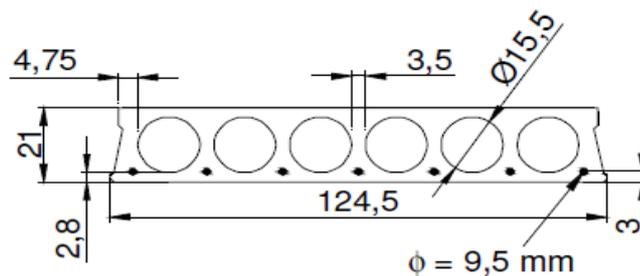
Neste item serão realizados exemplos de cálculo com variação da altura da seção, a resistência à compressão do concreto de preenchimento do alvéolo, o número de alvéolos preenchidos e o instante do preenchimento (antes da liberação dos cabos e após a liberação dos cabos), todos com valores de projeto, (Figura 20).

Figura 20: Exemplos de seções transversais considerados para os cálculos.

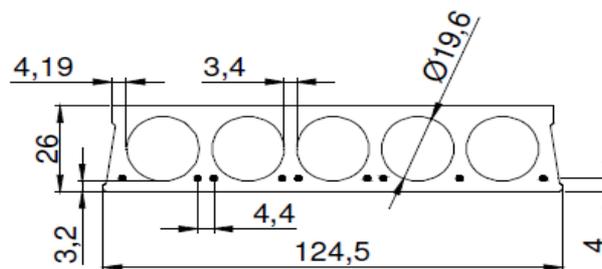
Laje com 16 cm de espessura



Laje com 21 cm de espessura



Laje com 26 cm de espessura



Fonte: CATOIA (2011)

Vale ressaltar que nestes exemplos não foi considerada a presença de capa estrutural de concreto e não há continuidade na ligação da laje alveolar. A Figura 20

mostra os três tipos de lajes alveolares considerados para os exemplos, todos extraídos de CATOIA (2011).

2.5.1 Resistência ao esforço cortante de lajes alveolares com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão na pista

A Tabela 1 mostra os resultados para o caso de lajes alveolares com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão.

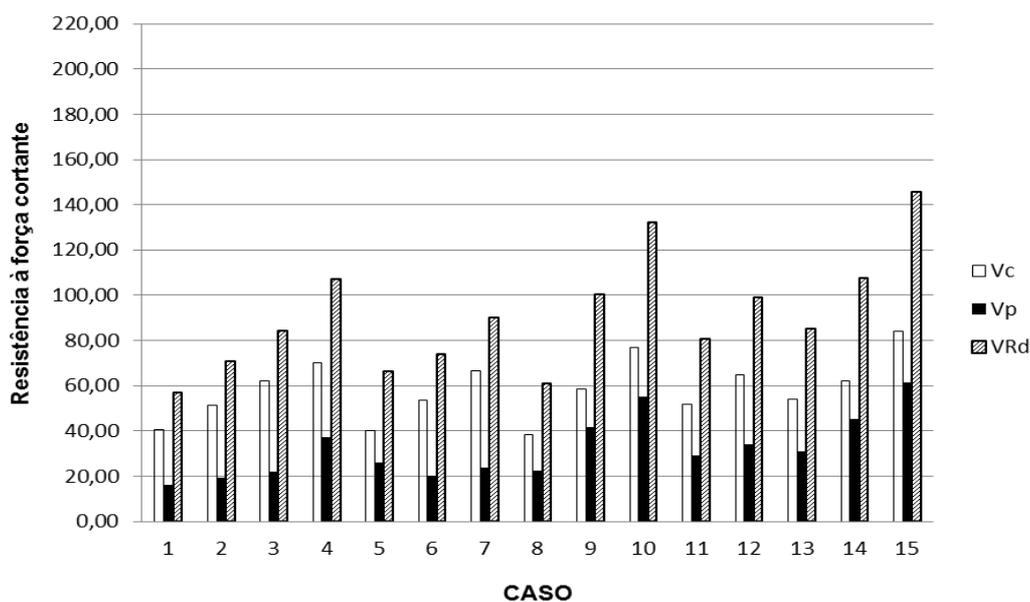
Tabela 1 – Resultados para o caso de lajes alveolares com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão

CASO	f_{ck} .laje (MPa)	f_{ck} -alv. (MPa)	h (m)	Número de alvéolos preenchidos	V_c (kN)	V_p (kN)	V_c/V_p	VRd (kN)
1	50	35	16	0	40,69	16,05	2,54	56,74
2	50	35	16	2	51,43	19,25	2,67	70,68
3	50	35	16	4	62,17	21,87	2,84	84,04
4	50	35	21	0	53,53	20,18	2,65	73,71
5	50	35	21	2	66,36	23,58	2,81	89,94
6	50	35	21	4	38,43	22,65	1,70	61,08
7	50	35	26	0	51,62	29,04	1,78	80,66
8	50	35	26	2	64,81	34,22	1,89	99,03
9	50	35	26	4	54,20	30,76	1,76	84,96
10	50	50	16	2	69,96	37,32	1,87	107,28
11	50	50	16	4	40,11	26,11	1,54	66,21
12	50	50	21	2	58,57	41,74	1,40	100,31
13	50	50	21	4	77,04	54,94	1,40	131,97
14	50	50	26	2	62,18	45,22	1,38	107,39
15	50	50	26	4	84,25	61,36	1,37	145,60

Fonte: PINHEIRO, *et al.*(2013)

A Figura 21 mostra a comparação dos resultados teóricos da Tabela 1.

Figura 21: Resultados para o caso de lajes alveolares com alvéolos preenchidos antes da liberação da protensão.



Fonte: PINHEIRO, *et al.*(2013)

A Tabela 2 mostra os resultados para o caso de lajes alveolares com alvéolos preenchidos após a liberação da protensão.

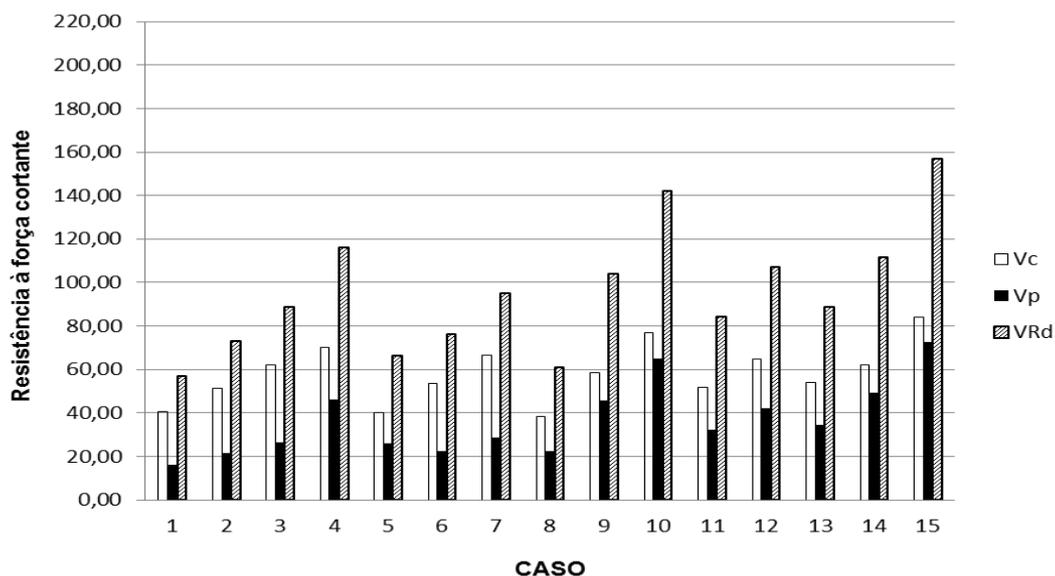
Tabela 2 – Resultados para o caso de lajes alveolares com alvéolos preenchidos após a liberação da protensão.

CASO	f_{ck} .laje (MPa)	f_{ck} .alv. (MPa)	h (m)	Número de alvéolos preenchidos	V_c (kN)	V_p (kN)	V_c/V_p	VRd (kN)
1	50	35	16	0	40,69	16,05	2,54	56,74
2	50	35	16	2	51,43	21,36	2,41	72,79
3	50	35	16	4	62,17	26,68	2,33	88,85
4	50	35	21	0	53,53	22,40	2,39	75,93
5	50	35	21	2	66,36	28,75	2,31	95,12
6	50	35	21	4	38,43	22,65	1,70	61,08
7	50	35	26	0	51,62	32,47	1,59	84,10
8	50	35	26	2	64,81	42,30	1,53	107,11
9	50	35	26	4	54,20	34,39	1,58	88,59
10	50	50	16	2	69,96	46,13	1,52	116,10
11	50	50	16	4	40,11	26,11	1,54	66,21
12	50	50	21	2	58,57	45,58	1,28	104,15
13	50	50	21	4	77,04	65,06	1,18	142,10
14	50	50	26	2	62,18	49,38	1,26	111,56
15	50	50	26	4	84,25	72,66	1,16	156,91

Fonte: PINHEIRO, *et al.*(2013)

A Figura 22 mostra os resultados contidos na Tabela 2.

Figura 22: Resultados para o caso de lajes alveolares com alvéolos preenchidos depois da liberação da protensão.



Fonte: PINHEIRO, *et al.*(2013)

De acordo com estes resultados preliminares, pode-se ver que o ganho de resistência a força cortante é significativo. Como exemplo pode-se mencionar a laje alveolar com altura de 16 cm e com preenchimento de 4 alvéolos, que apresenta um aumento de capacidade resistente de aproximadamente 71% , levando em consideração que o material de preenchimento do alvéolo tem resistência à compressão igual ao da laje alveolar, esse valor pode chegar a 82%. Esses valores, de acordo com a ABNT NBR 14861 (2011) precisam de comprovação experimental, pois a recomendação da citada norma é de até 2 alvéolos preenchidos.

Com relação à mudança da resistência à compressão do concreto de preenchimento do alvéolo, não houve ganho significativo, chegando a valores da ordem de 6% e chegando em alguns casos a menos de 2%.

Vale ressaltar que nos exemplos não foi considerada a presença da capa estrutural de concreto ou da continuidade entre lajes.

2.5.2 Considerações finais

De acordo com os resultados, pode-se dizer que o presente estudo pretende contribuir para que a ABNT NBR 14861 (2011) adquira maiores informações com relação ao ganho de resistência ao cisalhamento de lajes alveolares protendidas com o preenchimento de mais de 2 alvéolos. Isso é de grande importância, pois foi visto que o ganho de resistência é significativo e, além disso, na literatura técnica nacional, resultados de trabalhos de outros pesquisadores não foram conclusivos quanto a real influência do preenchimento de dois ou mais alvéolos. Assim, existe a necessidade de estabelecer uma correlação entre o ganho de resistência ao esforço cortante com o número de alvéolos preenchidos, a fim de se analisar a viabilidade do processo e possuir um maior conhecimento do comportamento de lajes alveolares protendidas que passam por este procedimento.

A EM 1168 (2005) estabelece que o fator de contribuição dos alvéolos preenchidos a seção da laje é de $2/3$. O presente trabalho também busca aferir o valor de contribuição garantindo maior confiabilidade.

Neste capítulo será abordado o programa experimental desenvolvido nesta pesquisa. Vale destacar que os ensaios ocorreram com o apoio de uma empresa privada do setor de pré-fabricados atuante no mercado nacional e internacional.

3.1 Considerações iniciais

Para a realização do programa experimental esta pesquisa contou com o apoio da maior empresa de pré-fabricados do país, a Cassol Pré-Fabricados Ltda. Esta empresa possui cinco fábricas localizadas nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A sua produção de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas ocorre em todas as cinco unidades, tendo como destino obras localizadas em várias regiões do Brasil e países vizinhos. Cada unidade fabril conta com um laboratório de controle tecnológico do concreto. A matriz localizada em Araucária-PR, possui ainda um laboratório de desenvolvimento, onde foram realizados os ensaios deste trabalho.

Os elementos estudados foram monitorados desde o recebimento da sua matéria prima antes do início de sua fabricação ate a fase final dos ensaios e análises.

A fim de se garantir a uniformidade e confiabilidade dos ensaios, as amostras em estudo pertenceram ao mesmo lote de fabricação, ou seja, foi garantido que possuíam a mesma classe de concreto, o mesmo tipo de cordoalha, as mesmas dimensões, o mesmo processo de fabricação, o mesmo processo de cura. Assegurou-se ainda que todas as amostras fossem ensaiadas sob as mesmas condições.

Os elementos utilizados foram lajes do tipo alveolares pré-fabricadas protendidas, produzidas por extrusão, com altura de 200 mm e comprimento de 6000 mm.

A referida empresa apoiou a realização dos ensaios deste trabalho, fornecendo todos os materiais, equipamentos e mão de obra. Tratando-se de uma empresa atuante no mercado, ou seja, que não está unicamente voltada a pesquisa, determinadas informações de propriedade exclusiva da instituição, tais como processos produtivos e equipamentos, não serão expostas.

3.2 Materiais utilizados

Neste item serão apresentados os principais materiais utilizados na fabricação das lajes alveolares protendidas pré-fabricadas utilizadas nessa pesquisa.

3.2.1 Concreto

Para a produção dos elementos ensaiados foram utilizados três misturas distintas de concreto:

- i. Concreto para produção das lajes – 35 MPa com abatimento de 0 mm;
- ii. Concreto para preenchimento de alvéolos – 35 MPa com abatimento de 150 ± 20 mm;
- iii. Concreto para preenchimento de alvéolos – 45 MPa com abatimento de 80 ± 10 mm.

Corpos de prova cilíndricos de 100x200 mm foram moldados para a realização dos ensaios de liberação das lajes na pista de produção e também para ensaios de resistência a compressão em 28 dias. Corpos de prova extras foram reservados para a execução do ensaio de modulo de elasticidade.

Figura 23: Central de produção de concreto.



Fonte: O AUTOR

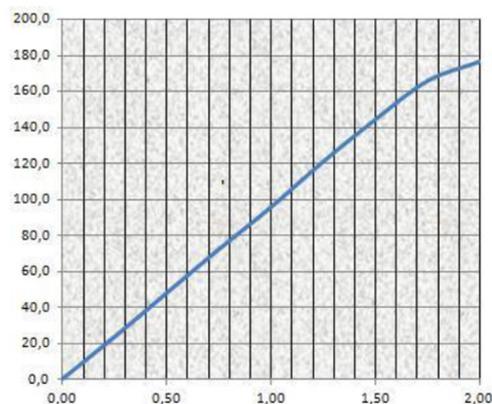
3.2.2 Cordoalhas

O aço empregado na fabricação das lajes alveolares protendidas são cordoalhas para estruturas protendidas.

Ensaio de controle de qualidade foram realizados no lote usado na produção das lajes, segundo a ABNT NBR 6349 (2008) – Barras, cordoalhas e fios de aço para estruturas de protensão - Ensaio de tração.

A especificação do material é CP-190RB 12,7mm. A amostra analisada atendeu as exigências da norma ABNT NBR 7483 (2008) – Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido, conforme dados da Figura 24e da Tabela 3.

Figura 24: Gráfico carregamento (kN) x deformação (mm) do ensaio de tração da cordoalha.



Fonte: RELATÓRIO TECNICO DE ENSAIO – CASSOL (2014)

Tabela 3: Resultado do ensaio de tração das cordoalhas.

Parâmetro	Unidade	Obtido	Especificado
Massa Linear	kg/m	0,790	---
Alongamento	%	7,0	3,5 mínimo
Módulo de elasticidade	GPa	202	---
Carga a 1% de alongamento	kN	176,9	165,3 mínimo
Carga de ruptura	kN	195,5	183,7 mínimo
Varição do diâmetro	mm	+0,2	-0,2 a +0,4
Área da seção de aço da cordoalha	mm ²	100,8	98,6 a 102,9

Fonte: RELATÓRIO TECNICO DE ENSAIO – CASSOL (2014)

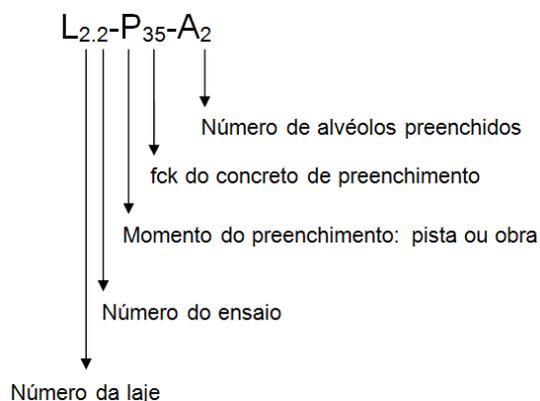
3.3 Modelos estudados

Neste item serão apresentadas as principais características físicas e geométricas das lajes alveolares pré-fabricadas protendidas utilizadas nessa pesquisa.

3.3.1 Tipologia

Os exemplares foram nomeados de modo a facilitar a sua identificação. Foi criado um rótulo para cada elemento, conforme exemplo mostrado na Figura 25. O exemplo trata do ensaio da segunda extremidade da laje alveolar pré-fabricada protendia de número 2, que possui dois alvéolos preenchidos com concreto com resistência à compressão de 35 MPa sendo o preenchimento realizado com a pista protendida ($L_{2.2}-P_{35}-A_2$).

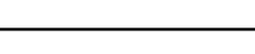
Figura 25: Exemplo de rótulo para identificação do elemento.



Fonte: O AUTOR

As tipologias de lajes e preenchimentos adotados são expostas na Tabela 4.

Tabela 4 Tipologia de lajes, locais e tipos de preenchimento

Seção	Exemplar	Caso
	L _{1,1} -A ₀	1
	L _{1,2} -A ₀	
	L _{2,1} -P ₃₅ -A ₂	2
	L _{2,2} -P ₃₅ -A ₂	
	L _{3,1} -O ₃₅ -A ₂	3
	L _{3,2} -O ₃₅ -A ₂	
	L _{4,1} -P ₄₅ -A ₂	4
	L _{4,2} -P ₄₅ -A ₂	
	L _{5,1} -O ₄₅ -A ₂	5
	L _{5,2} -O ₄₅ -A ₂	
	L _{6,1} -P ₃₅ -A ₄	6
	L _{6,2} -P ₃₅ -A ₄	
	L _{7,1} -O ₃₅ -A ₄	7
	L _{7,2} -O ₃₅ -A ₄	
	L _{8,1} -P ₄₅ -A ₄	8
	L _{8,2} -P ₄₅ -A ₄	
	L _{9,1} -O ₄₅ -A ₄	9
	L _{9,2} -O ₄₅ -A ₄	

Fonte: O AUTOR

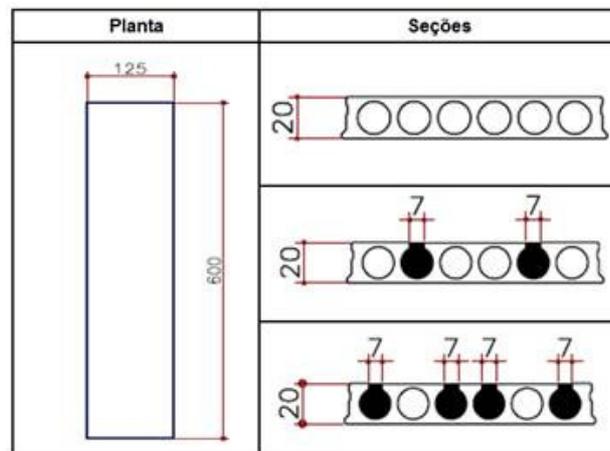
Conforme a Tabela 4, foram estudadas 9 lajes alveolares, sendo ambas as extremidades ensaiadas.

3.3.2 Geometria

A geometria das lajes utilizadas nos ensaios bem como a disposição e número de alvéolos preenchidos é mostrada na Figura 26.

O projeto estrutural detalhado é exposto no Anexo I.

Figura 26: Geometria das lajes [cm].



Fonte: O AUTOR

As dimensões das lajes foram adotadas tendo em vista que as lajes com altura nominal de 200 mm são uma das mais utilizadas pelo mercado nacional, tornando o ensaio o mais próximo possível de uma situação real de emprego do elemento estrutural.

A escolha do comprimento de 6000 mm se deu pela necessidade de garantia do uso de ambas as extremidades da laje para a realização de ensaios, ou seja, com o intuito de gerar uma prova e contra prova com o mesmo elemento buscou-se um comprimento tal que não se afetasse o objetivo principal dos ensaios – resistência ao esforço cortante.

3.4 Produção dos exemplares

Para esta pesquisa foram empregadas lajes alveolares protendidas produzidas por extrusão, possuindo a mesma tipologia e pertencendo ao mesmo lote de fabricação, fabricadas no dia 23/10/2013.

Ao todo 09 exemplares foram produzidos, destes 08 tiveram alvéolos preenchidos com concreto, sendo 04 realizados no mesmo dia da produção e 04 no dia seguinte, ou seja, 24/10/2013. Os elementos foram fabricados de acordo com os Projetos 01 e 02 do Anexo I.

Para as lajes com alvéolos preenchidos, o procedimento foi realizado com duas classes distintas de concreto, além de dois momentos de execução.

O objetivo de se empregar duas classes distintas de concreto é o de estudar a influência do tipo de preenchimento na resistência ao esforço cortante das lajes.

Os diferentes momentos de preenchimento, com a pista protendida ou com a pista “desprotendida”, teve o objetivo de estudar influência do local e momento de preenchimento, simulando a situação de execução do procedimento em fábrica ou em obra.

O processo produtivo foi controlado desde a etapa de recebimento da matéria prima até a liberação para estocagem. A fabricação desses elementos é detalhada no item 3.4.5.

A seguir será exposto o método de produção empregado para fabricação das lajes.

3.4.1 Equipamentos utilizados

A produção por extrusão consistiu basicamente no processo onde um equipamento foi alimentado com concreto, fazendo a confecção de uma peça única sobre armadura protendida devidamente posicionada ao longo da pista de concretagem.

O equipamento de extrusão utilizado é de fabricação própria da Cassol Pré-fabricados, é exposto na Figura 27.

Figura 27: Equipamento para produção de lajes alveolares protendidas.



Fonte: O AUTOR

A pista de concretagem trata-se de um dispositivo em concreto com sua face superior revestida em aço e com trilhos para a movimentação dos equipamentos de fabricação e corte das lajes. É necessário ainda que seja possível o posicionamento, protensão e desprotensão de armaduras usadas nas lajes, Figura 28.

Figura 28: Pista de concretagem.



Fonte: O AUTOR

As lajes alveolares em estudo possuem como armadura, cordoalhas que são protendidas (tensionadas) por um equipamento hidráulico, constituído por um macaco automático de protensão (MAP) ligado a uma unidade motriz (UM) que possui um indicador de tensão, Figura 29.

Figura 29: Equipamento para protensão.



Fonte: O AUTOR

Quando existir a necessidade de recortes nas lajes, normalmente o processo é realizado com o concreto ainda em seu estado fresco por meio do equipamento específico para corte no estado fresco.

Para a realização do preenchimento de alvéolos, houve a necessidade de aberturas longitudinais nos alvéolos. Para essa etapa não foi utilizado o equipamento de corte no estado fresco, pois a área a ser serrada era extremamente reduzida. Esse método será detalhado no item 3.4.6 .

Após o processo de cura inicial e liberação das lajes para corte, estas são serradas com uso do equipamento para corte de concreto no estado endurecido Figura 30.

Figura 30: Equipamento para corte no estado endurecido.



Fonte: O AUTOR

Vale salientar que a utilização de equipamentos é acompanhada por profissionais capacitados com procedimentos de fábrica.

3.4.2 Materiais utilizados

Todos os materiais empregados na fabricação das lajes alveolares protendidas desse estudo foram controladas desde seu recebimento.

A amostragem foi realizada seguindo as recomendações da ABNT NBR NM 26, Agregados – Amostragem.

Todos os ensaios de caracterização física foram executados seguindo as normas técnicas nacionais vigentes, conforme disposto na ABNT NBR 14931 (2011) Lajes alveolares pré-fabricadas de concreto protendido – Requisitos e procedimentos. Seguiram-se ainda as prescrições contidas no manual da Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto (ABCIC), órgão que regula e controla a qualidade do pré-fabricado nos países.

Os ensaios realizados foram:

- i. Determinação da composição granulométrica dos agregados;
- ii. Determinação da massa específica e massa específica aparente dos agregados;
- iii. Determinação da absorção de água;
- iv. Determinação da porcentagem de material pulverulento;
- v. Determinação de impurezas orgânicas;
- vi. Determinação da resistência a tração do aço;
- vii. Determinação do abatimento do concreto pelo molde de tronco cônico;
- viii. Determinação da resistência a compressão do concreto;
- ix. Determinação do módulo elástico do concreto;

3.4.3 Preparação da pista de concretagem

A etapa de limpeza da pista de concretagem visou eliminar qualquer tipo de resíduo sólido ou líquido que pudesse comprometer a qualidade visual e estrutural do elemento, Figura 31.

Figura 31: Limpeza da pista de concretagem.



Fonte: O AUTOR

Realizada a limpeza da pista de concretagem, foi aplicado o desmoldante oleoso de origem vegetal em toda a sua extensão (Figura 32).

Figura 32: Aplicação de desmoldante.



Fonte: O AUTOR

3.4.4 Protensão dos cabos

Após a etapa de limpeza e aplicação do desmoldante os cabos de protensão (cordoalhas) foram posicionados sobre a pista de concretagem, Figura 33.

Figura 33: Posicionamento das cordoalhas.



Fonte: O AUTOR

Após serem posicionadas as cordoalhas foram protendidas (tensionadas) por meio de macacos hidráulicos, Figura 34 e Figura 35.

A disposição, quantidade e tensão nas cordoalhas foram estabelecidas nos Projetos 01 e 02 do Anexo I.

Figura 34: Equipamento para protensão.



Fonte: O AUTOR

Figura 35: Aplicação da tensão nas cordoalhas.



Fonte: O AUTOR

Em seguida foi realizada a ancoragem das cordoalhas por meio de cunhas de ancoragem que são presas a cabeceira da pista, Figura 36.

Figura 36: Cunhas e porta-cunhas.



Fonte: O AUTOR

A Figura 37 mostra a pista de protensão pronta para receber o concreto, ou seja, com todas as cordoalhas protendidas e com o desmoldante aplicado.

Figura 37: Pista com cordoalhas protendidas.



Fonte: O AUTOR

3.4.5 Extrusão

O processo de fabricação por extrusão consistiu em empurrar o concreto com abatimento baixo (próximo a zero) para a pista de concretagem por meio de uma máquina que forma alvéolos por meio da compactação do concreto através de tubos helicoidais,

Figura 38.

Figura 38: Tubos helicoidais para fabricação de lajes alveolares.



Fonte: FRANÇA (2012)

Após a mistura do concreto na central dosadora, o material foi lançado na parte superior da máquina, Figura 39.

Figura 39: Alimentação da máquina extrusora com concreto.



Fonte: O AUTOR

Concluída a etapa de extrusão, as lajes passaram pelo processo de medição com posterior marcação dos locais de corte e abertura de alvéolos para preenchimento, Figura 40.

Figura 40: Marcação dos locais de corte nas lajes.



Fonte: O AUTOR

Com as marcações concluídas, as lajes recebem um tratamento em sua superfície superior a fim de garantir uma ponte de aderência entre o elemento e a capa estrutural que será concretada após sua montagem (Figura 41).

Figura 41: Superfície após tratamento de aderência.



Fonte: O AUTOR

As aberturas dos alvéolos a serem preenchidos foram executadas em suas extremidades com o concreto ainda fresco, conforme descrito no próximo item.

3.4.6 Preenchimento de alvéolos

O processo consistiu em romper a parte superior das lajes na região localizada entre as almas dos alvéolos de modo a se proporcionar um acesso para o preenchimento. Para o rompimento, foi utilizada uma régua de madeira de modo a evitar a danificação da estrutura do elemento (Figura 42).

Figura 42: Abertura dos alvéolos.



Fonte: O AUTOR

Ao final das aberturas dos nichos, foi realizado o preenchimento dos alvéolos com o uso de um concreto de abatimento mais elevado (Figura 43). Essa etapa foi realizada em duas etapas, sendo que parte das lajes tiveram o processo executado com a pista protendida (concreto da laje recém extrudado) e parte após a desprotensão da pista.

Figura 43: Preenchimento dos alvéolos.



Fonte: O AUTOR

Terminado o preenchimento de alvéolos, as lajes foram submetidas ao processo de cura térmica a vapor, especialmente indicada para acelerar o procedimento de liberação da protensão da pista.

Os pontos de saída de vapor foram estrategicamente posicionados de modo a abranger toda a extensão do elemento. As lajes foram cobertas com lonas para evitar a perda de calor para o ambiente (Figura 44).

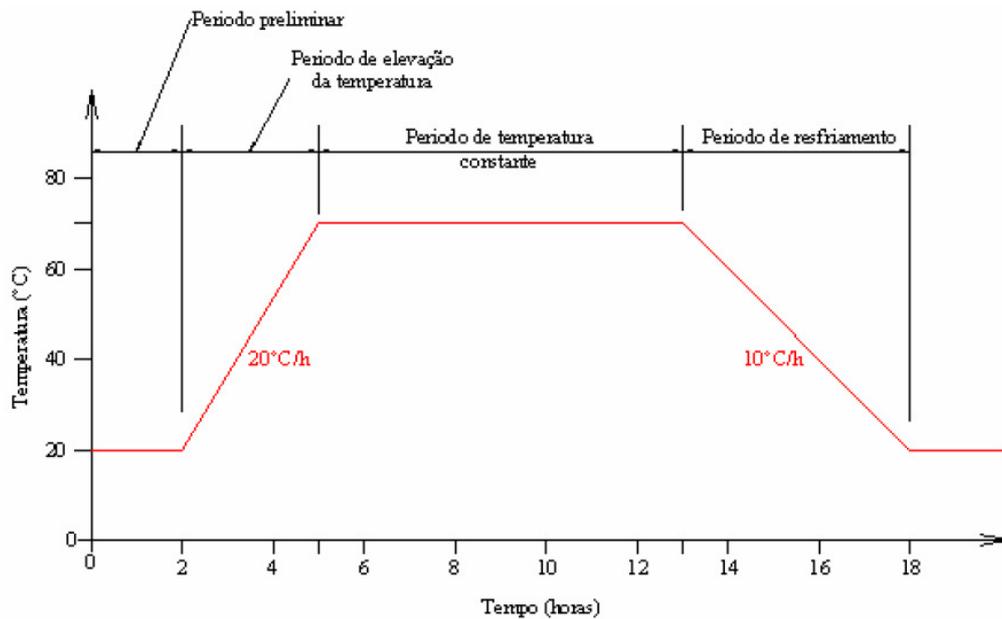
Figura 44: Cura a vapor.



Fonte: O AUTOR

O processo de cura a vapor seguiu o ciclo típico de aquecimento e resfriamento, Figura 45.

Figura 45: Ciclo típico de cura a vapor.



Fonte: EL DEBS (2000)

Ao final do processo de cura e após a liberação da pista de concretagem pelo laboratório, foi executado o corte das lajes por meio do equipamento de corte no estado endurecido (Figura 46).

Figura 46: Execução de corte em lajes.



Fonte: O AUTOR

Finalizado o processo de corte das lajes, estas foram transportadas e armazenadas até que atingisse sua idade para ensaio (Figura 47).

Figura 47: Transporte e armazenamento das lajes.



Fonte: O AUTOR

Vale destacar que as lajes foram armazenadas em ambiente coberto, ou seja, sem a incidência de intempéries, para minimizar efeitos de fluência e de retração.

3.5 Ensaios realizados

Neste item são apresentados os ensaios realizados nas lajes alveolares protendidas pré-fabricadas.

3.5.1 Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados para os ensaios das lajes foram:

- 1) Pórtico de ensaio com capacidade de 400 kN (Figura 48);

Figura 48: Pórtico para ensaio.



Fonte: O AUTOR

2) Célula de carga com capacidade de 500 kN (Figura 49);

Figura 49: Célula de carga.



Fonte: O AUTOR

3) Módulo de aquisição de dados ALMEMO 2390-5 (Figura 50);

Figura 50: Módulo de aquisição de dados.



Fonte: O AUTOR

4) 02 LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) com precisão de 0,01mm (Figura 51);

Figura 51: LVDT utilizado.



Fonte: O AUTOR

- 5) Prensa micro processada para ensaio com capacidade de 1000 kN (6) Figura 52);

Figura 52: Prensa para ensaio.



Fonte: O AUTOR

- 7) Extensômetros para ensaios de módulo de elasticidade com precisão de 0,01mm (Figura 53);

Figura 53: Extensômetros utilizados.



Fonte: O AUTOR

- 8) Equipamento para retífica de corpos de prova de concreto (Figura 54).

Figura 54: Retífica para os corpos-de-prova de concreto.

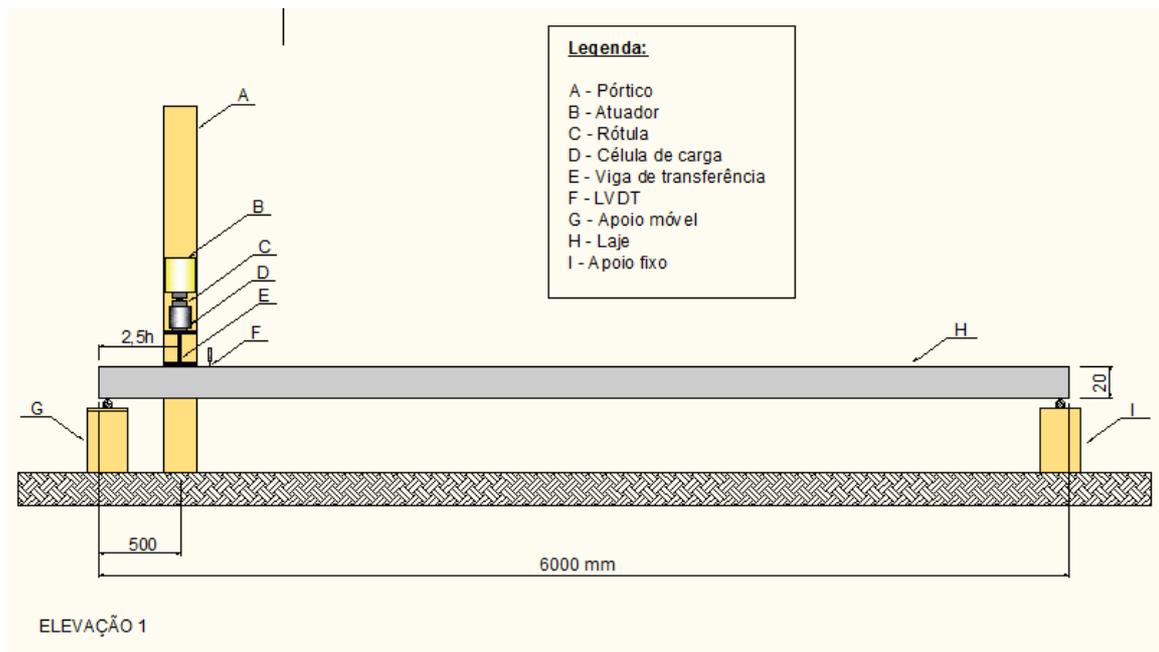


Fonte: O AUTOR

3.5.2 Procedimentos e arranjos (*test set-up*)

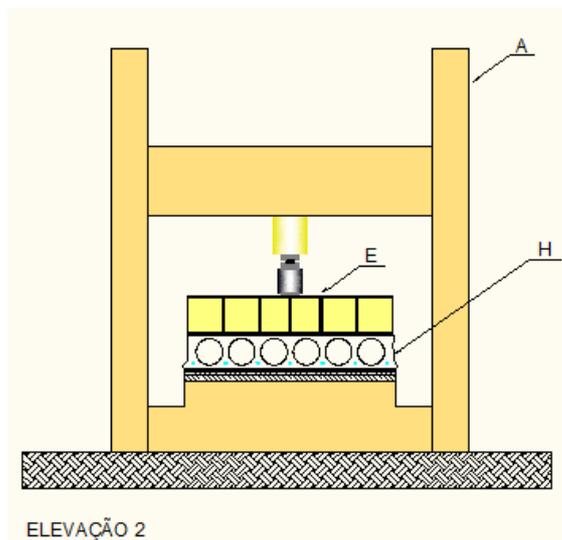
Os ensaios foram executados conforme o Método de Ensaio Padrão da FIP (1992) do que diz respeito ao local de aplicação da carga no elemento, Figura 55 e Figura 56.

Figura 55: Esquema de ensaio de resistência a força cortante – ELEVAÇÃO 1.



Fonte: O AUTOR

Figura 56: Esquema de ensaio de resistência a força cortante – ELEVAÇÃO 2.



Fonte: O AUTOR

Foi utilizado um pórtico modular de ensaios com capacidade para 400 kN, com regulagem de altura e posição de aplicação do carregamento.

Para cada elemento realizou-se o ensaio em nas duas extremidades, com o objetivo de se obter prova e contra prova.

Os elementos ensaiados foram posicionados sobre dois apoios:

- i. Fixo: apoio metálico rígido com elemento de contato em madeira e neoprene (Figura 57);

Figura 57: Aparelho de apoio fixo.



Fonte: O AUTOR

- ii. Móvel: apoio metálico rígido com elemento de contato em madeira e neoprene com sua base engraxada (Figura 58);

Figura 58: Aparelho de apoio móvel.



Fonte: O AUTOR

Após posicionar a laje, aplicou-se uma fina camada de areia sobre a laje na região de apoio da viga de transferencia de carga do atuador para o elemento ensaiado, afim de se promover uma melhor e mais uniforme distribuição do carregamento (Figura 59).

Figura 59 : Aplicação de areia sobre a laje.



Fonte: O AUTOR

Com a viga de transferencia instalada, posicionou-se o portico de ensaio sobre a laje e executou-se ligalçao da célula de carga e transdutores ao modulo de aquisição de dados (Figura 60).

Figura 60: Montagem do esquema de ensaio.



Fonte: O AUTOR

Todos os procedimentos descritos foram utilizados em todos os ensaios de laje alveolar.

3.5.3 Execução dos ensaios

Para os ensaios realizados nas lajes em estudo, tem-se que: f_c é a resistência a compressão do concreto de fabricação da laje, E_c o módulo de elasticidade do concreto de fabricação da laje, $f_{c,alv}$ a resistência a compressão do concreto para preenchimento do alvéolo, E_p é módulo de elasticidade do concreto de preenchimento dos alvéolos da laje, $f_{t,aço}$ a resistência a tração da cordoalha de fabricação da laje, P a força de protensão nas cordoalhas, L_{laje} o comprimento da laje, h_{laje} a altura da laje, $\phi_{Alvéolo}$ o diâmetro dos alvéolos e $\sum b_w$ o somatório das nervuras internas e externas da laje mais a parcela de contribuição da seção com alvéolos preenchidos.

3.5.3.1 Ensaio da laje 01:

A Laje 01 foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4.5 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.4.6.

A Figura 61 e Figura 62 mostram os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para os lados A e B, respectivamente.

Figura 61: Ensaio da laje: L_{1.1}-A₀.



Data do ensaio: 20/11/2013 - LADO A	
$E_{c,laie} = 30,86 \text{ GPa}$	$E_{c,alv} = 0 \text{ GPa}$
$f_{c,laie} = 56,83 \text{ MPa}$	$f_{c,alv} = 0 \text{ MPa}$
$f_{t,aco} = 195,5 \text{ MPa}$	$P = 1026,37 \text{ kN}$
$h_{laie} = 200 \text{ mm}$	$\sum b_w = 315 \text{ mm}$
$L_{laie} = 6000 \text{ mm}$	$\phi_{Alveólo} = 150 \text{ mm}$
7 cordoalhas $\phi 12,7 \text{ mm}$	

Dados gerais



Modelo montado para ensaio



Ruptura

Fonte: O AUTOR

Figura 62: Ensaio da laje: L_{1.2}-A₀.

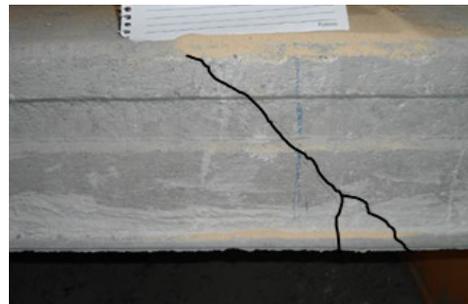


Data do ensaio: 20/11/2013 - LADO B	
$E_{c,laie} = 30,86 \text{ GPa}$	$E_{c,alv} = 0 \text{ GPa}$
$f_{c,laie} = 56,83 \text{ MPa}$	$f_{c,alv} = 0 \text{ MPa}$
$f_{t,aco} = 195,5 \text{ MPa}$	$P = 1026,37 \text{ kN}$
$h_{laie} = 200 \text{ mm}$	$\sum b_w = 315 \text{ mm}$
$L_{laie} = 5450 \text{ mm}$	$\phi_{Alveólo} = 150 \text{ mm}$
7 cordoalhas $\phi 12,7 \text{ mm}$	

Dados gerais



Modelo montado para ensaio



Ruptura

Fonte: O AUTOR

Durante os ensaios da laje 01 a célula de carga utilizada nos ensaios apresentou problema de comunicação com o módulo de aquisição de dados não salvando os valores de carregamento e deslocamento dos dois ensaios. O valor máximo da carga de ruptura para ambos os modelos foi obtido por meio das anotações realizadas pelo operador do módulo de aquisição. Os valores máximos são conhecidos, porém a ausência de valores intermediários ao longo do ensaio não permite a plotagem da curva força aplicada x deslocamento para esses ensaios.

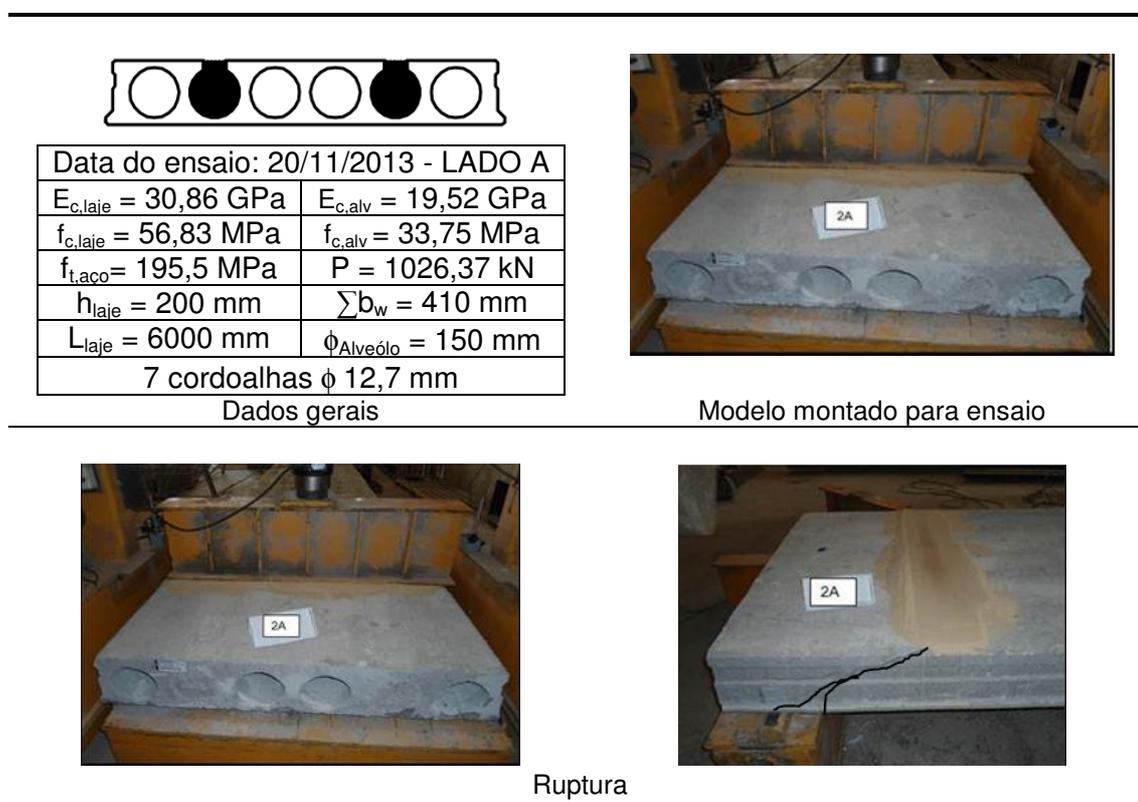
De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo no lado A se deu tipicamente por força cortante, enquanto a ruptura do modelo no lado B se deu por força cortante com posterior combinação de esforços cortantes e de flexão com escorregamento de cordoalha.

3.5.3.2 Ensaio da laje 02:

A Laje 2 foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4.5 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.4.6.

A Figura 63 e Figura 64 mostram os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para os lados A e B, respectivamente.

Figura 63: Ensaio da laje: L_{2,1}-P₃₅-A₂.



Fonte: O AUTOR

Figura 64: Ensaio da laje: L_{2,2}-P₃₅-A₂.

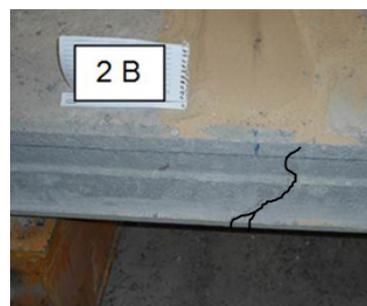
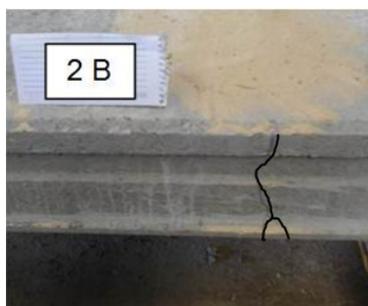


Data do ensaio: 20/11/2013 - LADO B	
$E_{c,laje} = 30,86 \text{ GPa}$	$E_{c,alv} = 19,52 \text{ GPa}$
$f_{c,laje} = 56,83 \text{ MPa}$	$f_{c,alv} = 33,75 \text{ MPa}$
$f_{t,aco} = 195,5 \text{ MPa}$	$P = 1026,37 \text{ kN}$
$h_{laje} = 200 \text{ mm}$	$\sum b_w = 410 \text{ mm}$
$L_{laje} = 5450 \text{ mm}$	$\phi_{Alveólo} = 150 \text{ mm}$
7 cordoalhas $\phi 12,7 \text{ mm}$	

Dados gerais



Modelo montado para ensaio



Ruptura

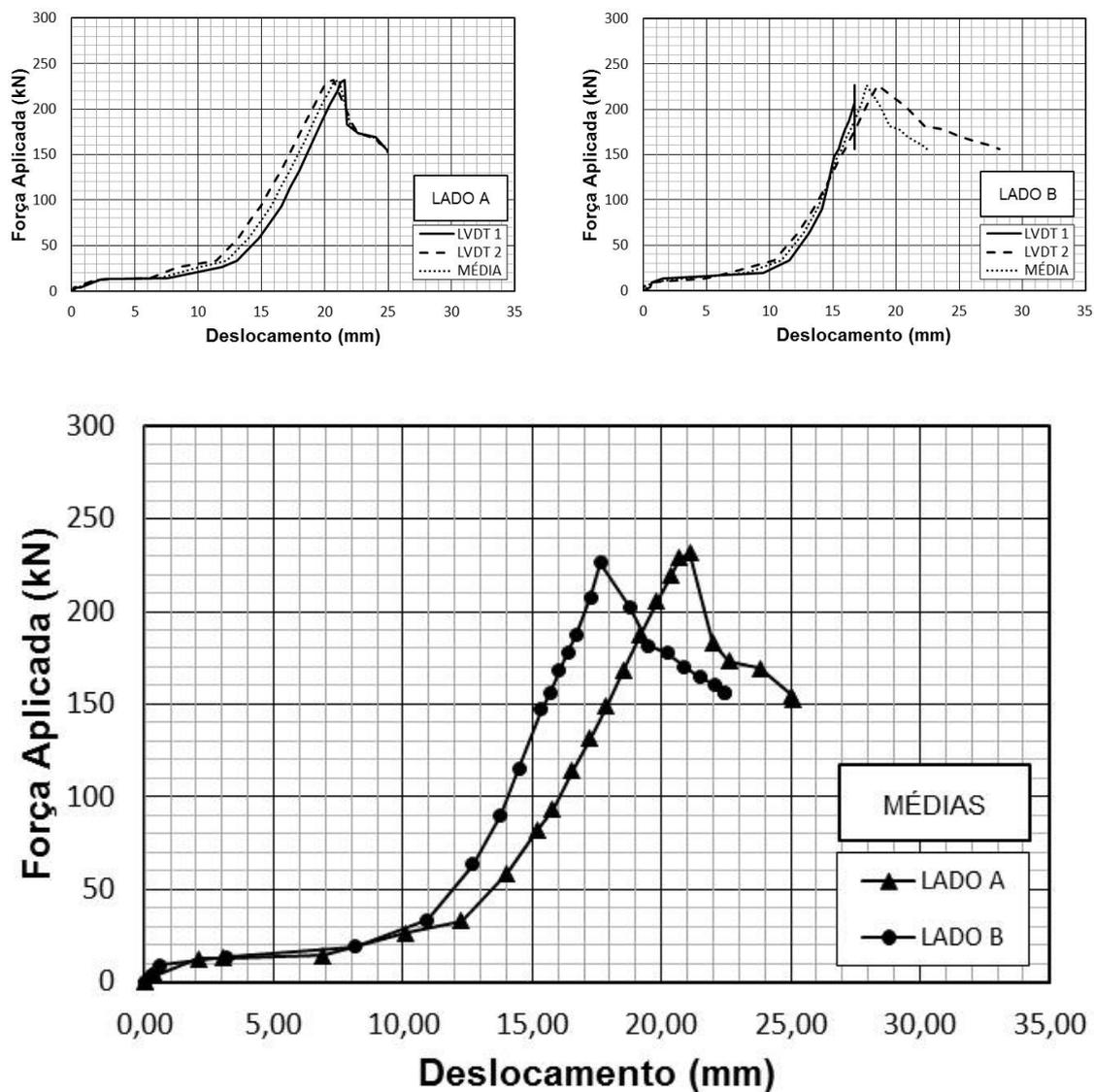
Fonte: O AUTOR

Durante os ensaios não houve incidentes com relação ao funcionamento dos equipamentos bem como na aferição das medições. Os valores de carregamento e deslocamento dos dois ensaios foram armazenados pelo módulo de aquisição de dados ao longo do ensaio, permitindo a plotagem da curva carregamento x deslocamento para esse exemplar, Figura 65.

De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo no lado A se deu por força cortante, enquanto o lado B houve ruptura por força cortante de um lado e do outro lado houve uma aparente ruptura por flexão com escorregamento da cordoalha, conforme se observa na Figura 65, que mostra o comportamento do ensaio do modelo para os lados A e B, respectivamente.

Observou-se ainda que as fissuras na parte inferior do modelo mostram padrões de torção no elemento no ensaio no lado B.

Figura 65: Resultado dos ensaios na Laje 2.



Fonte: O AUTOR

Conforme os resultados descritos para o modelo $L_2-P_{35}-A_2$, pode-se observar que houve uma boa correlação entre as medições dos LVDT's para ambos os ensaios.

3.5.3.3 Ensaio da laje 03:

A Laje 3 foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4.5 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.4.6.

A Figura 66 e Figura 67 mostram os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para os lados A e B, respectivamente.

Figura 66: Ensaio da laje: L_{3.1}-O₃₅-A₂.



Data do ensaio: 20/11/2013 - LADO A	
$E_{c,laje} = 30,86 \text{ GPa}$	$E_{c,alv} = 19,52 \text{ GPa}$
$f_{c,laje} = 56,83 \text{ MPa}$	$f_{c,alv} = 33,75 \text{ MPa}$
$f_{t,aco} = 195,5 \text{ MPa}$	$P = 1026,37 \text{ kN}$
$h_{laje} = 200 \text{ mm}$	$\sum b_w = 410 \text{ mm}$
$L_{laje} = 6000 \text{ mm}$	$\phi_{Alveólo} = 150 \text{ mm}$
7 cordoalhas $\phi 12,7 \text{ mm}$	

Dados gerais



Modelo montado para ensaio



Ruptura

Fonte: O AUTOR

Figura 67: Ensaio da laje: L_{3.2}-O₃₅-A₂.



Data do ensaio: 20/11/2013 - LADO B	
$E_{c,laje} = 30,86 \text{ GPa}$	$E_{c,alv} = 19,52 \text{ GPa}$
$f_{c,laje} = 56,83 \text{ MPa}$	$f_{c,alv} = 33,75 \text{ MPa}$
$f_{t,aco} = 195,5 \text{ MPa}$	$P = 1026,37 \text{ kN}$
$h_{laje} = 200 \text{ mm}$	$\sum b_w = 410 \text{ mm}$
$L_{laje} = 5450 \text{ mm}$	$\phi_{Alveólo} = 150 \text{ mm}$
7 cordoalhas $\phi 12,7 \text{ mm}$	

Dados gerais



Modelo montado para ensaio



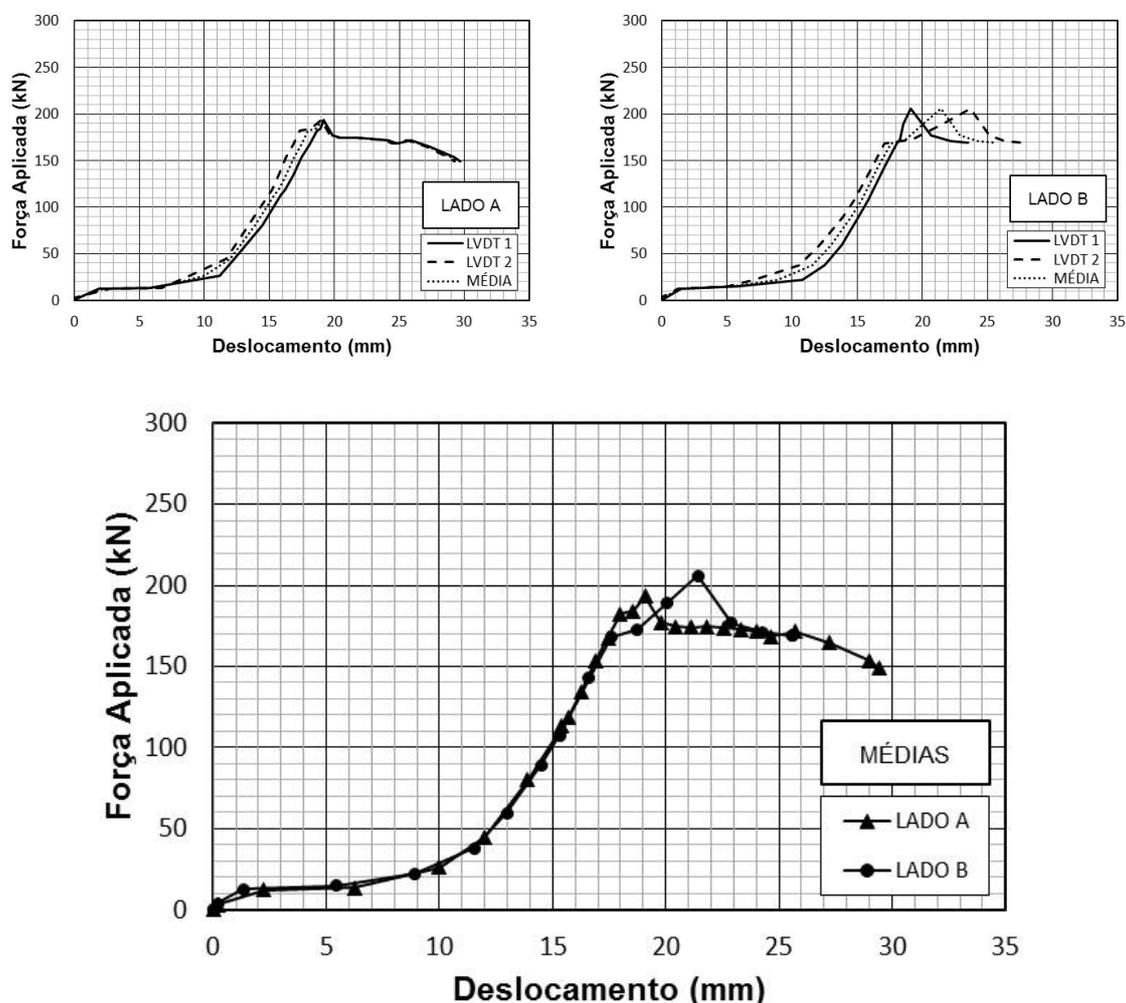
Ruptura

Fonte: O AUTOR

Durante os ensaios não houve incidentes com relação ao funcionamento dos equipamentos bem como na aferição das medições. Os valores de carregamento e deslocamento dos dois ensaios foram armazenados pelo módulo de aquisição de dados ao longo do ensaio, permitindo a plotagem da curva carregamento x deslocamento para esse exemplar, Figura 68.

De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo tanto no lado A quanto no lado B se deu flexão com escorregamento da cordoalha, conforme se observa na Figura 68 que mostra o comportamento do ensaio do modelo para os lados A e B, respectivamente.

Figura 68: Resultado dos ensaios na Laje 3.



Fonte: O AUTOR

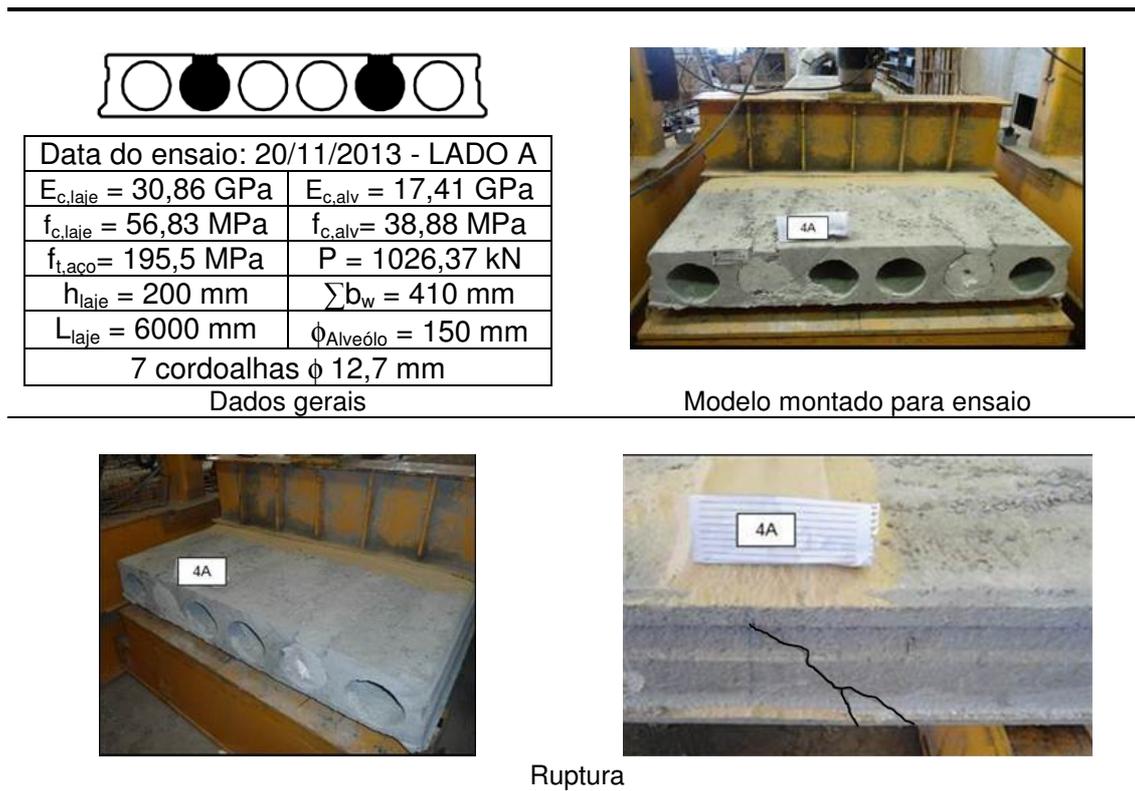
Conforme os resultados descritos para o modelo L₃-O₃₅-A₂, pode-se observar que houve uma boa correlação entre as medições dos LVDT's para ambos os ensaios.

3.5.3.4 Ensaio da laje 04:

A Laje 4 foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4.5 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.4.6.

A Figura 69 e Figura 70 mostram os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para os lados A e B, respectivamente.

Figura 69: Ensaio da laje: L_{4.1}-P₄₅-A₂.



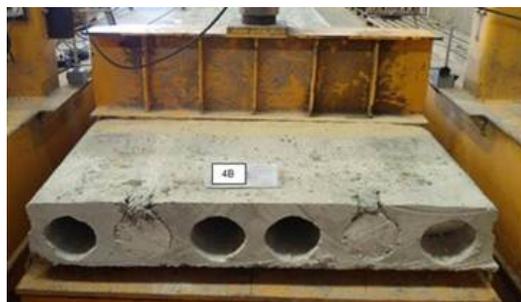
Fonte: O AUTOR

Figura 70: Ensaio da laje: L_{4.2}-P₄₅-A₂.

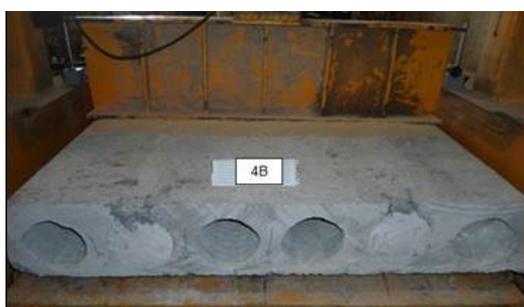


Data do ensaio: 20/11/2013 - LADO B	
$E_{c,laje} = 30,86 \text{ GPa}$	$E_{c,alv} = 17,41 \text{ GPa}$
$f_{c,laje} = 56,83 \text{ MPa}$	$f_{c,alv} = 38,88 \text{ MPa}$
$f_{t,aco} = 195,5 \text{ MPa}$	$P = 1026,37 \text{ kN}$
$h_{laje} = 200 \text{ mm}$	$\sum b_w = 410 \text{ mm}$
$L_{laje} = 5450 \text{ mm}$	$\phi_{Alveólo} = 150 \text{ mm}$
7 cordoalhas $\phi 12,7 \text{ mm}$	

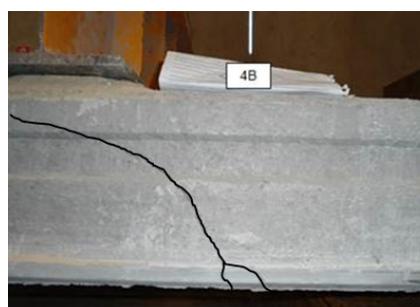
Dados gerais



Modelo montado para ensaio



Ruptura

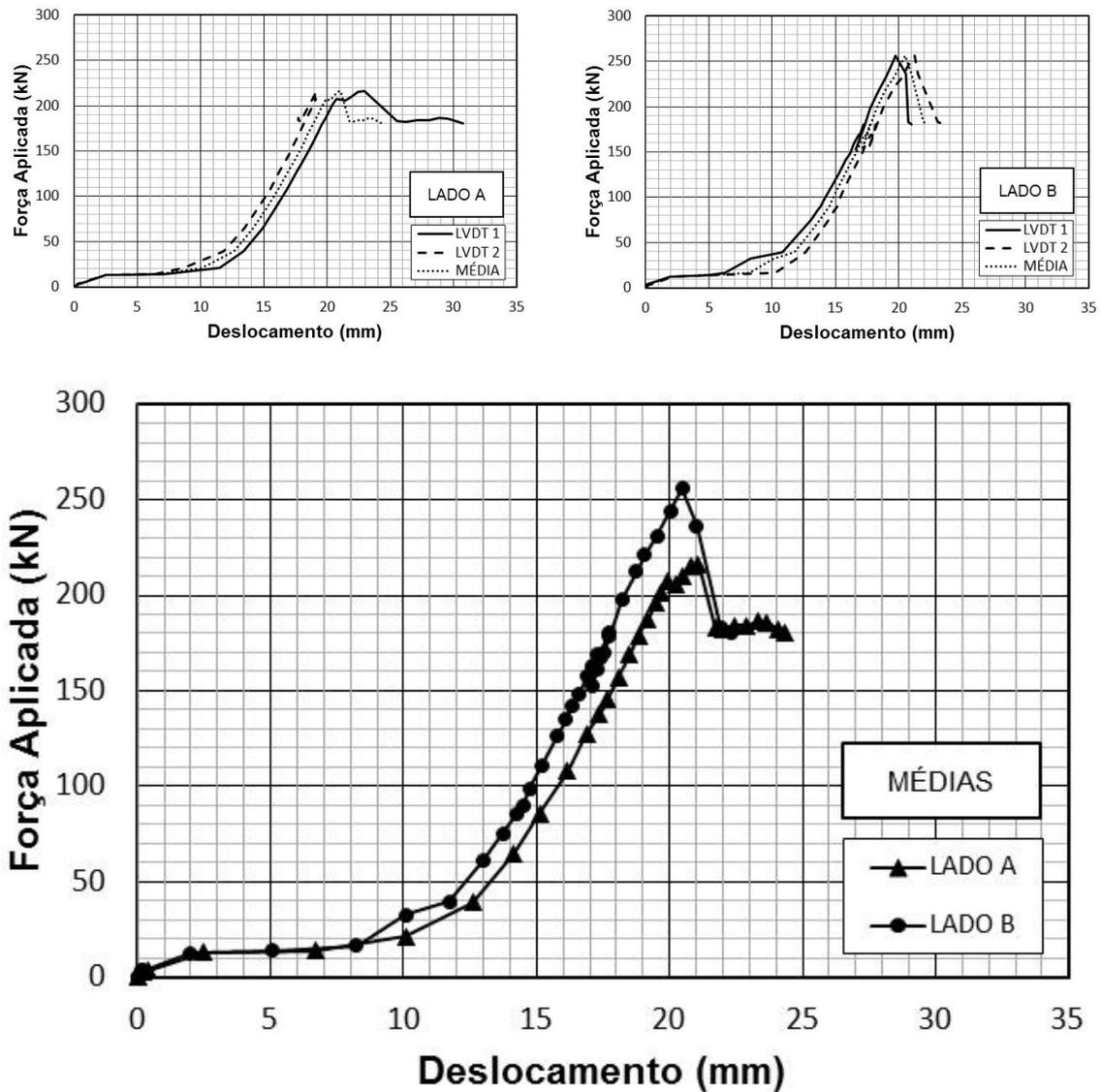


Fonte: O AUTOR

Durante os ensaios não houve incidentes com relação ao funcionamento dos equipamentos bem como na aferição das medições. Os valores de carregamento e deslocamento dos dois ensaios foram armazenados pelo módulo de aquisição de dados ao longo do ensaio, permitindo a plotagem da curva carregamento x deslocamento para esse exemplar, Figura 71.

De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo A deu-se por flexão combinada com escorregamento de cordoalha. Já o lado B teve sua ruptura por força cortante conforme a Figura 71, que mostra o comportamento do ensaio do modelo para os lados A e B, respectivamente.

Figura 71: Resultado dos ensaios na Laje 4.



Fonte: O AUTOR

Conforme os resultados descritos para o modelo $L_4-P_{45}-A_2$, pode-se observar que houve uma boa correlação entre as medições dos LVDT's para ambos os ensaios.

3.5.3.5 Ensaio da laje 05:

A Laje 5 foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4.5 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.4.6.

A Figura 72 e Figura 73 mostram os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para os lados A e B, respectivamente.

Figura 72: Ensaio da laje: L_{5.1}-O₄₅-A₂.



Data do ensaio: 20/11/2013 - LADO A	
$E_{c,laje} = 30,86 \text{ GPa}$	$E_{c,alv} = 17,41 \text{ GPa}$
$f_{c,laje} = 56,83 \text{ MPa}$	$f_{c,alv} = 38,88 \text{ MPa}$
$f_{t,aco} = 195,5 \text{ MPa}$	$P = 1026,37 \text{ kN}$
$h_{laje} = 200 \text{ mm}$	$\sum b_w = 410 \text{ mm}$
$L_{laje} = 6000 \text{ mm}$	$\phi_{Alveólo} = 150 \text{ mm}$
7 cordoalhas $\phi 12,7 \text{ mm}$	

Dados gerais



Modelo montado para ensaio



Ruptura

Fonte: O AUTOR

Figura 73: Ensaio da laje: L_{5.2}-O₄₅-A₂.



Data do ensaio: 20/11/2013 - LADO B	
$E_{c,laje} = 30,86 \text{ GPa}$	$E_{c,alv} = 17,41 \text{ GPa}$
$f_{c,laje} = 56,83 \text{ MPa}$	$f_{c,alv} = 38,88 \text{ MPa}$
$f_{t,aco} = 195,5 \text{ MPa}$	$P = 1026,37 \text{ kN}$
$h_{laje} = 200 \text{ mm}$	$\sum b_w = 410 \text{ mm}$
$L_{laje} = 5450 \text{ mm}$	$\phi_{Alveólo} = 150 \text{ mm}$
7 cordoalhas $\phi 12,7 \text{ mm}$	

Dados gerais



Modelo montado para ensaio



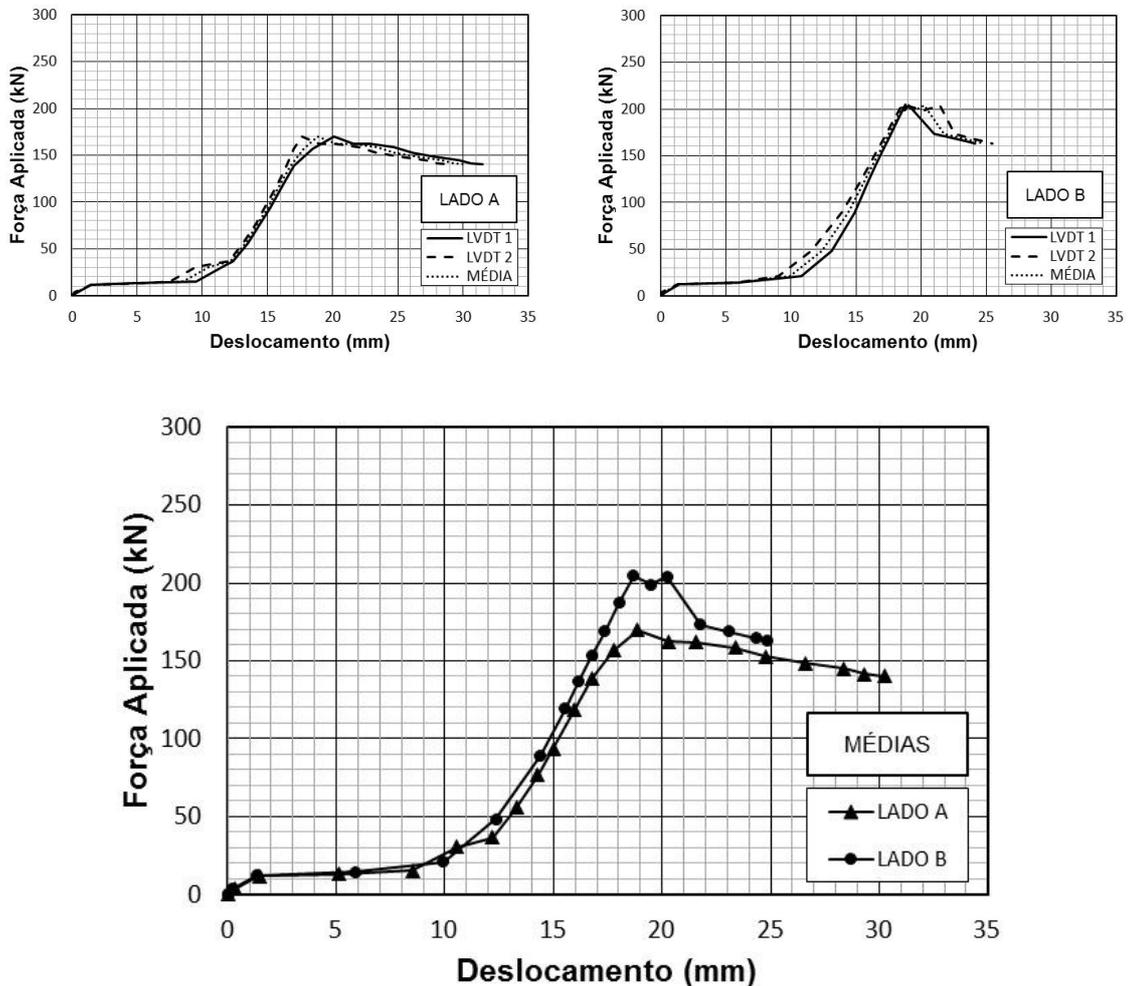
Ruptura

Fonte: O AUTOR

Durante os ensaios não houve incidentes com relação ao funcionamento dos equipamentos bem como na aferição das medições. Os de valores de carregamento e deslocamento dos dois ensaios foram armazenados pelo módulo de aquisição de dados ao longo do ensaio, permitindo a plotagem da curva carregamento x deslocamento para esse exemplar, Figura 74.

De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo no tanto lado A quanto no lado B se deu por flexão e escorregamento da cordoalha, conforme se observa na Figura 74, que mostra o comportamento do ensaio do modelo para os lados A e B, respectivamente.

Figura 74: Resultado dos ensaios na Laje 5.



Fonte: O AUTOR

Conforme os resultados descritos para o modelo L₅-O₄₅-A₂, pode-se observar que houve uma boa correlação entre as medições dos LVDT's para ambos os ensaios.

3.5.3.6 Ensaio da laje 06:

A Laje 6 foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4.5 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.4.6.

A Figura 75 e Figura 76 mostram os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para os lados A e B, respectivamente.

Figura 75: Ensaio da laje: L_{6.1}-P₃₅-A₄.

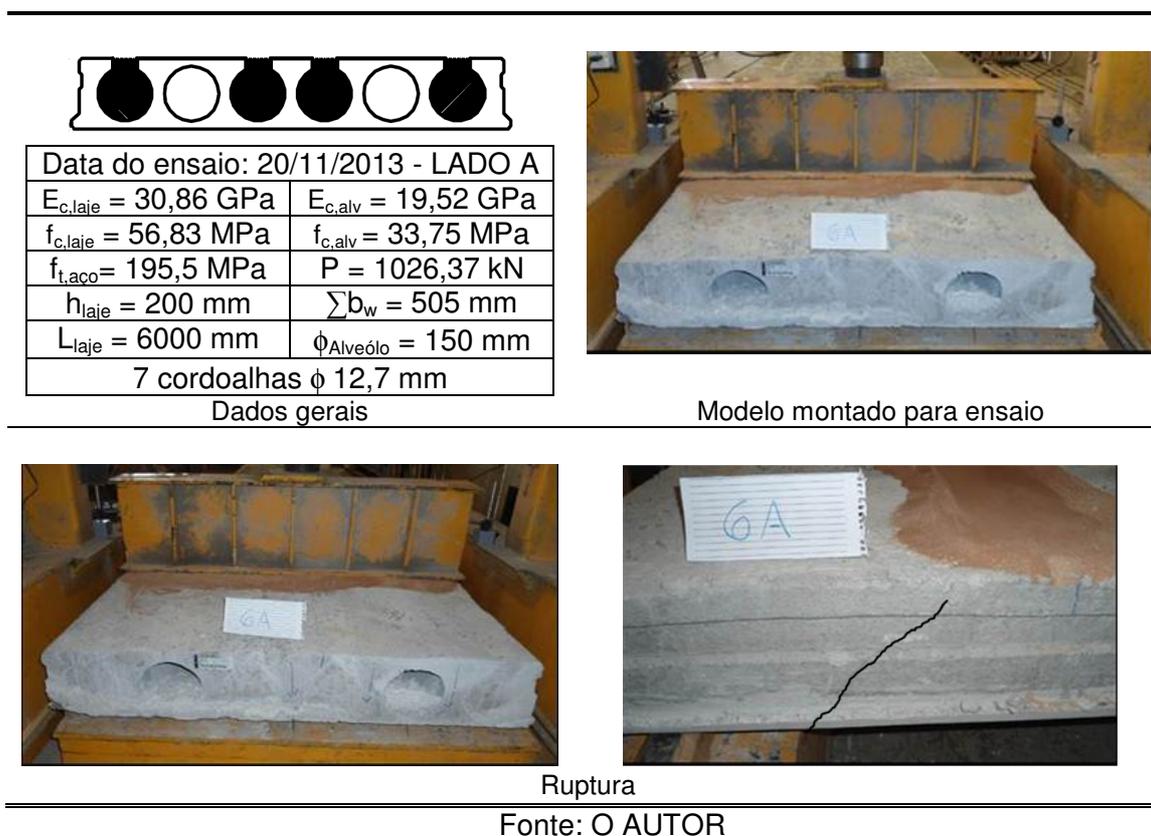


Figura 76: Ensaio da laje: L_{6.2}-P₃₅-A₄.



Data do ensaio: 20/11/2013 - LADO B	
$E_{c,laje} = 30,86 \text{ GPa}$	$E_{c,alv} = 19,52 \text{ GPa}$
$f_{c,laje} = 56,83 \text{ MPa}$	$f_{c,alv} = 33,75 \text{ MPa}$
$f_{t,aco} = 195,5 \text{ MPa}$	$P = 1026,37 \text{ kN}$
$h_{laje} = 200 \text{ mm}$	$\sum b_w = 505 \text{ mm}$
$L_{laje} = 5450 \text{ mm}$	$\phi_{Alveólo} = 150 \text{ mm}$
7 cordoalhas $\phi 12,7 \text{ mm}$	

Dados gerais



Modelo montado para ensaio



Ruptura

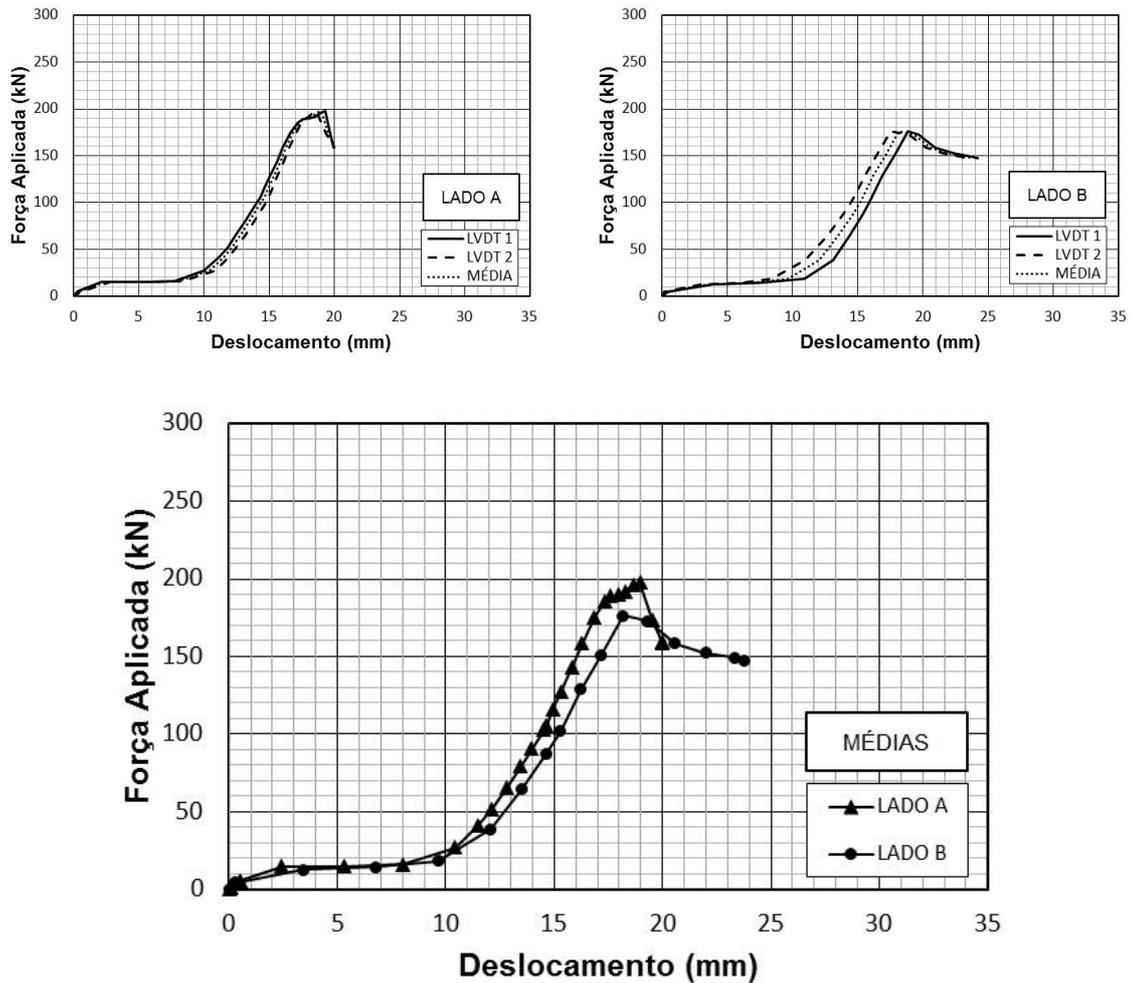


Fonte: O AUTOR

Durante os ensaios não houve incidentes com relação ao funcionamento dos equipamentos bem como na aferição das medições. Os de valores de carregamento e deslocamento dos dois ensaios foram armazenados pelo módulo de aquisição de dados ao longo do ensaio, permitindo a plotagem da curva carregamento x deslocamento para esse exemplar, Figura 77.

De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo A se deu por esforço combinado de flexão com cortante, porém, houve indícios de ruptura por esforço de torção, enquanto a ruptura do modelo B se deu por esforço de flexão com escorregamento da cordoalha, conforme se observa na Figura 77, que mostram o comportamento do ensaio do modelo para os lados A e B, respectivamente.

Figura 77: Resultado dos ensaios na Laje 6.



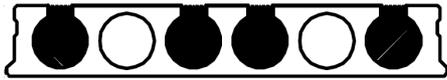
Fonte: O AUTOR

Conforme os resultados descritos para o modelo $L_6-P_{35}-A_4$, pode-se observar que houve uma boa correlação entre as medições dos LVDT's para ambos os ensaios.

3.5.3.7 Ensaio da laje 07:

A Laje 7 foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4.5 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.4.6. Figura 78 e Figura 79 mostra os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para os lados A e B, respectivamente.

Figura 78: Ensaio da laje: L_{7.1}-O₃₅-A₄.



Data do ensaio: 20/11/2013 - LADO A	
$E_{c,laje} = 30,86 \text{ GPa}$	$E_{c,alv} = 19,52 \text{ GPa}$
$f_{c,laje} = 56,83 \text{ MPa}$	$f_{c,alv} = 33,75 \text{ MPa}$
$f_{t,aco} = 195,5 \text{ MPa}$	$P = 1026,37 \text{ kN}$
$h_{laje} = 200 \text{ mm}$	$\sum b_w = 505 \text{ mm}$
$L_{laje} = 6000 \text{ mm}$	$\phi_{Alveólo} = 150 \text{ mm}$
7 cordoalhas $\phi 12,7 \text{ mm}$	

Dados gerais



Modelo montado para ensaio



Ruptura

Fonte: O AUTOR

Figura 79: Ensaio da laje: L_{7.2}-O₃₅-A₄.



Data do ensaio: 20/11/2013 - LADO B	
$E_{c,laje} = 30,86 \text{ GPa}$	$E_{c,alv} = 19,52 \text{ GPa}$
$f_{c,laje} = 56,83 \text{ MPa}$	$f_{c,alv} = 33,75 \text{ MPa}$
$f_{t,aco} = 195,5 \text{ MPa}$	$P = 1026,37 \text{ kN}$
$h_{laje} = 200 \text{ mm}$	$\sum b_w = 505 \text{ mm}$
$L_{laje} = 5450 \text{ mm}$	$\phi_{Alveólo} = 150 \text{ mm}$
7 cordoalhas $\phi 12,7 \text{ mm}$	

Dados gerais



Modelo montado para ensaio



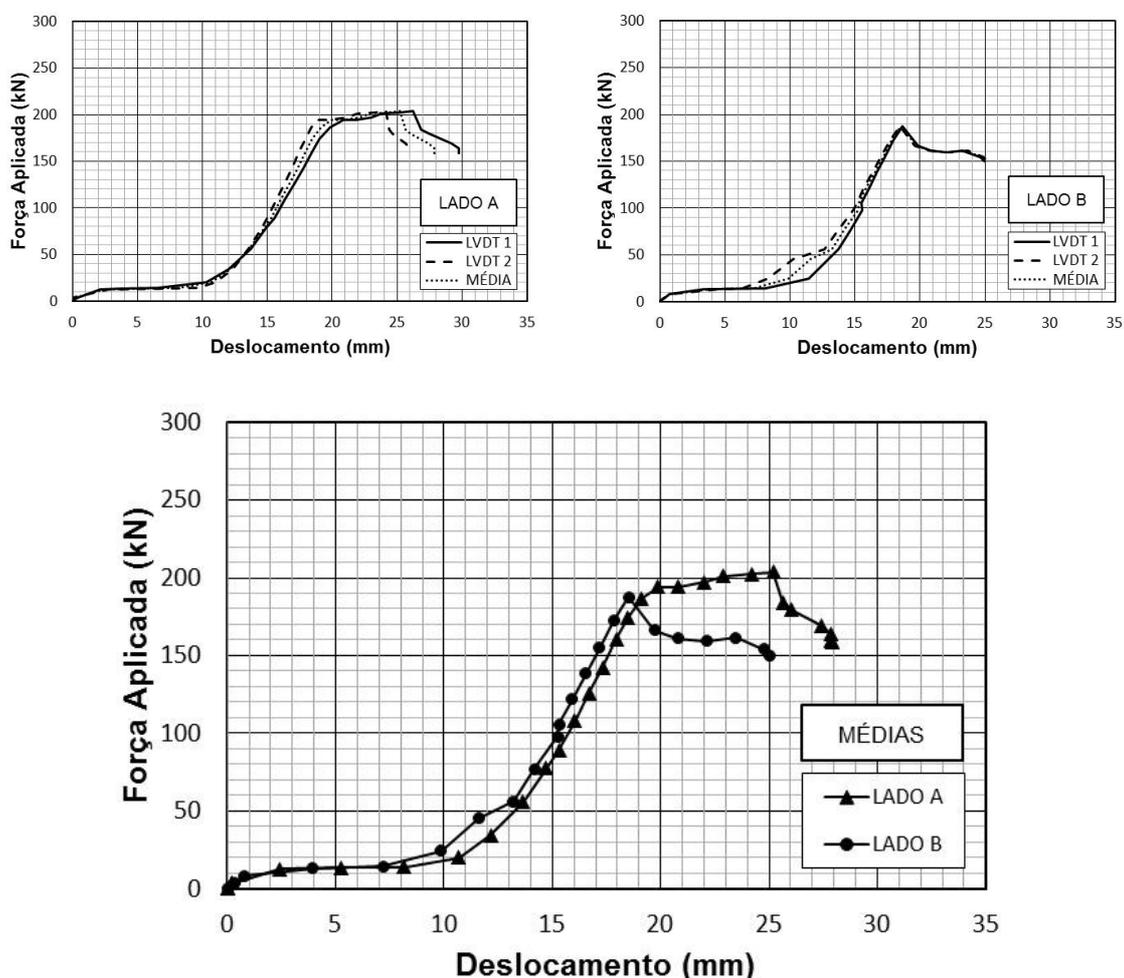
Ruptura

Fonte: O AUTOR

Durante os ensaios não houve incidentes com relação ao funcionamento dos equipamentos bem como na aferição das medições. Os valores de carregamento e deslocamento dos dois ensaios foram armazenados pelo módulo de aquisição de dados ao longo do ensaio, permitindo a plotagem da curva carregamento x deslocamento para esse exemplar, Figura 80.

De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo A se deu tipicamente por força cortante com combinação de esforços de flexão, enquanto a ruptura do modelo B se deu por escorregamento de cordoalha, conforme se observa na Figura 80, que mostram o comportamento do ensaio do modelo para os lados A e B, respectivamente.

Figura 80 : Resultado dos ensaios na Laje 7.



Fonte: O AUTOR

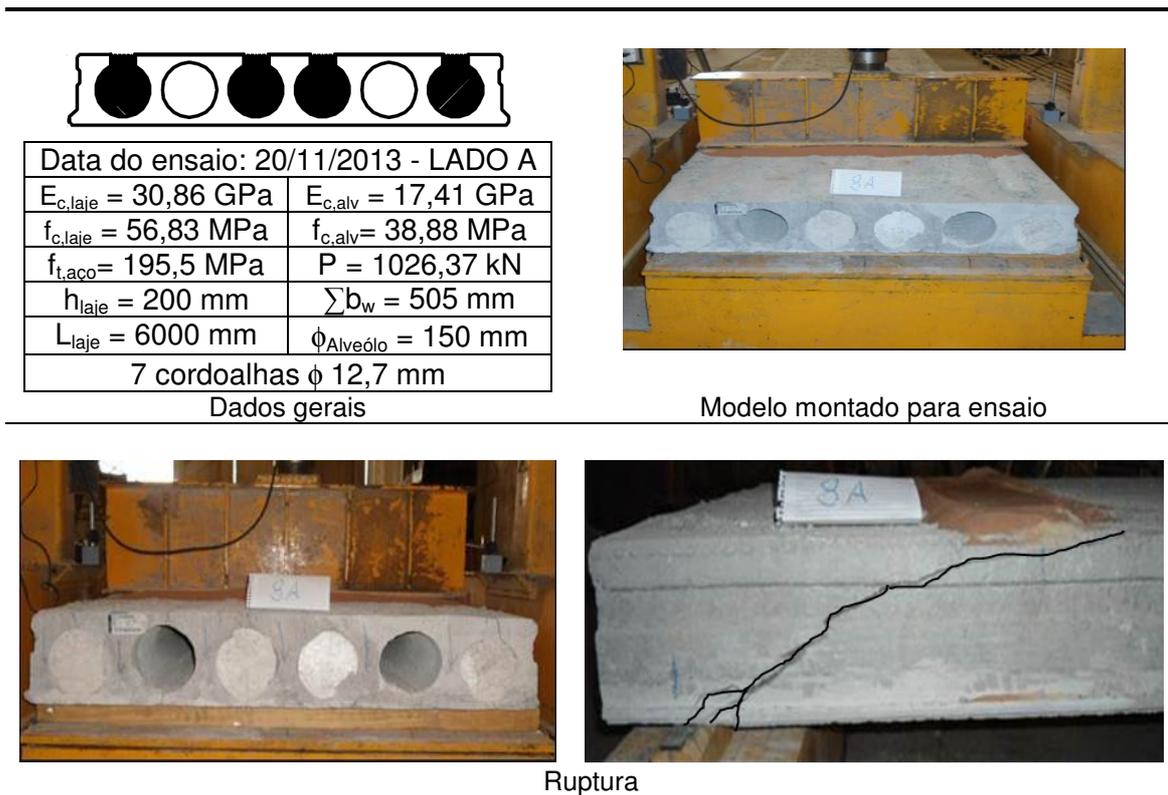
Conforme os resultados descritos para o modelo L₇-O₃₅-A₄, pode-se observar que houve uma boa correlação entre as medições dos LVDT's para ambos os ensaios.

3.5.3.8 Ensaio da laje 08:

A Laje 8 foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4.5 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.4.5.

A Figura 81 e Figura 82 mostram os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para os lados A e B, respectivamente.

Figura 81: Ensaio da laje: L_{8.1}-P₄₅-A₄.



Fonte: O AUTOR

Figura 82: Ensaio da laje: L_{8.2}-P₄₅-A₄.



Data do ensaio: 20/11/2013 - LADO B	
$E_{c,laje} = 30,86 \text{ GPa}$	$E_{c,alv} = 17,41 \text{ GPa}$
$f_{c,laje} = 56,83 \text{ MPa}$	$f_{c,alv} = 38,88 \text{ MPa}$
$f_{t,aco} = 195,5 \text{ MPa}$	$P = 1026,37 \text{ kN}$
$h_{laje} = 200 \text{ mm}$	$\sum b_w = 505 \text{ mm}$
$L_{laje} = 5450 \text{ mm}$	$\phi_{Alveólo} = 150 \text{ mm}$
7 cordoalhas $\phi 12,7 \text{ mm}$	

Dados gerais



Modelo montado para ensaio



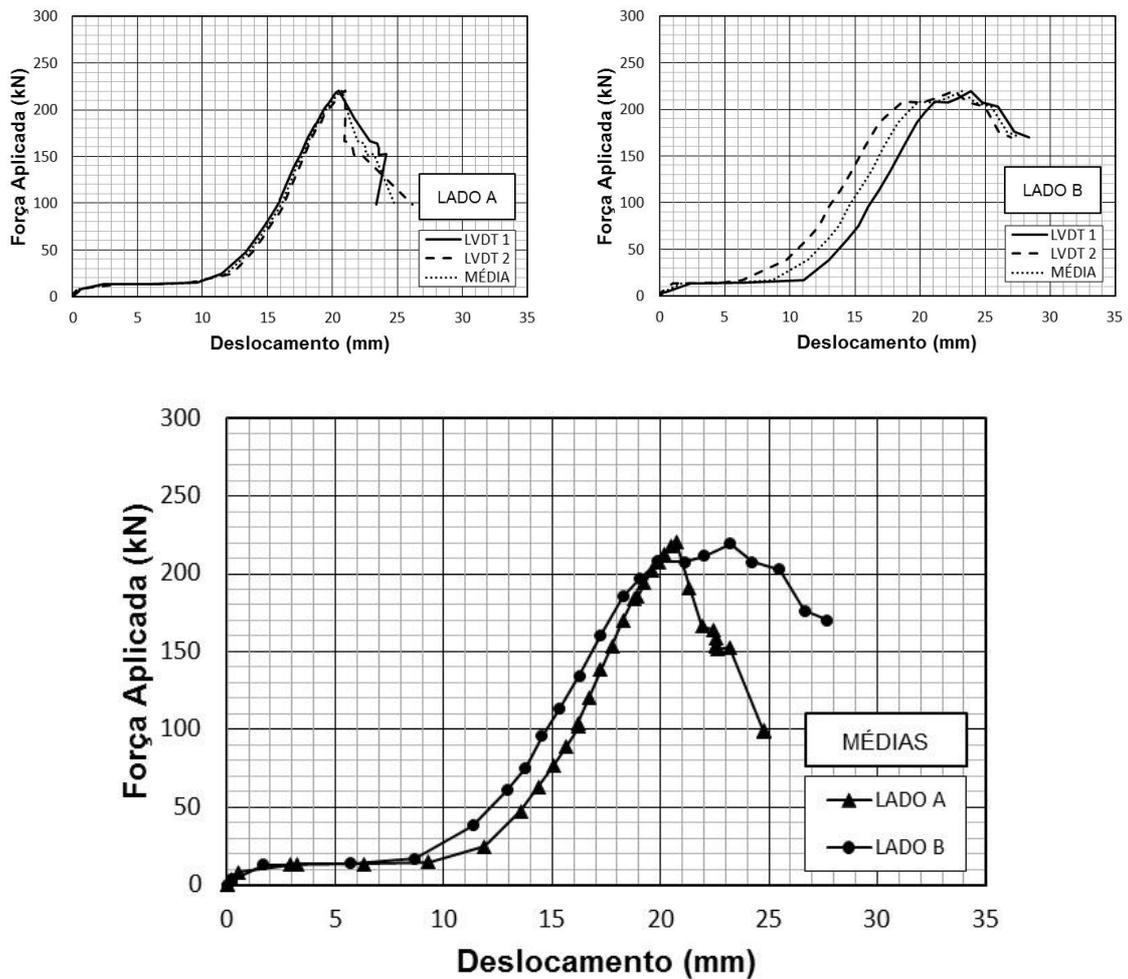
Ruptura

Fonte: O AUTOR

Durante os ensaios não houve incidentes com relação ao funcionamento dos equipamentos bem como na aferição das medições. Os valores de carregamento e deslocamento dos dois ensaios foram armazenados pelo módulo de aquisição de dados ao longo do ensaio, permitindo a plotagem da curva carregamento x deslocamento para esse exemplar, Figura 83.

De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo A se deu por força cortante, enquanto a ruptura do modelo B se deu por esforço de flexão com escorregamento da cordoalha, conforme se observa na Figura 83, que mostram o comportamento do ensaio do modelo para os lados A e B, respectivamente.

Figura 83: Resultado dos ensaios na Laje 8.



Fonte: O AUTOR

Conforme os resultados descritos para o modelo $L_8-P_{45}-A_4$, pode-se observar que houve uma boa correlação entre as medições dos LVDT's para ambos os ensaios.

3.5.3.9 Ensaio da laje 09:

A Laje 9 foi moldada conforme os procedimentos descritos no item 3.4.5 e os ensaios foram realizados conforme a metodologia descrita no item 3.4.6.

A Figura 84 e Figura 85 mostram os dados gerais do ensaio e a sua ruptura para os lados A e B, respectivamente.

Figura 84: Ensaio da laje: L_{9.1}-O₄₅-A₄.



Data do ensaio: 20/11/2013 - LADO A	
$E_{c,laje} = 30,86 \text{ GPa}$	$E_{c,alv} = 17,41 \text{ GPa}$
$f_{c,laje} = 56,83 \text{ MPa}$	$f_{c,alv} = 38,88 \text{ MPa}$
$f_{t,aco} = 195,5 \text{ MPa}$	$P = 1026,37 \text{ kN}$
$h_{laje} = 200 \text{ mm}$	$\sum b_w = 505 \text{ mm}$
$L_{laje} = 6000 \text{ mm}$	$\phi_{Alveólo} = 150 \text{ mm}$
7 cordoalhas $\phi 12,7 \text{ mm}$	

Dados gerais



Modelo montado para ensaio



Ruptura

Fonte: O AUTOR

Figura 85: Ensaio da laje: L_{9.2}-O₄₅-A₄



Data do ensaio: 20/11/2013 - LADO B	
$E_{c,laje} = 30,86 \text{ GPa}$	$E_{c,alv} = 17,41 \text{ GPa}$
$f_{c,laje} = 56,83 \text{ MPa}$	$f_{c,alv} = 38,88 \text{ MPa}$
$f_{t,aco} = 195,5 \text{ MPa}$	$P = 1026,37 \text{ kN}$
$h_{laje} = 200 \text{ mm}$	$\sum b_w = 505 \text{ mm}$
$L_{laje} = 5450 \text{ mm}$	$\phi_{Alveólo} = 150 \text{ mm}$
7 cordoalhas $\phi 12,7 \text{ mm}$	

Dados gerais



Modelo montado para ensaio



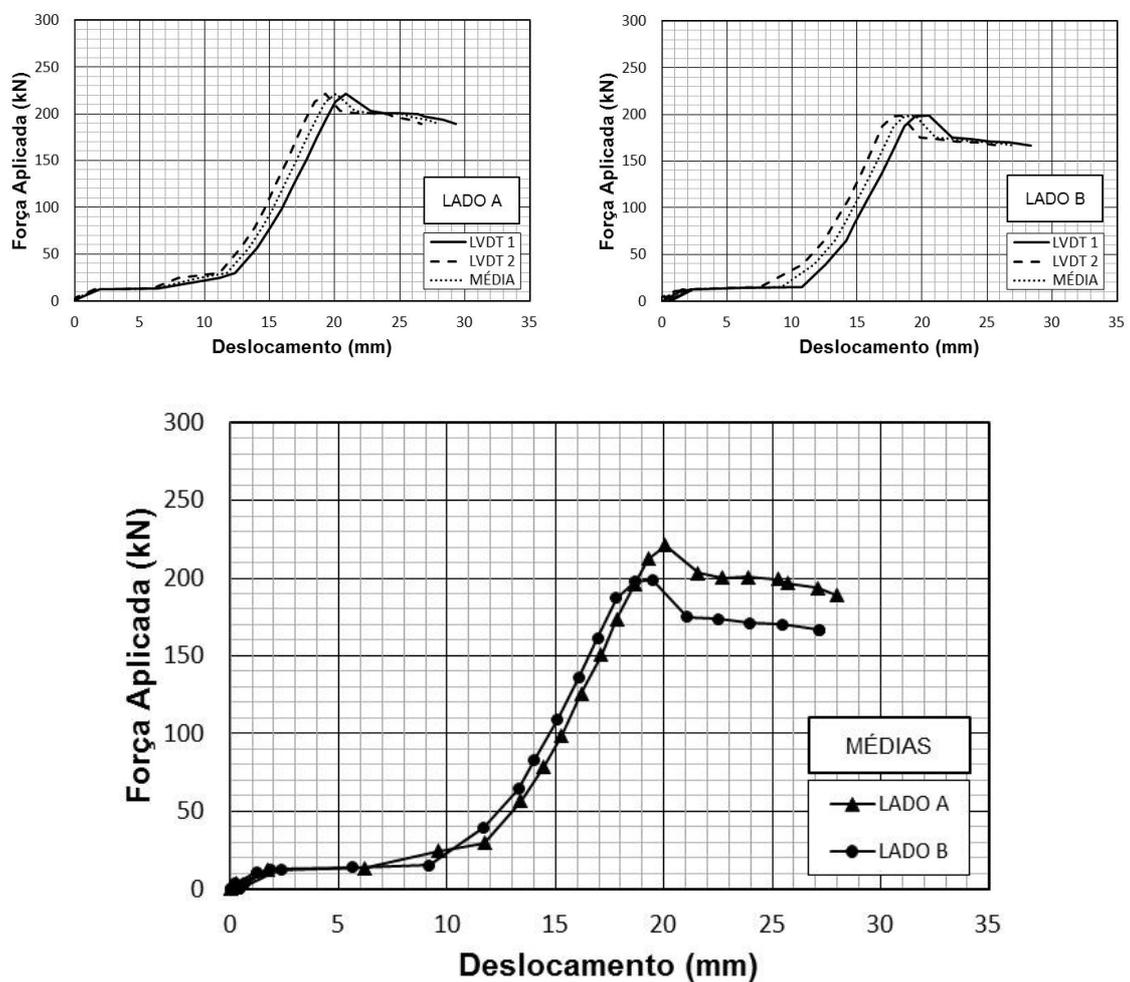
Ruptura

Fonte: O AUTOR

Durante os ensaios não houve incidentes com relação ao funcionamento dos equipamentos bem como na aferição das medições. Os valores de carregamento e deslocamento dos dois ensaios foram armazenados pelo módulo de aquisição de dados ao longo do ensaio, permitindo a plotagem da curva carregamento x deslocamento para esse exemplar, Figura 86.

De acordo com o ensaio, a ruptura do lado A e do lado B se deram por flexão com escorregamento de cordoalha, conforme se observa na Figura 86, que mostra o comportamento do ensaio do modelo para os lados A e B, respectivamente.

Figura 86: Resultado dos ensaios na Laje 9.



Fonte: O AUTOR

Conforme os resultados descritos para o modelo L₉-O₄₅-A₄, pode-se observar que houve uma boa correlação entre as medições dos LVDT's para ambos os ensaios.

Esse item traz a análise dos resultados dos ensaios realizados, bem como a sua comparação teórica.

4.1 ANALISE DOS RESULTADOS – Ajuste dos ensaios

Neste item as curvas dos ensaios realizados são ajustadas com o objetivo de se estudar o comportamento dos exemplares durante o ensaio excluindo-se sua fase inicial de acomodações.

4.1.1 Ensaio da laje 01:

Conforme mencionado no item 3.5.3.1, durante a execução dos ensaios da laje 1 houve um problema técnico comunicação entre a célula de carga e o módulo de aquisição de dados, não sendo possível salvar os seus valores de carregamento e deslocamento.

Para esse exemplar a análise dos resultados será realizada somente por meio dos valores teóricos, experimentais de carregamento máximo e imagens que mostram seus padrões de fissuras de ruptura.

De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo no lado A se deu tipicamente por força cortante, enquanto a ruptura do modelo no lado B se deu por força cortante com posterior combinação de esforços cortantes e de flexão com escorregamento de cordoalha.

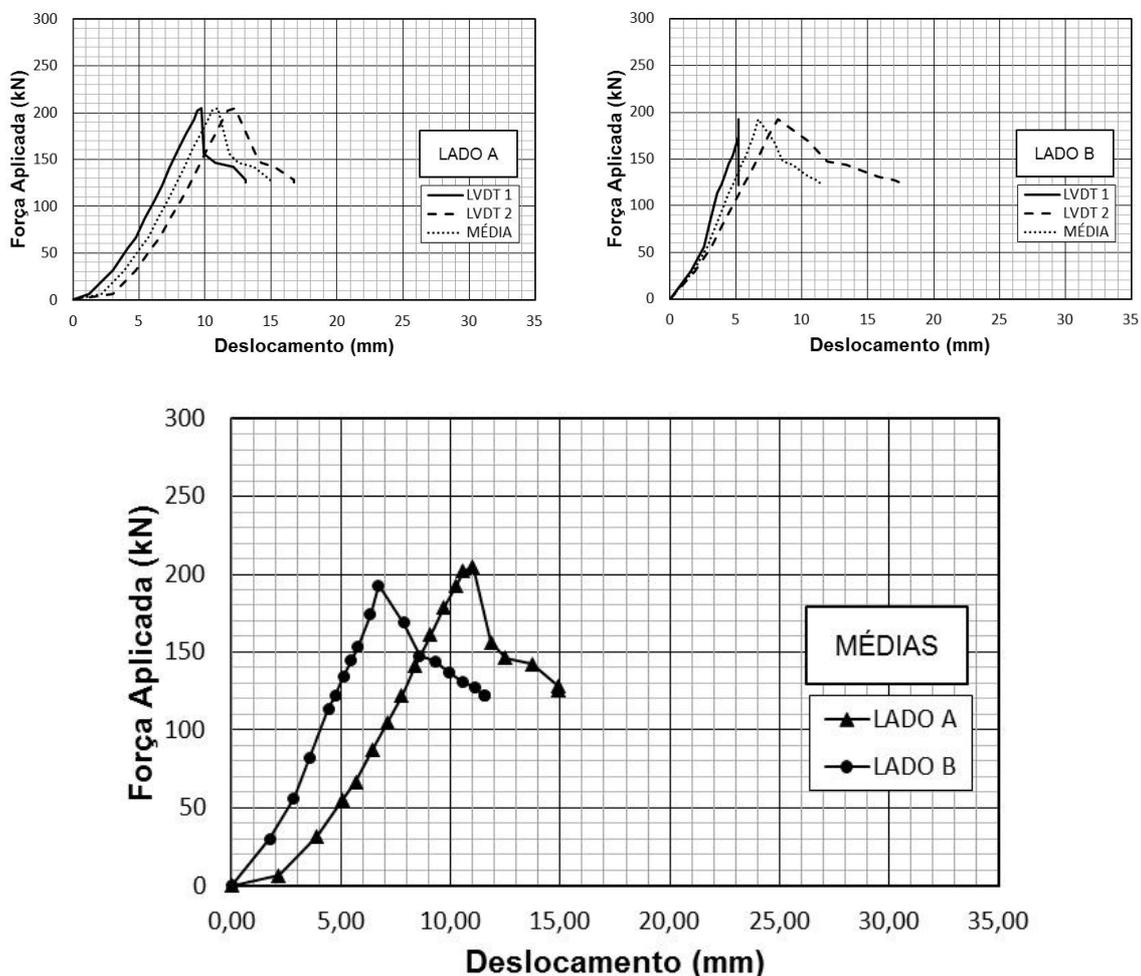
4.1.2 Ensaio da laje 02:

Na laje 2, após realizados os ajustes, é possível observar que para o ensaio A os dois transdutores tiveram um comportamento similar. Para o ensaio B a curva foi similar até se atingir o maior carregamento.

Para ambos os ensaios o valor da carga de ruptura atingiu valores próximos, validando o modelo ensaiado.

Curvas com valores médios para cada ensaio (Lado A e Lado B) foram plotadas para se efetuar a comparação entre ensaios, Figura 87.

Figura 87: Ajuste nos ensaios na Laje 2



Fonte: O AUTOR

De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo A se deu por força cortante, enquanto no modelo B houve ruptura por força cortante de um lado e aparentemente ruptura por flexão com escorregamento da cordoalha do outro.

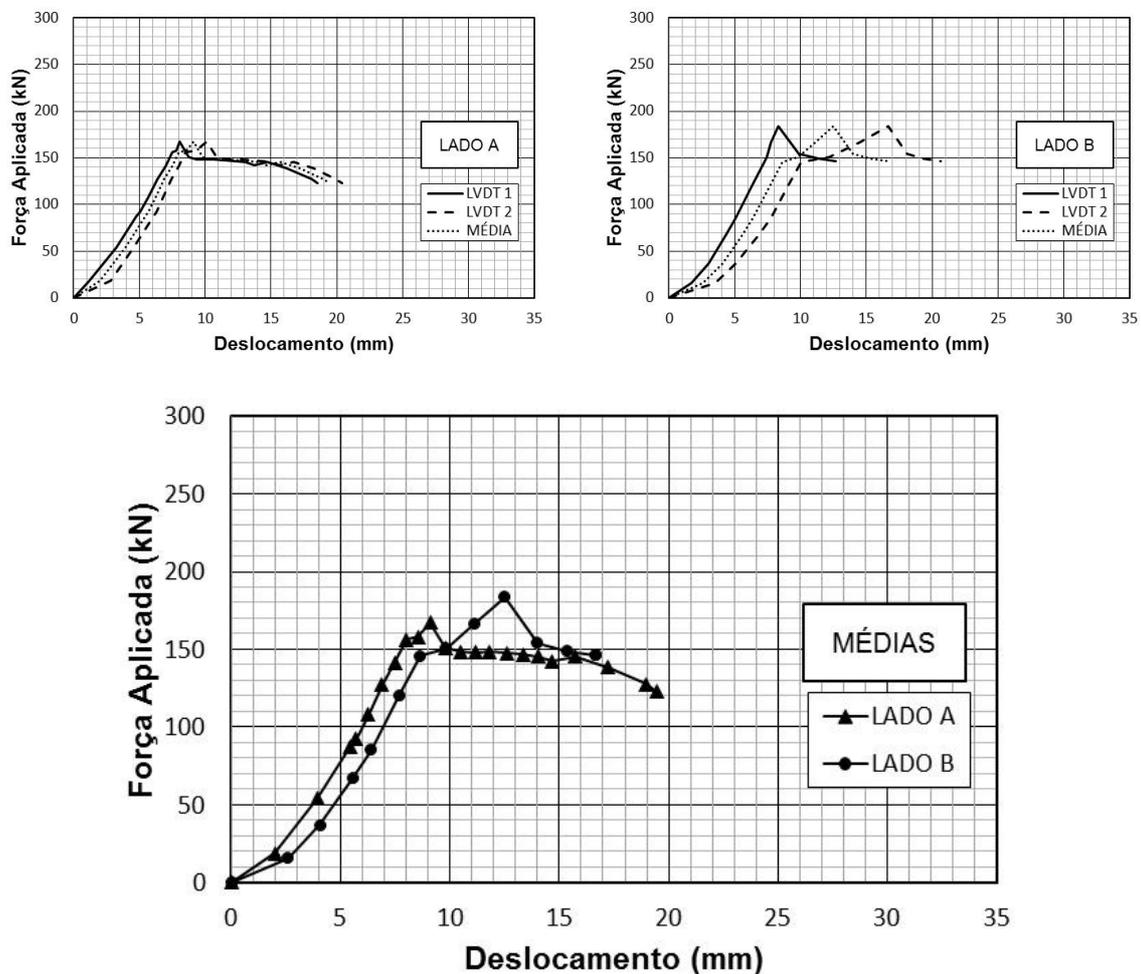
4.1.3 Ensaio da laje 03:

Na laje 3, após realizados os ajustes, é possível observar que para o ensaio A os dois transdutores tiveram um comportamento similar. Para o ensaio B a curva foi similar até cerca de 90% do maior carregamento, porém, atingindo valores finais de mesma grandeza.

Para ambos os ensaios o valor da carga de ruptura atingiu valores próximos, validando o modelo ensaiado.

Curvas com valores médios para cada ensaio (Lado A e Lado B) foram plotadas para se efetuar a comparação entre ensaios, Figura 88.

Figura 88: Resultado dos ensaios na Laje 3.



Fonte: O AUTOR

De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo tanto no lado A quanto no lado B se deu flexão com escorregamento da cordoalha.

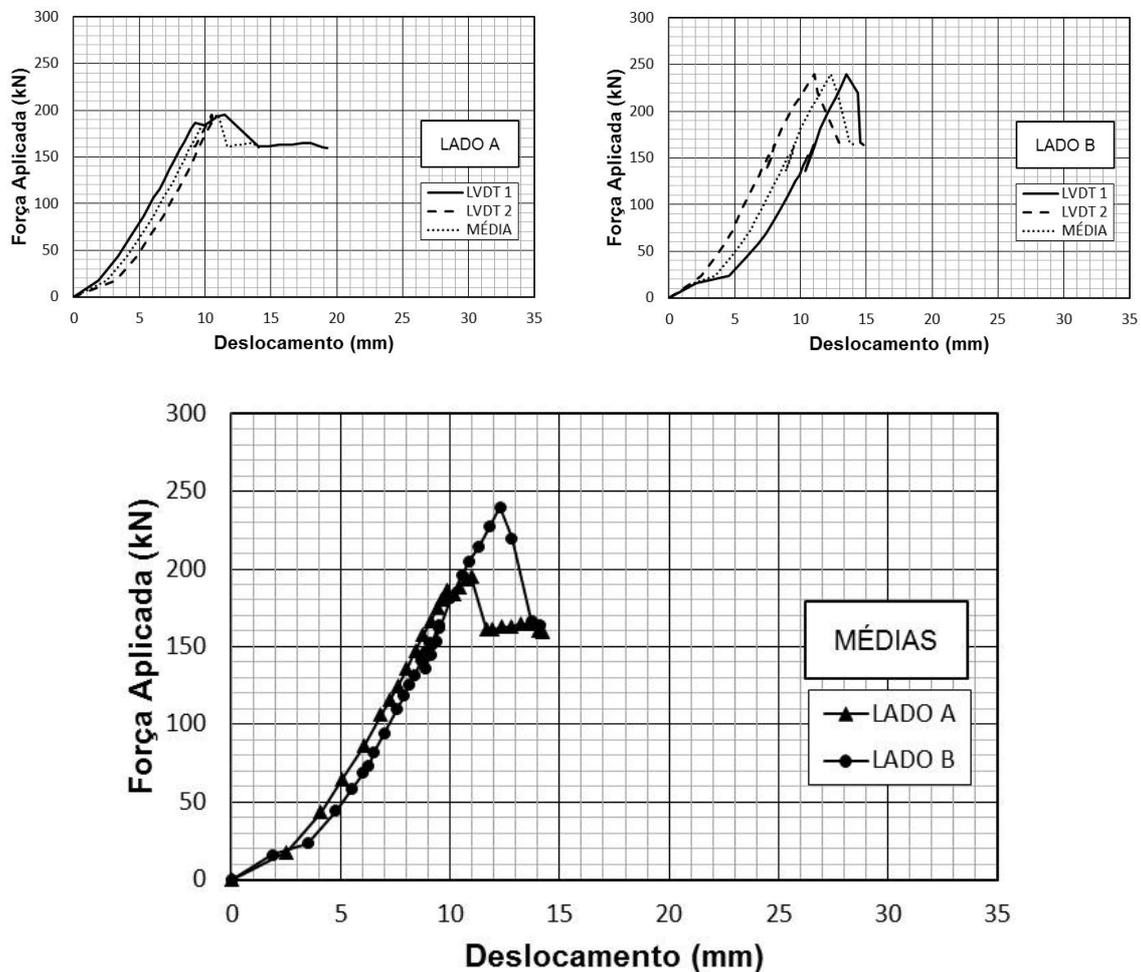
4.1.4 Ensaio da laje 04:

Na laje 4, após realizados os ajustes, é possível observar que para os ensaios A e B os transdutores tiveram um comportamento similar. Para o ensaio B a curva atingiu um maior valor de carregamento, porém, não divergindo do primeiro ensaio em ordem de grandeza.

Para ambos os ensaios o valor da carga de ruptura atingiu valores relativamente próximos, validando o modelo ensaiado.

Curvas com valores médios para cada ensaio (Lado A e Lado B) foram plotadas para se efetuar a comparação entre ensaios, Figura 89.

Figura 89: Resultado dos ensaios na Laje 4.



Fonte: O AUTOR

De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo A se deu por flexão combinada com escorregamento de cordoalha. Já o lado B teve sua ruptura por força cortante.

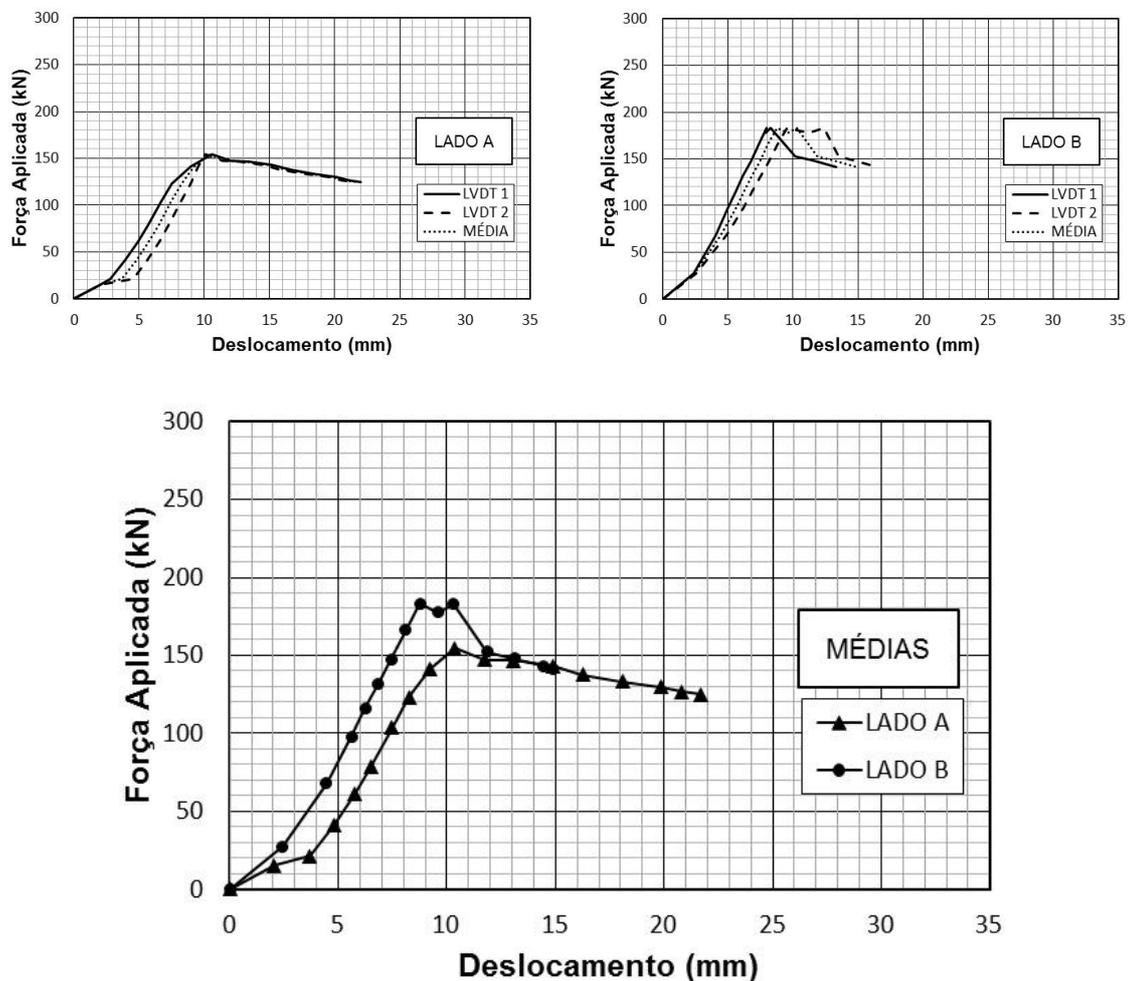
4.1.5 Ensaio da laje 05:

Na laje 5, após realizados os ajustes, é possível observar que para os ensaios A e B os transdutores tiveram um comportamento similar. Para o ensaio B a curva atingiu um maior valor de carregamento, porém, não divergindo do primeiro ensaio em ordem de grandeza.

Para ambos os ensaios o valor da carga de ruptura atingiu valores relativamente próximos, validando o modelo ensaiado.

Curvas com valores médios para cada ensaio (Lado A e Lado B) foram plotadas para se efetuar a comparação entre ensaios, Figura 90.

Figura 90: Resultado dos ensaios na Laje 5



Fonte: O AUTOR

De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo no tanto lado A quanto no lado B se deu por flexão e escorregamento da cordoalha.

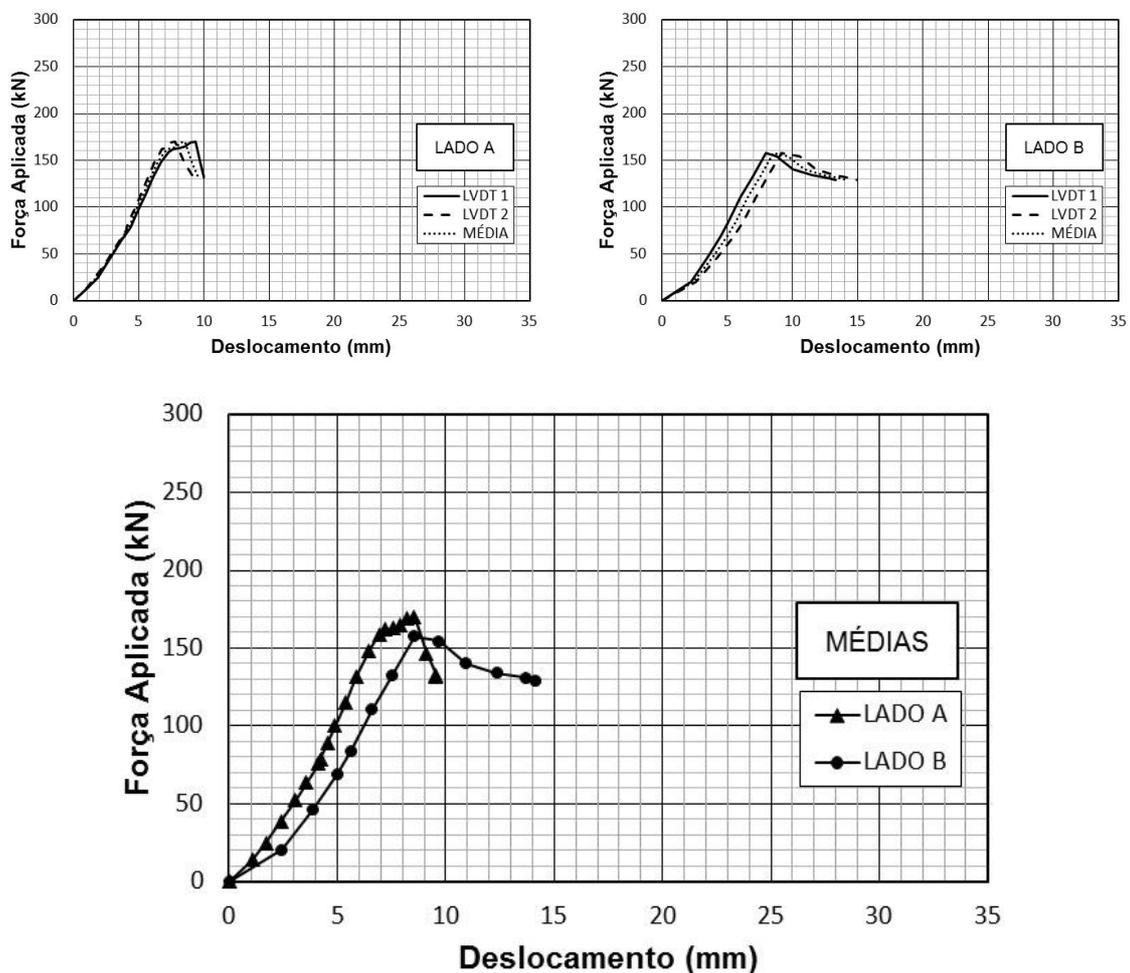
4.1.6 Ensaio da laje 06:

Na laje 6, após realizados os ajustes, é possível observar que para os ensaios A e B os transdutores tiveram um comportamento similar. Para o ensaio A atingiu-se um maior valor de carregamento, porém, não divergindo do segundo ensaio em ordem de grandeza.

Para ambos os ensaios o valor da carga de ruptura atingiu valores relativamente próximos, validando o modelo ensaiado.

Curvas com valores médios para cada ensaio (Lado A e Lado B) foram plotadas para se efetuar a comparação entre ensaios, Figura 91.

Figura 91: Resultado dos ensaios na Laje 6.



Fonte: O AUTOR

De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo A se deu por esforço combinado de flexão com cortante, porém, houve indícios de ruptura por esforço de torção,

enquanto a ruptura do modelo B se deu por esforço de flexão com escorregamento da cordoalha.

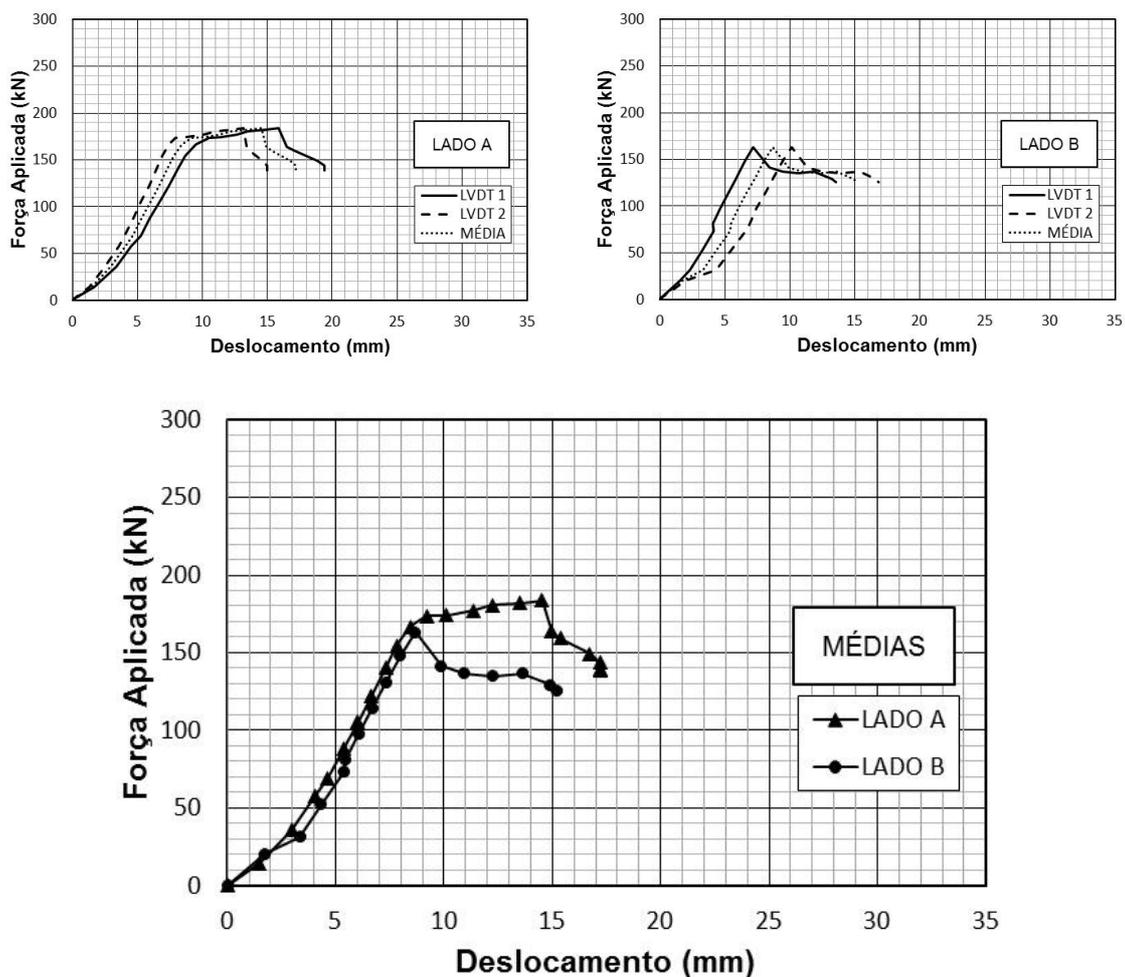
4.1.7 Ensaio da laje 07:

Na laje 7, após realizados os ajustes, é possível observar que para os ensaios A e B os transdutores tiveram um comportamento similar. Para o ensaio A atingiu-se um maior valor de carregamento, porem, não divergindo do segundo ensaio em ordem de grandeza.

Para ambos os ensaios o valor da carga de ruptura atingiu valores relativamente próximos, validando o modelo ensaiado.

Curvas com valores médios para cada ensaio (Lado A e Lado B) foram plotadas para se efetuar a comparação entre ensaios, Figura 92.

Figura 92: Resultado dos ensaios na Laje 7.



Fonte: O AUTOR

De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo A se deu tipicamente por força cortante com combinação de esforços de flexão, enquanto a ruptura do modelo B se deu por escorregamento de cordoalha.

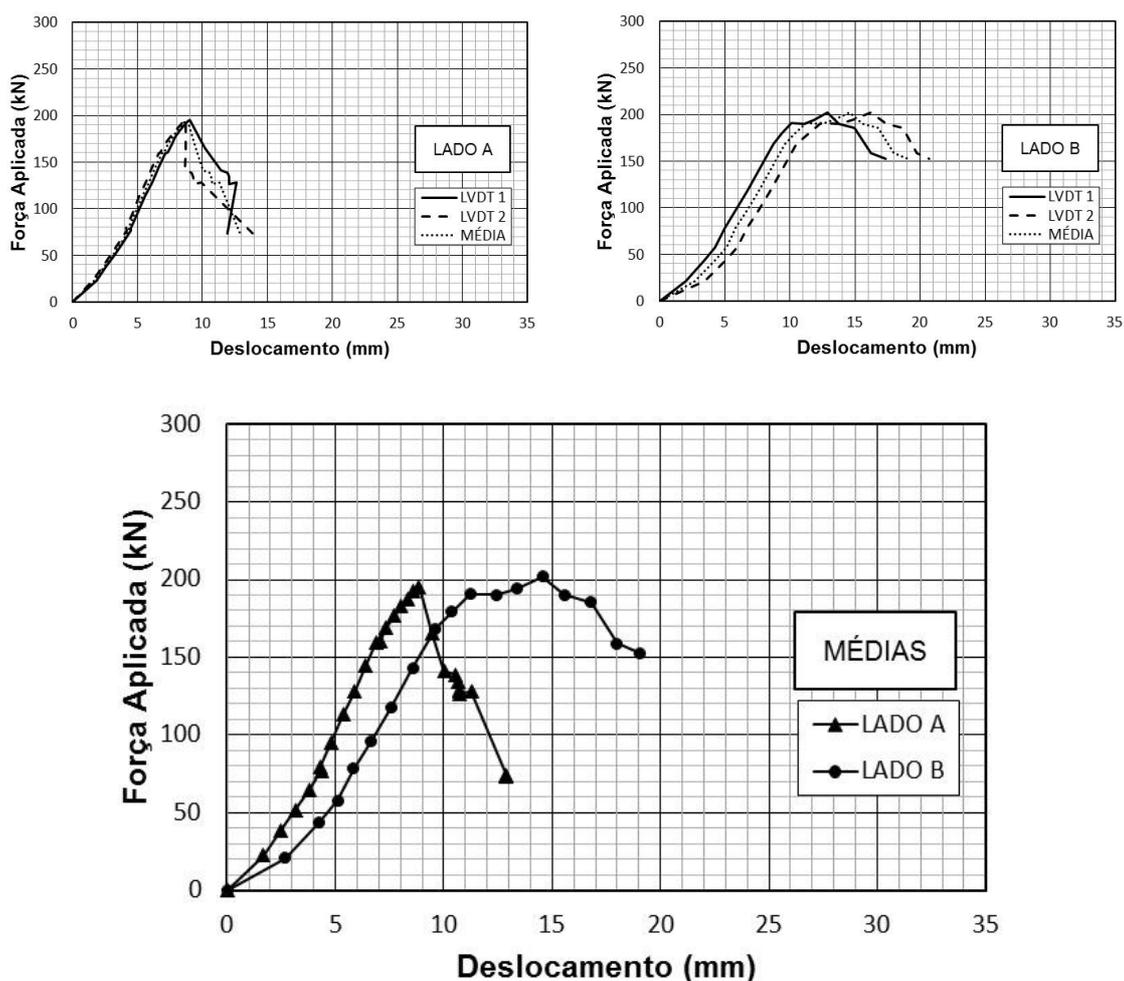
4.1.8 Ensaio da laje 08:

Na laje 8, após realizados os ajustes, é possível observar que para os ensaios A e B os transdutores tiveram um comportamento similar.

Para ambos os ensaios o valor da carga de ruptura atingiu valores próximos, validando o modelo ensaiado.

Curvas com valores médios para cada ensaio (Lado A e Lado B) foram plotadas para se efetuar a comparação entre ensaios, Figura 93.

Figura 93: Resultado dos ensaios na Laje 8.



Fonte: O AUTOR

De acordo com o ensaio, a ruptura do modelo A se deu por força cortante, enquanto a ruptura do modelo B se deu por esforço de flexão com escorregamento da cordoalha.

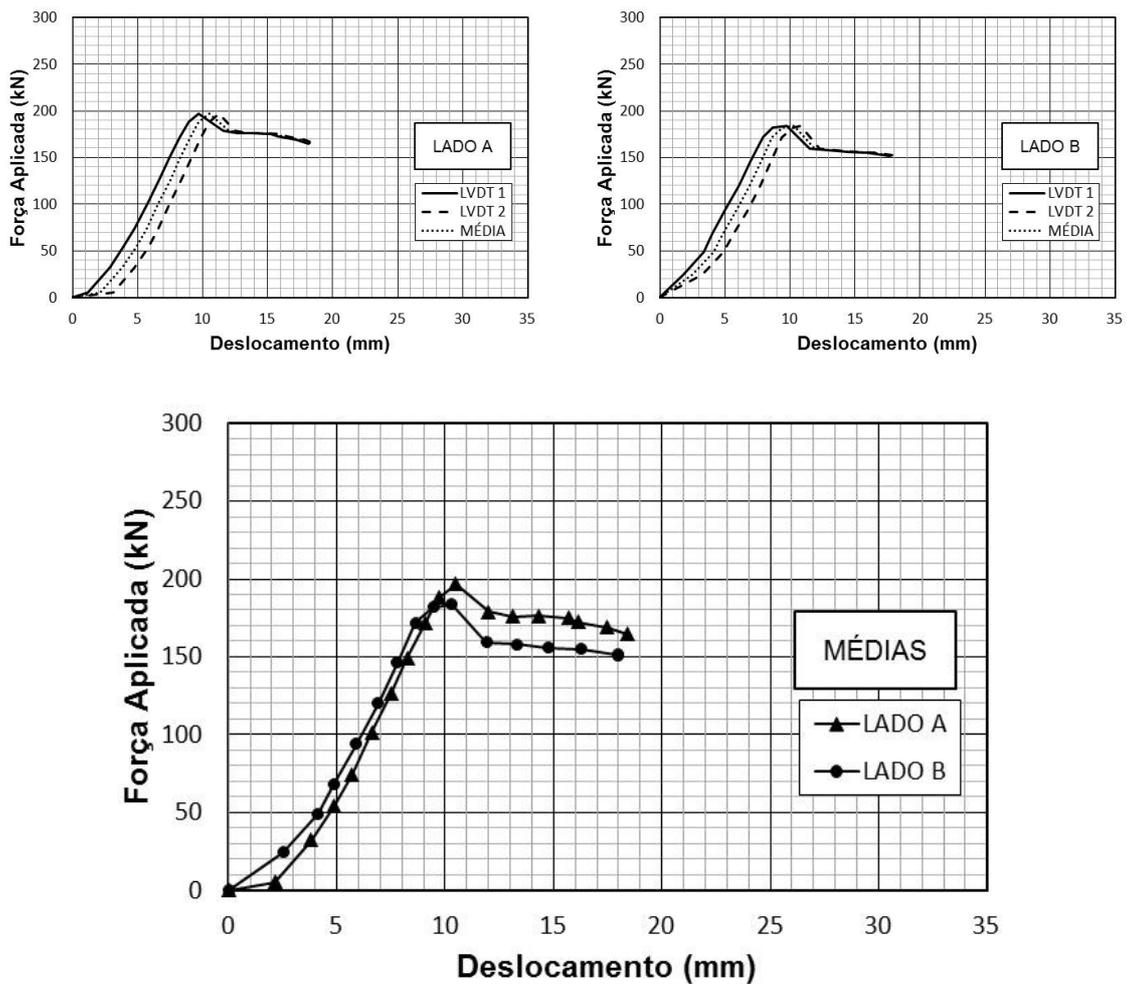
4.1.9 Ensaio da laje 09:

Na laje 9, após realizados os ajustes, é possível observar que para os ensaios A e B os transdutores tiveram um comportamento similar.

Para ambos os ensaios o valor da carga de ruptura atingiu valores próximos, validando o modelo ensaiado.

Curvas com valores médios para cada ensaio (Lado A e Lado B) foram plotadas para se efetuar a comparação entre ensaios, Figura 94.

Figura 94: Resultado dos ensaios na Laje 9.



Fonte: O AUTOR

De acordo com o ensaio, a ruptura do lado A e do lado B se deu por flexão com escorregamento de cordoalha.

4.2 ANALISE DOS RESULTADOS

Neste item são analisados os resultados dos ensaios e dos estudos teóricos. São apresentadas comparações entre os ensaios executado a fim de se estudar o comportamento dos exemplares durante o ensaio frente a variáveis contidas em cada um dos 9 modelos.

4.2.1 Valores experimentais

A seguir serão expostos os valores experimentais de resistência ao esforço cortante, calculados a partir dos carregamentos obtidos nos ensaios realizados com as lajes alveolares protendidas desse trabalho.

Os esquemas estáticos e os diagramas de esforço cortante foram obtidos por meio do programa computacional FTOOL, destinado a análise do comportamento estrutural de pórticos planos.

A partir dos valores máximos de carregamento, foi possível calcular os esforços cortantes, apresentados por meio da Tabela 5.

Tabela 5: Valores experimentais de resistência ao esforço cortante.

Laje	Carregamento [kN]	L [m]	nº alvéolos preenchidos	Área do alvéolo	Comprimento de preenchimento [m]	Peso alvéolo [kN]	Peso laje [kN]	Peso total [kN]	q [kN/m]	V _{exp} [kN]
L ₁₂	207,80	5,45	0,00	0,02	0,80	0,00	20,25	20,25	3,72	198,9
L ₂₁	231,70	6,00	2,00	0,02	0,80	1,30	20,25	21,55	3,59	221,2
L ₃₂	206,00	5,45	2,00	0,02	0,80	1,30	20,25	21,55	3,95	197,9
L ₄₂	256,10	5,45	2,00	0,02	0,80	1,30	20,25	21,55	3,95	243,4
L ₅₂	204,40	5,45	2,00	0,02	0,80	1,30	20,25	21,55	3,95	196,4
L ₆₁	197,40	6,00	4,00	0,02	0,80	2,60	20,25	22,85	3,81	190,7
L ₇₁	203,60	6,00	4,00	0,02	0,80	2,60	20,25	22,85	3,81	196,4
L ₈₁	220,60	6,00	4,00	0,02	0,80	2,60	20,25	22,85	3,81	211,8
L ₉₁	221,30	6,00	4,00	0,02	0,80	2,60	20,25	22,85	3,81	212,4

Fonte: O AUTOR

4.2.1 Valores de cálculo

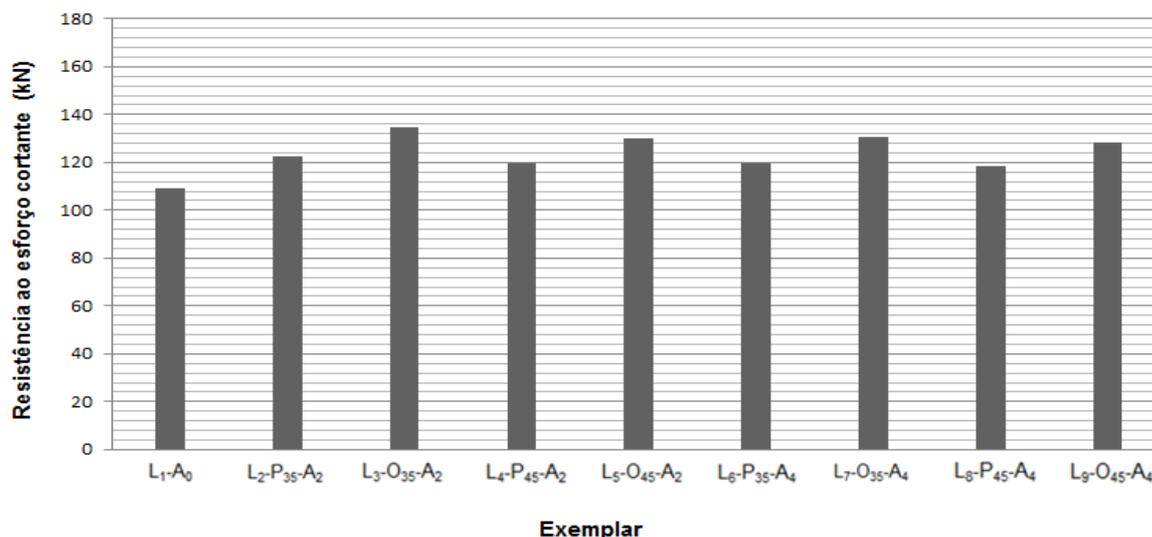
A seguir serão expostos os valores de cálculo de resistência à força cortante, que foram calculados em duas etapas. Inicialmente foram considerados valores teóricos das características dos materiais, como resistência a compressão do concreto da laje e do concreto do preenchimento, resistência à tração do aço e módulo de elasticidade dos concretos utilizados. A Tabela 6 e a Figura 95, expõem os parâmetros calculados com dados estritamente teóricos.

Tabela 6: Valores de cálculo de resistência à esforço cortante.

CASO	fCK - laje (MPa)	fCK - alv. (MPa)	Local de preenchimento	h (m)	Número de alvéolos preenchidos	Vc (kN)	Vp (kN)	Vc/Vp	VRd (kN)
L ₁ -A ₀	35	0	0	20	0	55,44	53,90	1,03	109,33
L ₂ -P ₃₅ -A ₂	35	35	pista	20	2	65,96	56,31	1,17	122,27
L ₃ -O ₃₅ -A ₂	35	35	pista	20	4	76,49	57,92	1,32	134,41
L ₄ -P ₄₅ -A ₂	35	45	pista	20	2	64,83	54,90	1,18	119,72
L ₅ -O ₄₅ -A ₂	35	45	pista	20	4	74,21	55,57	1,34	129,78
L ₆ -P ₃₅ -A ₄	35	35	obra	20	2	65,96	53,90	1,22	119,86
L ₇ -O ₃₅ -A ₄	35	35	obra	20	4	76,49	53,90	1,42	130,39
L ₈ -P ₄₅ -A ₄	35	45	obra	20	2	64,83	53,90	1,20	118,72
L ₉ -O ₄₅ -A ₄	35	45	obra	20	4	74,21	53,90	1,38	128,11

Fonte: O AUTOR

Figura 95: Valores de cálculo de resistência ao esforço cortante.



Fonte: O AUTOR

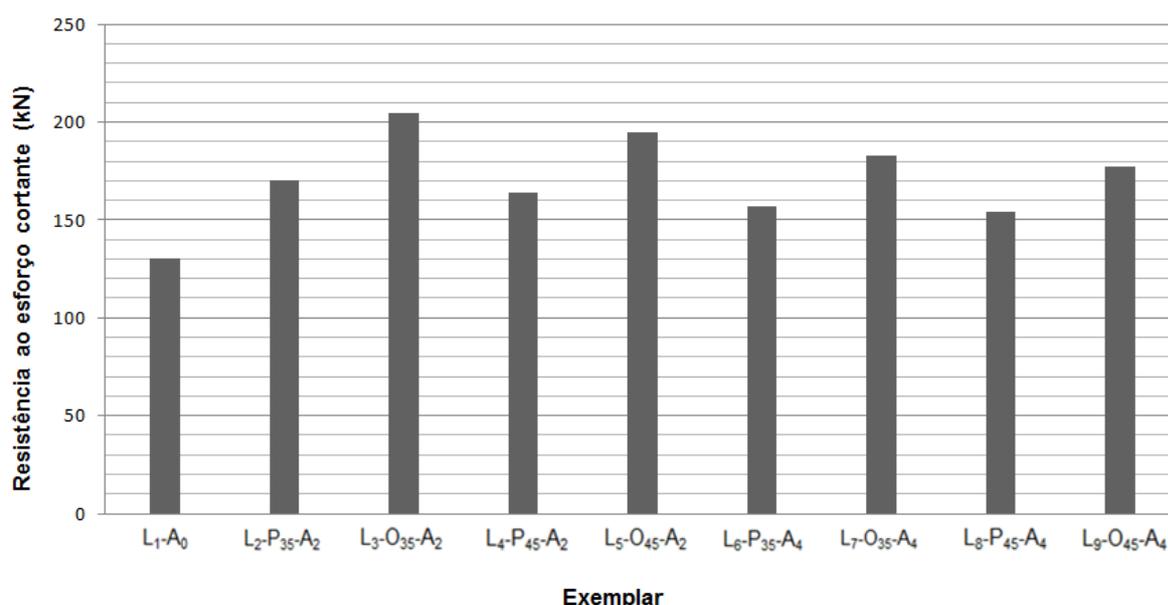
Em uma segunda etapa, foram calculados os valores de resistência ao esforço cortante com base nas características reais dos materiais de fabricação e preenchimento das lajes. A esses foi dado o nome de Valores Teóricos de Resistência ao esforço cortante. A Tabela 7 e a Figura 96, expõem os parâmetros teóricos calculados com dados experimentais.

Tabela 7: Valores teóricos de resistência ao esforço cortante.

CASO	f_{cm} - laje (MPa)	f_{ck} - alv. (MPa)	Local de preenchimento	h (cm)	Número de alvéolos preenchidos	V_c (kN)	V_p (kN)	V_c/V_p	V_R (kN)
L ₁ -A ₀	56,83	0	0	20	0	76,59	53,90	1,42	130,48
L ₂ -P ₃₅ -A ₂	56,83	33,75	pista	20	2	102,76	66,73	1,54	169,49
L ₃ -O ₃₅ -A ₂	56,83	33,75	pista	20	4	128,93	75,34	1,71	204,28
L ₄ -P ₄₅ -A ₂	56,83	38,88	pista	20	2	99,93	64,20	1,56	164,13
L ₅ -O ₄₅ -A ₂	56,83	38,88	pista	20	4	123,28	71,11	1,73	194,38
L ₆ -P ₃₅ -A ₄	56,83	33,75	obra	20	2	102,76	53,90	1,91	156,66
L ₇ -O ₃₅ -A ₄	56,83	33,75	obra	20	4	128,93	53,90	2,39	182,83
L ₈ -P ₄₅ -A ₄	56,83	38,88	obra	20	2	99,93	53,90	1,85	153,83
L ₉ -O ₄₅ -A ₄	56,83	38,88	obra	20	4	123,28	53,90	2,29	177,17

Fonte: O AUTOR

Figura 96: Valores teóricos de resistência ao esforço cortante.



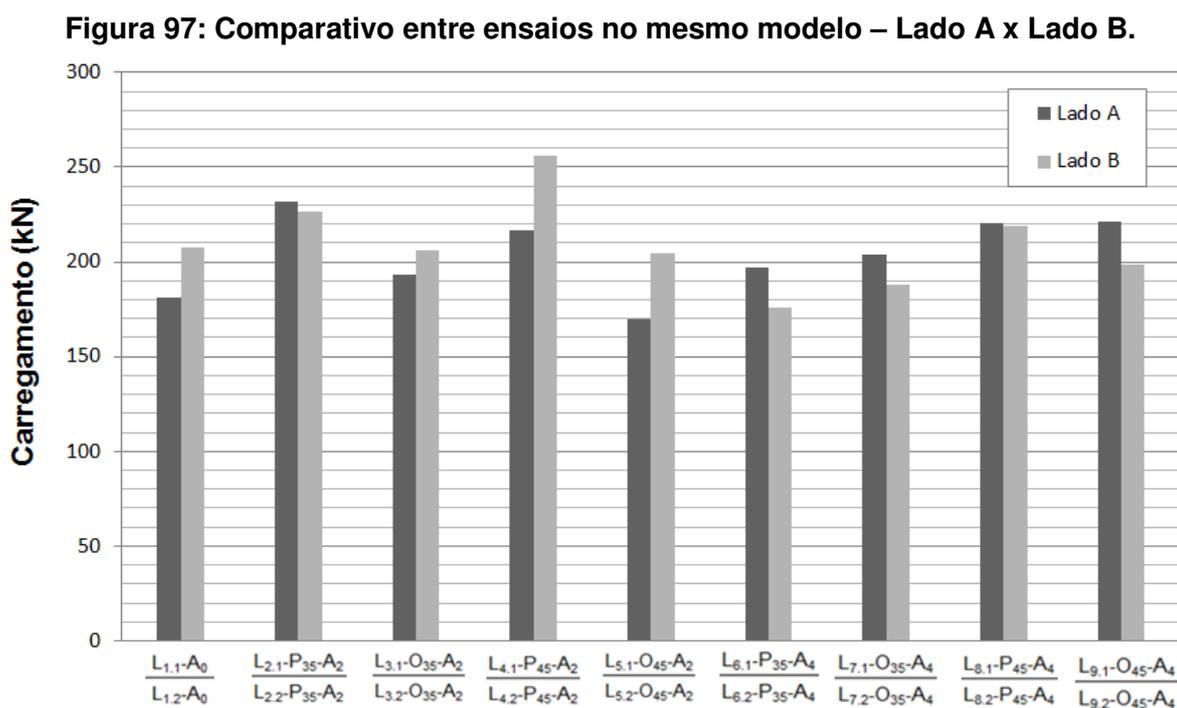
Fonte: O AUTOR

Observa-se que na Tabela 7, o valor de V_{RK} , ou seja, o valor da resistência à força cortante característica (sem coeficiente de segurança, no caso, o valor de γ_c em τ_{rd}) trata-se de uma aproximação, pois para uma análise mais criteriosa, seria necessário reduzir os valores pertinentes à parcela de protensão, que não foi realizado para este estudo.

4.2.2 Comparação entre ensaios no mesmo modelo:

A Figura 97 traz o comparativo entre os dois ensaios realizados em cada modelo.

O motivo principal do ensaio em ambos os lados de uma mesma laje é o de produzir prova e contra-prova que garantam a validação dos ensaios além de expor os desvios inerentes ao ensaio e ao processo produtivo.



Fonte: O AUTOR

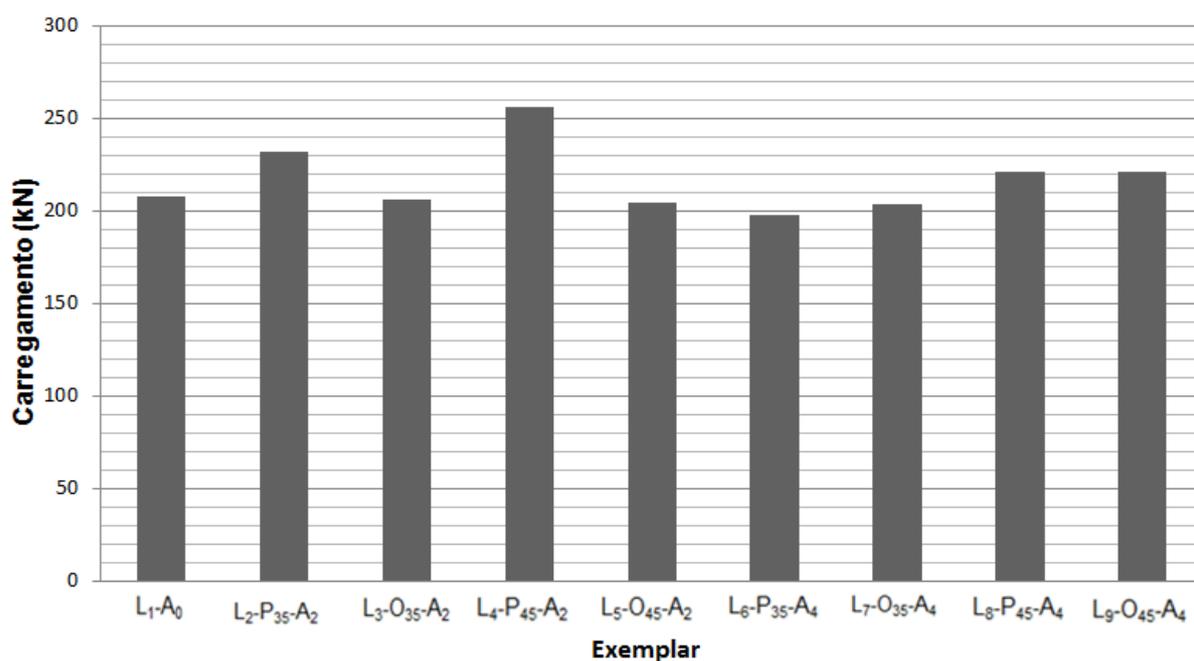
De acordo com a Figura 97, observa-se que houve boa correlação entre os resultados dos ensaios na mesma laje, entretanto, em alguns casos, houve diferenças significativas, tais como a L_1 , L_4 , a L_5 e a L_6 . Pode-se explicar a diferença pelo modo de ruptura diferente entre os ensaios. A laje L_1 apresentou ruptura por força cortante no lado A, porém, ruptura por flexão com escorregamento de cordoalha no lado B. A laje

L₄ apresentou a ruptura por flexão combinada com escorregamento de cordoalha no lado A, porém ruptura por força cortante no lado B. A laje L₅ apresentou ruptura nos lados A e B por flexão e escorregamento da cordoalha. A laje L₆ apresentou ruptura por esforço combinado de flexão com cortante, porém, houve indícios de ruptura por esforço de torção, em seu lado A, porém seu lado B teve ruptura por esforço de flexão com escorregamento da cordoalha.

Por se tratar de um estudo realizado sob a supervisão de pessoal qualificado e do autor da pesquisa, ou seja, com controle rigoroso sobre cada etapa da execução, esse trabalho fez uso dos valores potenciais dos ensaios em decorrência da pequena quantidade de modelos ensaiados. Esses valores são os maiores valores entre os dois ensaios realizados – prova e contra prova.

Esses valores representam os maiores valores entre os dois ensaios, conforme Figura 98.

Figura 98: Máximos valores entre ensaios – Lado A x Lado B.



Fonte: O AUTOR

De acordo com os resultados potenciais na Figura 98, pode-se ver que houve casos onde o modelo sem preenchimento de alvéolos obteve resistência à força cortante maior que modelos com alvéolo preenchido. Esse fato pode ser explicado pela forma de ruptura ocorrida nos ensaios, pois, os ensaios com ruptura a força cortante, apresentam valores superiores à ruptura combinada de flexão com escorregamento de

cordoalha, pois o alvéolo preenchido aparentemente não contribui na capacidade resistente da laje com o modo de ruptura por escorregamento da cordoalha.

O ensaio da laje L1 apresentou valor de ruptura maior no ensaio no lado B, onde houve ruptura de flexão com escorregamento de cordoalha. Esse fato pode ser explicado por ser o valor potencial de ruptura do modelo, necessitando de uma maior quantidade de amostras para comprovar esse fato.

4.2.3 Comparação entre valores teóricos e valores experimentais

Para a comparação entre valores teóricos e valores experimentais foram adotadas as resistências potenciais, conforme a Tabela 8, e valores teóricos obtidos por meio de cálculos que levam em conta as características reais dos materiais empregados.

A Tabela 8 mostra a comparação entre valores teóricos (V_R) com e sem o coeficiente de segurança (minoração de resistências) e dados experimentais.

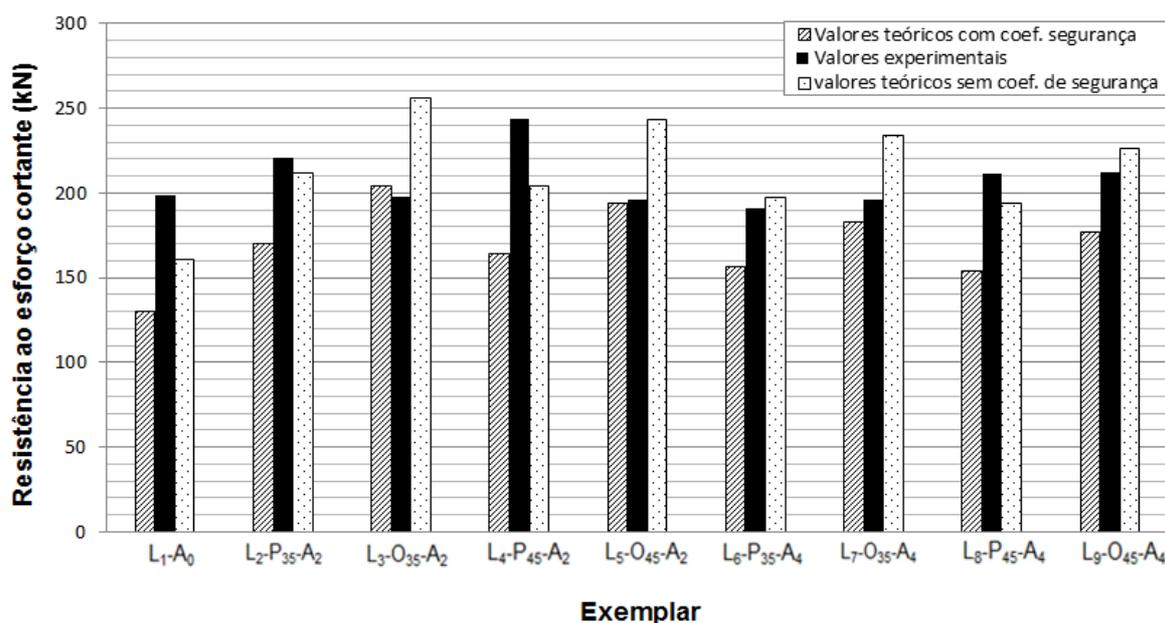
Tabela 8: Valores teóricos de resistência à esforço cortante.

CASO Potencial	Sem coef. Segurança			Com coef. Segurança			V_R (kN) Sem coef.	V_R (kN) Com coef.	V_{exp} (kN)	V_{exp}/V_R Sem coef.	V_{exp}/V_R Com coef.
	$V_{c_{teor}}$ (kN)	$V_{p_{teor}}$ (kN)	$V_{c_{teor}}/V_{p_{teor}}$	$V_{c_{teor}}$ (kN)	$V_{p_{teor}}$ (kN)	$V_{c_{teor}}/V_{p_{teor}}$					
L ₁ -A ₀	107,22	53,90	1,99	76,59	53,90	1,42	161,12	130,48	198,9	1,23	1,52
L ₂ -P ₃₅ -A ₂	144,52	67,15	2,15	103,23	67,15	1,54	211,67	170,38	221,2	1,05	1,30
L ₃ -O ₃₅ -A ₂	180,51	75,34	2,40	128,93	75,34	1,71	255,85	204,28	197,9	0,77	0,97
L ₄ -P ₄₅ -A ₂	139,90	64,20	2,18	99,93	64,20	1,56	204,10	164,13	243,4	1,19	1,48
L ₅ -O ₄₅ -A ₂	172,59	71,11	2,43	123,28	71,11	1,73	243,69	194,38	196,4	0,81	1,01
L ₆ -P ₃₅ -A ₄	143,86	53,90	2,67	102,76	53,90	1,91	197,76	156,66	190,7	0,96	1,22
L ₇ -O ₃₅ -A ₄	180,51	53,90	3,35	128,93	53,90	2,39	234,40	182,83	196,4	0,84	1,07
L ₈ -P ₄₅ -A ₄	139,90	53,90	2,60	99,93	53,90	1,85	193,80	153,83	211,8	1,09	1,38
L ₉ -O ₄₅ -A ₄	172,59	53,90	3,20	123,28	53,90	2,29	226,48	177,17	212,4	0,94	1,20

Fonte: O AUTOR

A Figura 99 mostra o comparativo entre os dados teóricos e experimentais da Tabela 8.

Figura 99: Comparativo entre os valores teóricos com coeficiente de segurança, sem coeficiente de segurança e valores experimentais.



Exemplar
Fonte: O AUTOR

De acordo com os resultados, pode-se notar os valores de resistência ao esforço cortante para as lajes L₁, L₂, L₄, L₆, L₈ e L₉, que foram calculadas sem o coeficiente de segurança, ficaram mais próximos aos valores obtidos por meio dos ensaios.

Das lajes calculadas com o emprego do coeficiente de segurança, apenas a laje L₃ obteve valor teórico inferior ao valor experimental. Tal fato pode ser atribuído a falha de ancoragem da cordoalha, tendo em vista que de acordo com o ensaio, a ruptura do modelo tanto no lado A quanto no lado B se deu por flexão com escorregamento da cordoalha.

Para as lajes L₅, L₆, L₇ e L₉, torna-se evidente que a exclusão do coeficiente de segurança carretaria a valores não seguros de uso do elemento estrutural.

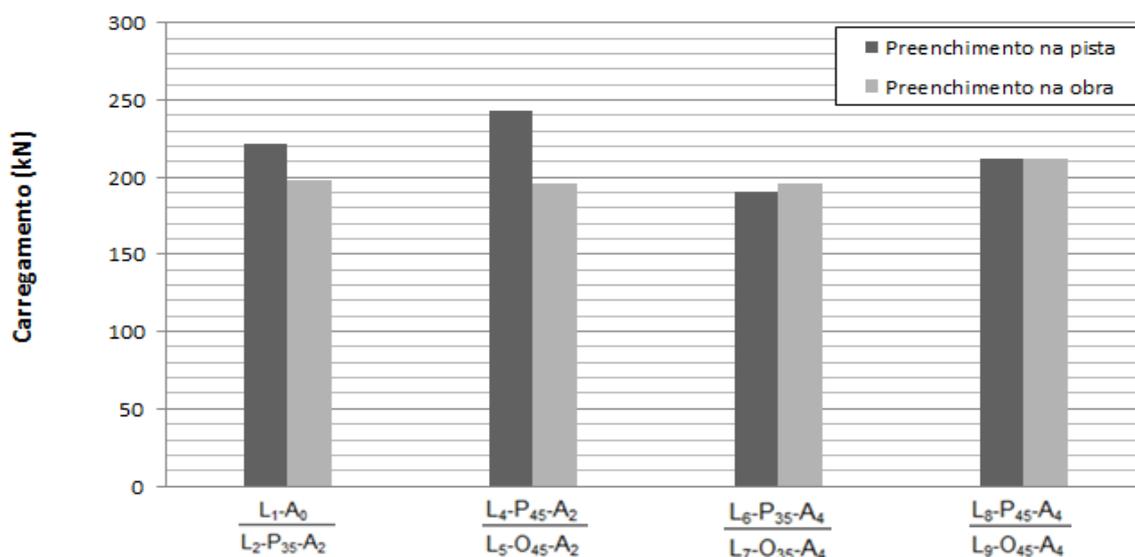
4.2.3 Influência do instante de preenchimento dos alvéolos

Por meio dos ensaios realizados foi possível traçar um comparativo com relação ao instante de preenchimento de alvéolos (pista ou obra).

A pesquisa contou com dois instantes de preenchimento, sendo um antes da liberação da pista de concretagem, chamado de Preenchimento na pista. O segundo momento ocorreu após a liberação da pista, nomeado de Preenchimento na obra.

A Figura 100 mostra o comparativo entre os resultados de resistência ao esforço cortante dos ensaios realizados para os dois momentos de preenchimento executados.

Figura 100: Comparação entre preenchimento em obra VS preenchimento na pista.



Exemplar

Fonte: O AUTOR

Em linhas gerais nota-se que para os exemplares ensaiados, os resultados de resistência à esforço cortante foi superior quando o preenchimento dos alvéolos foi realizado antes da liberação da pista de concretagem, se comparados ao executado após a liberação.

5.2 Influência do número de alvéolos preenchidos

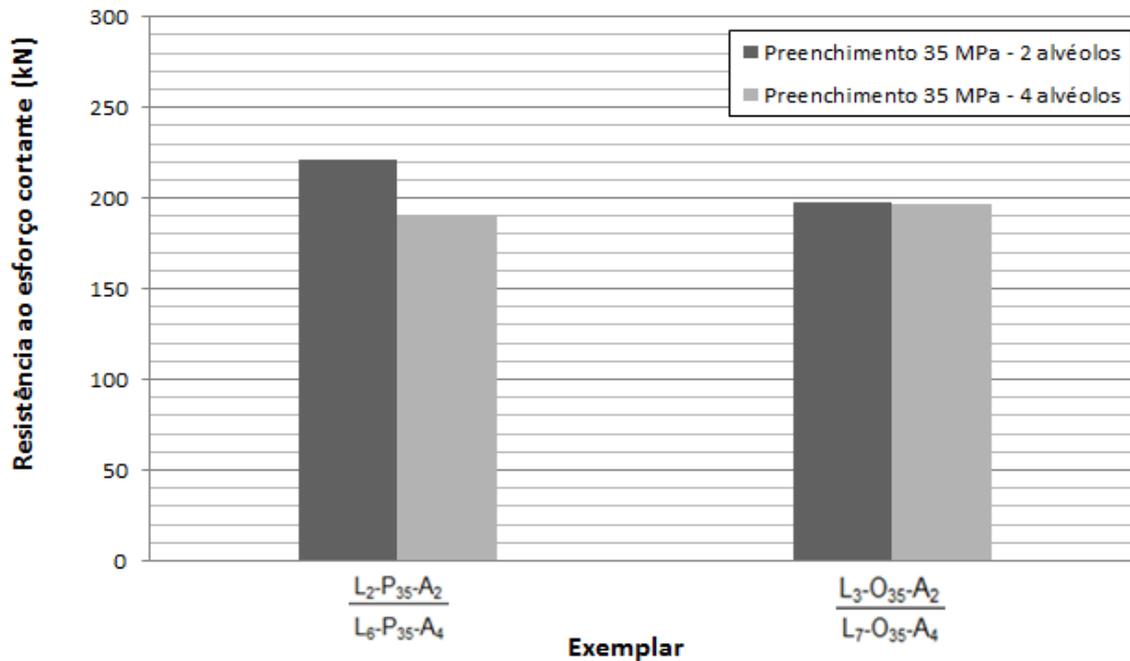
No estudo realizado por FERNANDES (2007), onde lajes alveolares sem capa com 2 ou 4 alvéolos preenchidos, foram ensaiadas a força cortante e concluiu-se que os valores de teóricos, baseados na formulação de norma técnica, foram atendidos. O autor faz uma observação a respeito das lajes preenchidas em 4 alvéolos, que mostrou um fator de segurança ligeiramente superior ao limite teórico. Sendo assim, o autor afirma que ao se preencher 4 alvéolos da laje, sua capacidade resistente não é aumentada linearmente, ou seja, não é possível se traçar uma proporção de ganho de resistência em relação a lajes com 2 alvéolos preenchidos.

Por meio dos ensaios realizados foi possível traçar um comparativo da influencia do número de alvéolos preenchidos na resistência à esforço cortante.

A fim de se atingir maior representatividade foram executadas duas análises, sendo uma comparando a influência do preenchimento com concreto de mesma resistência característica que o usado na produção das lajes, e outra com preenchimento de maior resistência.

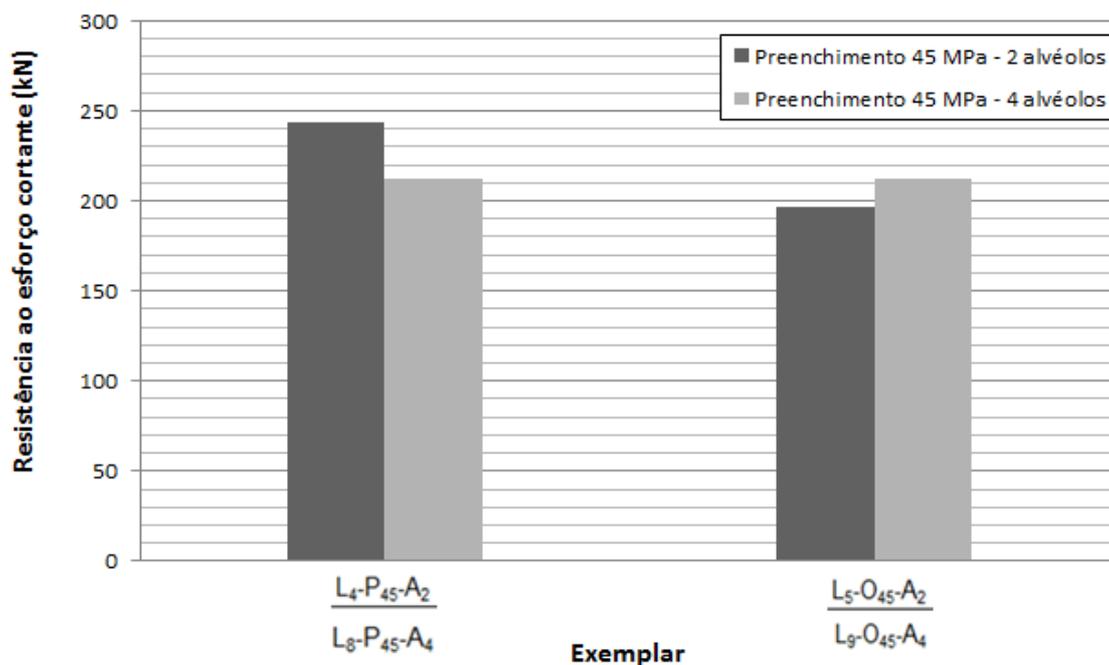
A Figura 101 e Figura 102 mostram as curvas que contem os valores de resistência à esforço cortante para lajes com 2 e 4 alvéolos preenchidos com concreto de 35 e 45 MPa respectivamente.

Figura 101: Comparação entre lajes com 2 e 4 alvéolos preenchidos com fck 35 MPa.



Fonte: O AUTOR

Figura 102: Comparação entre lajes com 2 e 4 alvéolos preenchidos com fck 45 MPa.

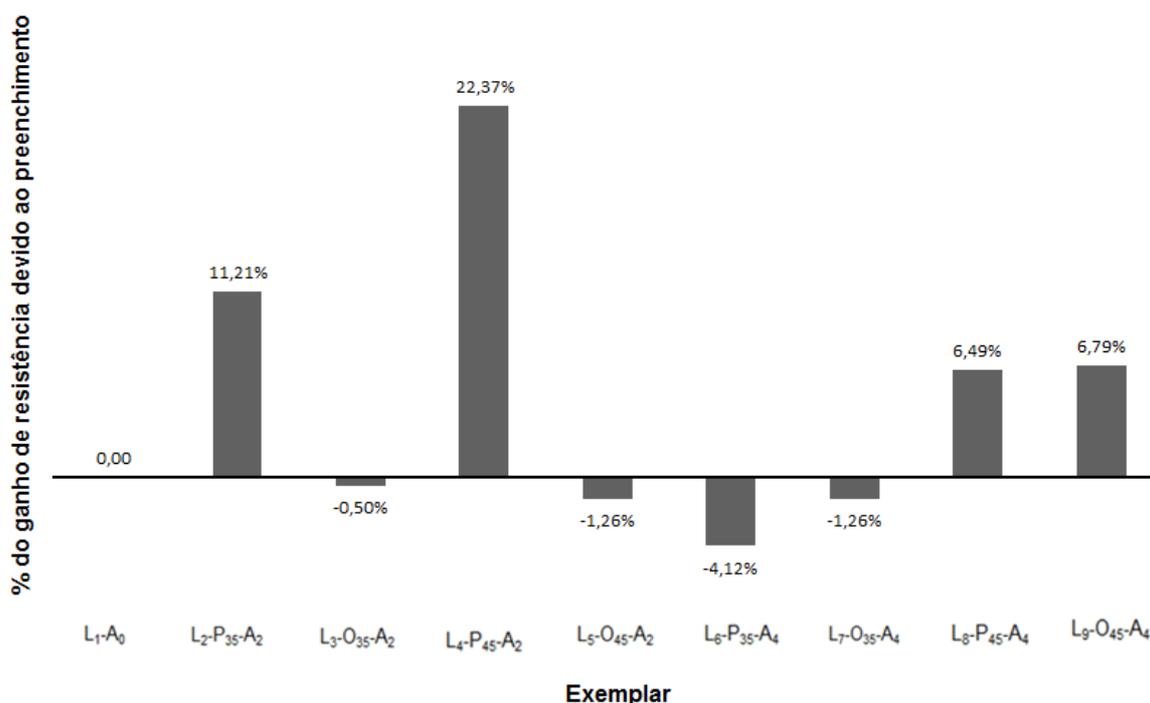


Fonte: O AUTOR

Em complemento ao comparativo da influência do número de alvéolos preenchidos na resistência ao esforço cortante, foi traçado um gráfico onde é exposto os valores experimentais de ganho de resistência em comparação ao modelo sem preenchimento.

É possível observar que para alguns exemplares houve um decréscimo no valor resistente, divergindo dos valores teóricos, conforme Figura 103.

Figura 103: Ganho de resistência devido ao preenchimento.



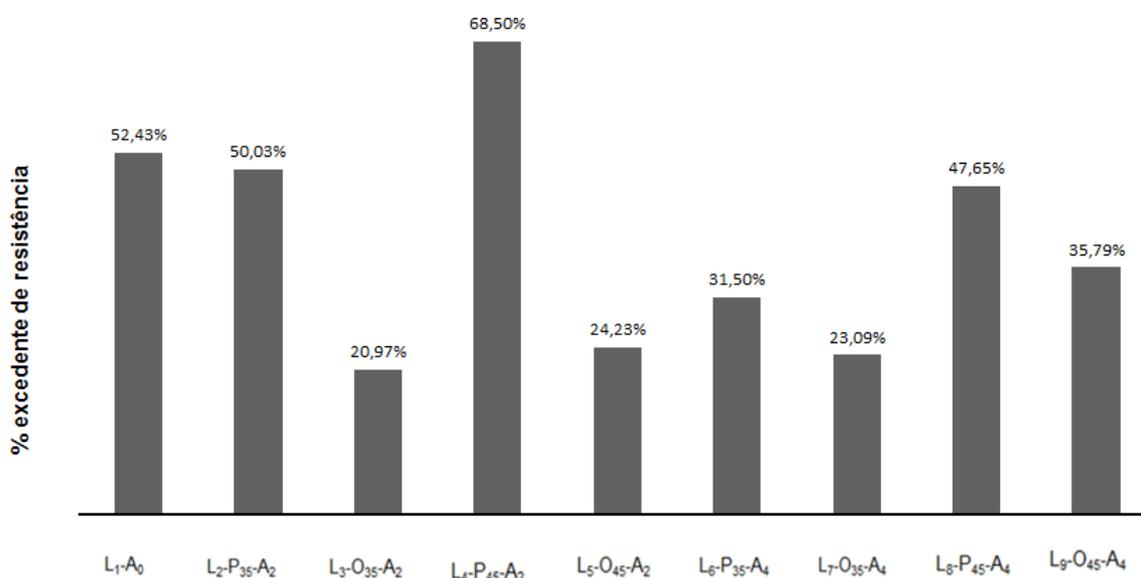
Fonte: O AUTOR

De acordo com os resultados, observa-se que para alguns modelos, o percentual de ganho de resistência é inferior a referência. Tal fato pode ser atribuído a ruptura do modelo, que em seu lado A ocorreu tipicamente por força cortante, enquanto a ruptura do modelo no lado B se deu por força cortante com posterior combinação de esforços cortantes e de flexão com escorregamento de cordoalha, ou seja, obtendo valores superiores a um ensaio que tenha sua ruína tipicamente por esforço cortante.

5.3 Influência do fator de contribuição do preenchimento dos alvéolos

Por meio dos ensaios realizados foi possível traçar um comparativo da porcentagem excedente de resistência ao esforço cortante em relação aos valores teóricos calculados por meio de equações contidas na norma técnica nacional vigente ABNT NBR 14861 (2011).

Figura 104: Comparação da resistência ao esforço cortante de ensaio com à resistência ao esforço cortante teórico.



Fonte: O AUTOR

De acordo com os resultados da Figura 104, observa-se que para todos os ensaios realizados há uma porcentagem excedente de resistência à esforço cortante em relação aos valores teóricos calculados elevada.

O menor valor excedente registrado foi de 20,97% e o maior foi de 68,50%.

Esses valores indicam a necessidade de se estudar com maior rigor o valor do fator de redução da contribuição dos alvéolos preenchidos na composição da seção atuante de concreto.

5.3 Ajuste do fator de contribuição do preenchimento dos alvéolos

No item 5.2 foram apresentados os valores percentuais do excedente de resistência à esforço cortante em relação aos valores teóricos calculados.

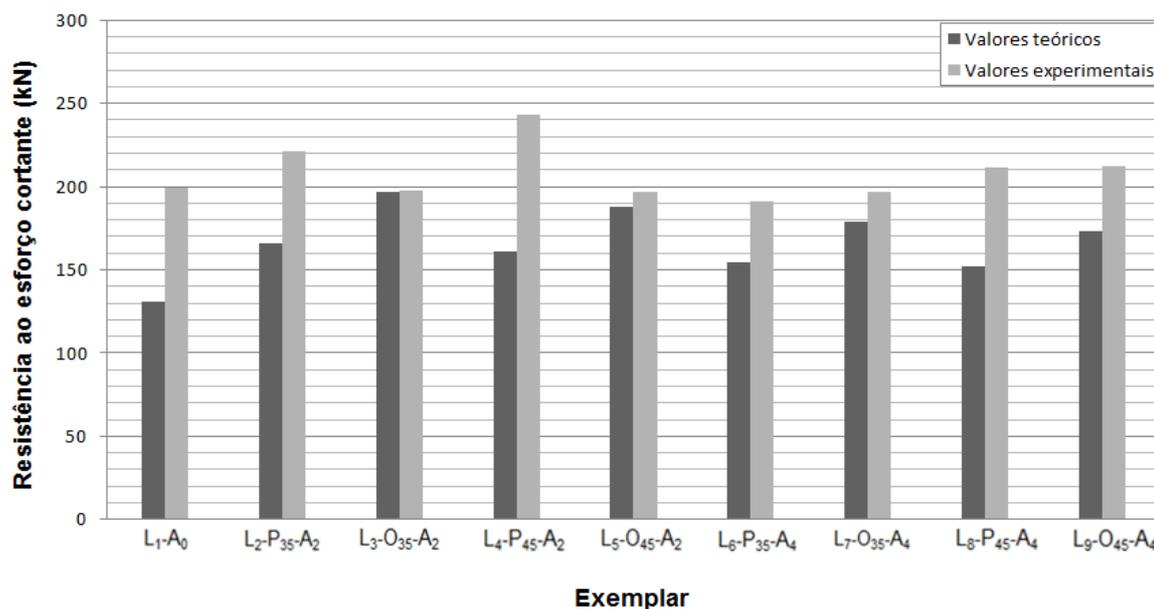
Esses valores são de elevada grandeza indicando a necessidade de se estabelecer um novo valor, para o estudo em questão.

Tomando como ponto de partida o exemplar com o menor valor excedente, obteve-se por meio de análise numérica um novo fator de redução da contribuição dos alvéolos preenchidos na composição da seção atuante de concreto.

O fator de redução passou de 0,50 para 0,83.

Uma nova análise comparativa entre valores experimentais e valores teóricos após ajuste foi desenvolvida adotando o fator de redução atualizado, conforme exposto na Figura 105.

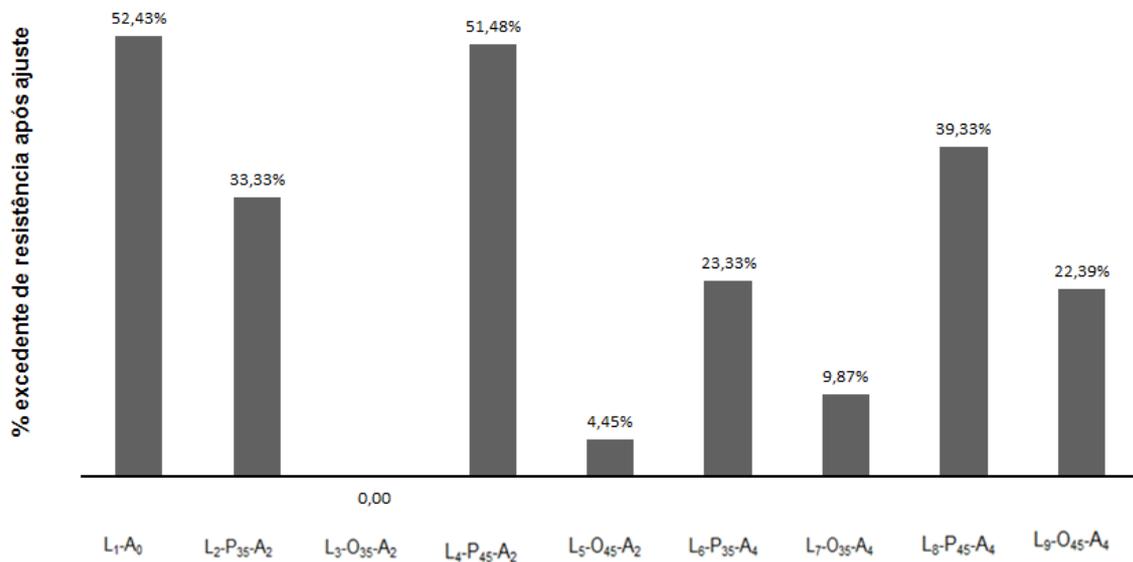
Figura 105: Comparativo entre os resistência teórica e resistência experimental após ajuste da parcela de contribuição.



Fonte: O AUTOR

Após os ajustes realizados, foi traçado um novo comparativo da porcentagem excedente de resistência à esforço cortante em relação aos valores teóricos, Figura 106.

Figura 106: Porcentagem excedente da resistência experimental em relação à resistência teórica após ajuste da parcela de contribuição.



Fonte: O AUTOR

Dado os ajustes do fator de redução, observa-se que o menor valor excedente passou de 20,97% para 0%, enquanto o maior passou de 68,50% para 51,48%.

Para a análise acima, não foi levado em consideração a parcela de contribuição da protensão na resistência ao esforço cortante, ou seja, computou-se somente a parcela do concreto.

Essa pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas de concreto submetidas ao esforço cortante. A proposta foi realizar ensaios em ambiente de fábrica promovendo a sua implementação no controle de qualidade de projeto e de produção.

5.1 Comentários sobre os resultados obtidos

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

5.1.1 Comparação entre valores teóricos e experimentais

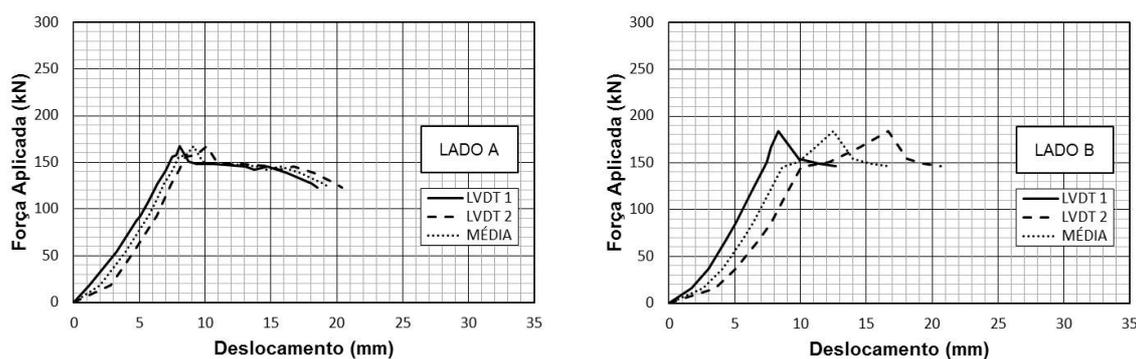
Observa-se que para um dos modelos, o percentual de ganho de resistência do elemento com alvéolo preenchido foi inferior ao modelo usado como referência, conforme exposto na Tabela 9. Tal fato pode ser atribuído ao modo de ruptura da laje, que em um lado foi tipicamente por força cortante, enquanto do outro lado se deu por força cortante com posterior combinação de esforços de flexão com escorregamento de cordoalha, ou seja, obtendo valores superiores em comparação a um ensaio que tenha sua ruína tipicamente por esforço cortante (Figura 107).

Tabela 9: Valores teóricos e experimentais de resistência ao esforço cortante.

CASO Potencial	Sem coef. Segurança			Com coef. Segurança			V_R (kN) Sem coef.	V_R (kN) Com coef.	V_{exp} (kN)	$\frac{V_{exp}}{V_r}$ Sem coef.	$\frac{V_{exp}}{V_r}$ Com coef.
	$V_{C_{teor}}$ (kN)	$V_{p_{teor}}$ (kN)	$\frac{V_{c,teo}}{V_{p,teo}}$	$V_{C_{teor}}$ (kN)	$V_{p_{teor}}$ (kN)	$\frac{V_{c,teo}}{V_{p,teo}}$					
L₃-O₃₅-A₂	180,51	75,34	2,40	128,93	75,34	1,71	255,85	204,28	197,9	0,77	0,97

Fonte: O AUTOR

Figura 107: Divergência do tipo de ruptura da Laje 3.



Fonte: O AUTOR

Foi possível observar que para os demais modelos os valores experimentais de resistência à força cortante foram superiores aos valores teóricos, convergindo a valores seguros, conforme Tabela 10.

Tabela 10: Valores teóricos e experimentais de resistência à esforço cortante.

CASO Potencial	Sem coef. Segurança			Com coef. Segurança			V_R (kN) Sem coef.	V_R (kN) Com coef.	V_{exp} (kN)	$\frac{V_{exp}}{V_r}$ Sem coef.	$\frac{V_{exp}}{V_r}$ Com coef.
	$V_{c,teor}$ (kN)	$V_{p,teor}$ (kN)	$\frac{V_{c,teo}}{V_{p,teo}}$	$V_{c,teor}$ (kN)	$V_{p,teor}$ (kN)	$\frac{V_{c,teo}}{V_{p,teo}}$					
L ₁ -A ₀	107,22	53,90	1,99	76,59	53,90	1,42	161,12	130,48	198,9	1,23	1,52
L ₂ -P ₃₅ -A ₂	144,52	67,15	2,15	103,23	67,15	1,54	211,67	170,38	221,2	1,05	1,30
L ₃ -O ₃₅ -A ₂	180,51	75,34	2,40	128,93	75,34	1,71	255,85	204,28	197,9	0,77	0,97
L ₄ -P ₄₅ -A ₂	139,90	64,20	2,18	99,93	64,20	1,56	204,10	164,13	243,4	1,19	1,48
L ₅ -O ₄₅ -A ₂	172,59	71,11	2,43	123,28	71,11	1,73	243,69	194,38	196,4	0,81	1,01
L ₆ -P ₃₅ -A ₄	143,86	53,90	2,67	102,76	53,90	1,91	197,76	156,66	190,7	0,96	1,22
L ₇ -O ₃₅ -A ₄	180,51	53,90	3,35	128,93	53,90	2,39	234,40	182,83	196,4	0,84	1,07
L ₈ -P ₄₅ -A ₄	139,90	53,90	2,60	99,93	53,90	1,85	193,80	153,83	211,8	1,09	1,38
L ₉ -O ₄₅ -A ₄	172,59	53,90	3,20	123,28	53,90	2,29	226,48	177,17	212,4	0,94	1,20

Fonte: O AUTOR

5.1.2 Comparação da resistência à compressão do concreto de preenchimento dos alvéolos

Para os modelos estudados foram adotados dois valores distintos de resistência a compressão do concreto de preenchimento – 35 e 45 MPa.

Nos modelos com 2 e 4 alvéolos preenchidos usando o concreto de maior resistência (45 MPa), excluindo-se a Laje 3, foram obtidos valores superiores de

resistência ao esforço cortante quando comparados aos modelos com o uso do preenchimento de menor resistência a compressão, conforme Tabela 11.

Tabela 11: Comparação da resistência à compressão do concreto de preenchimento dos alvéolos.

CASO Potencial	fck preenchimento	V _R (kN) Sem coef.	V _R (kN) Com coef.	V _{exp} (kN)
L ₂ -P ₃₅ -A ₂	35	211,67	170,38	221,2
L ₄ -P ₄₅ -A ₂	45	204,10	164,13	243,4
L ₃ -O ₃₅ -A ₂	35	255,85	204,28	197,9
L ₅ -O ₄₅ -A ₂	45	243,69	194,38	196,4
L ₆ -P ₃₅ -A ₄	35	197,76	156,66	190,7
L ₈ -P ₄₅ -A ₄	45	193,80	153,83	211,8
L ₇ -O ₃₅ -A ₄	35	234,40	182,83	196,4
L ₉ -O ₄₅ -A ₄	45	226,48	177,17	212,4

Fonte: O AUTOR

5.1.3 Comparação dos ensaios realizados na mesma laje

Observa-se que houve casos onde o modelo sem preenchimento de alvéolos obteve resistência à força cortante maior que modelos com alvéolo preenchido, podendo esse fato ser explicado pela forma de ruptura ocorrida nos ensaios.

Ensaio com ruptura a força cortante apresentaram valores de resistência superiores aqueles com ruptura combinada de flexão com escorregamento de cordoalha. Aparentemente o alvéolo não contribui na capacidade resistente da laje com o modo de ruptura por escorregamento da cordoalha. Em ensaio de laje onde o valor de ruptura de um lado foi superior ao outro, observou-se a ocorrência de ruptura por flexão com escorregamento de cordoalha. Esse fato pode ser explicado por ter sido adotado o valor potencial de ruptura do modelo, evidenciando a necessidade de se ensaiar uma maior quantidade de amostras para comprovação do fato observado.

5.1.4 Forma de ruptura dos ensaios

Após a execução de todos os ensaios, foi possível observar que ocorreram basicamente três formas de ruptura:

- I. Ruptura por força cortante;
- II. Ruptura por torção;
- III. Ruptura por flexão combinada com escorregamento de cordoalha.

Ao todo foram ensaiados 18 modelos, sendo que as imagens e curvas traçadas conduzem a interpretação de que 01 apresentou ruptura por torção, 05 por força cortante e os demais por flexão combinada com escorregamento de cordoalha.

Tratando-se de um estudo que aborda resistência à força cortante, a princípio esperava-se que todos os modelos apresentassem indícios de ruptura por força cortante. A não ocorrência somente desse modo de ruptura pode ser atribuído as características físicas das lajes, que as conduziu a ruína por diferentes mecanismos não visados nesse tipo de ensaio.

5.1.5 Comparação do instante de preenchimento do alvéolo

A Tabela 12 aborda os valores teóricos (V_R) e experimentais (V_{EXP}) de resistência à força cortante das lajes ensaiadas que possuem preenchimento de alvéolos executados antes ou após a liberação da protensão na pista de concretagem.

Tabela 12: Comparação do instante de preenchimento do alvéolos.

CASO Potencial	Sem coef. Segurança			Com coef. Segurança			V_R (kN) Sem coef.	V_R (kN) Com coef.	V_{exp} (kN)	$\frac{V_{exp}}{V_r}$ Sem coef.	$\frac{V_{exp}}{V_r}$ Com coef.
	$V_{C,teor}$ (kN)	$V_{p,teor}$ (kN)	$\frac{V_{c,teo}}{V_{p,teo}}$	$V_{C,teor}$ (kN)	$V_{p,teor}$ (kN)	$\frac{V_{c,teo}}{V_{p,teo}}$					
L ₂ -P ₃₅ -A ₂	144,52	67,15	2,15	103,23	67,15	1,54	211,67	170,38	221,2	1,05	1,30
L ₃ -O ₃₅ -A ₂	180,51	75,34	2,40	128,93	75,34	1,71	255,85	204,28	197,9	0,77	0,97
L ₄ -P ₄₅ -A ₂	139,90	64,20	2,18	99,93	64,20	1,56	204,10	164,13	243,4	1,19	1,48
L ₅ -O ₄₅ -A ₂	172,59	71,11	2,43	123,28	71,11	1,73	243,69	194,38	196,4	0,81	1,01
L ₆ -P ₃₅ -A ₄	143,86	53,90	2,67	102,76	53,90	1,91	197,76	156,66	190,7	0,96	1,22
L ₇ -O ₃₅ -A ₄	180,51	53,90	3,35	128,93	53,90	2,39	234,40	182,83	196,4	0,84	1,07
L ₈ -P ₄₅ -A ₄	139,90	53,90	2,60	99,93	53,90	1,85	193,80	153,83	211,8	1,09	1,38
L ₉ -O ₄₅ -A ₄	172,59	53,90	3,20	123,28	53,90	2,29	226,48	177,17	212,4	0,94	1,20

Fonte: O AUTOR

Nota-se que para todos os casos, os valores teóricos de resistência à força cortante é superior quando o preenchimento de alvéolos é realizado após a liberação da protensão, sendo este valor de pelo menos 15% a mais que o caso de preenchimento antes da liberação da protensão.

Ao analisar os valores experimentais, observa-se que para os exemplares com 02 alvéolos preenchidos, os resultados de resistência ao esforço cortante foi superior quando o procedimento de preenchimento dos alvéolos foi realizado antes da liberação da proteção na pista de concretagem.

Para os exemplares com 04 alvéolos preenchidos, os resultados de resistência ao esforço cortante foi superior quando o procedimento de preenchimento dos alvéolos foi realizado após a liberação da proteção na pista de concretagem, porem, não sendo superior a 3 % do valor de preenchimento antes da liberação da protensão.

5.1.6 Comparação com a formulação teórica

É observado que de acordo com os resultados, os valores de resistência ao esforço cortante para a maioria das lajes que foram calculadas sem o coeficiente de segurança, os valores teóricos de resistência ao esforço cortante ficaram mais próximos aos valores experimentais.

Das lajes calculadas com o emprego do coeficiente de segurança, apenas uma obteve valor teórico inferior ao valor experimental. Esse fato pode ser atribuído a falha de ancoragem da cordoalha no modelo ensaiado, que apresentou ruptura em ambos os lados por flexão com escorregamento da cordoalha.

Para boa parte dos modelos ficou evidente que a exclusão do coeficiente de segurança levaria a valores não seguros para uso do elemento estrutural.

5.1.7 Influencia do fator de contribuição do material de preenchimento dos alvéolos

Observa-se que acordo com os resultados, para todos os ensaios realizados houve uma porcentagem excedente de resistência ao esforço cortante em relação aos valores teóricos (valores calculados com coeficiente de segurança e características reais dos materiais constituintes das lajes).

O menor valor excedente de resistência à força cortante registrado foi de 20,97%, ou seja, o valor obtido experimentalmente foi 20,97% superior ao valor

calculado usando as características reais dos materiais de fabricação das lajes e de seus preenchimentos.

O maior valor excedente de resistência à força cortante registrado foi de 68,50%, ou seja, o valor obtido experimentalmente foi 68,50% superior ao valor calculado usando as características reais dos materiais de fabricação das lajes e de seus preenchimentos.

Neste estudo foi realizada uma sugestão de ajuste teórico do fator de contribuição do preenchimento de alvéolos, onde para o menor valor excedente (sendo que o menor valor excedente de resistência à força cortante experimental foi de 20,97% superior ao valor calculado usando as características reais dos materiais de fabricação das lajes e de seus preenchimentos) atribuiu-se a correção de 20,97% para 0%, enquanto para o maior valor excedente (sendo que o maior valor excedente de resistência à força cortante experimental foi 68,50% superior ao valor calculado usando as características reais dos materiais de fabricação das lajes e de seus preenchimentos) passou de 68,50% para 51,48%, ao modificar o fator de contribuição de 0,50 para 0,83.

5.1.8 Implementação dos ensaios em ambiente de fábrica

Os ensaios propostos para serem realizados em ambiente fabril mostraram-se viáveis e factíveis.

Alguns pontos foram observados quanto a necessidade de melhoria e implementação de equipamentos de ensaio com maior nível de precisão e exatidão.

Para os ensaios foi utilizado um módulo de aquisição de dados com capacidade de coleta de 01 ponto de carga e deslocamento a cada 10 segundos. É esperado que para uma coleta adequada e satisfatória de dados ocorra a aquisição de dados a cada 01 segundo ou menos.

Outro ponto a ser observado é o pórtico de ensaios. O equipamento utilizado desloca-se sobre as vigas de reação para melhor ajuste da posição de aplicação de carga. Para tornar possível esse deslocamento, o equipamento possui uma folga entre seus pontos de ancoragem e as vigas de reação, fazendo com que ao ser iniciado o carregamento, o pórtico desloca-se por aproximadamente 10 milímetros até que seja feita a ancoragem, transferindo seu peso (em torno de 10 kN) ao elemento ensaiado e fazendo com que a zona de acomodações iniciais se amplie.

5.2 Conclusões finais

Foi possível observar que grande parte dos modelos apresentam valores experimentais de resistência à força cortante superiores aos valores teóricos, mostrando que as formulações normativas atuais convergem para valores seguros.

Modelos que fizeram uso do preenchimento de alvéolos com um material de maior resistência a compressão demonstraram-se com eficiência superior em comparação a preenchimentos de menor resistência a compressão.

Lajes que obtiveram ruptura tipicamente à força cortante apresentaram valores de resistência superiores aquelas com ruptura combinada de flexão com escorregamento de cordoalha ou ruptura por torção.

Em sua maioria, os modelos deste trabalho apresentaram indícios de ruptura por flexão combinada com escorregamento de cordoalha, possivelmente em consequência de suas características físicas (materiais), detalhamento da laje e/ou possíveis falhas em seu processo produtivo.

Nota-se que para todos os exemplares, os valores teóricos de resistência à força cortante foram superiores quando o preenchimento de alvéolos foi realizado após a liberação da protensão, ou seja, preenchimento em obra. Entretanto, ao analisar os valores experimentais observou-se que exemplares com 02 alvéolos preenchidos resultam em valores superiores de resistência ao esforço cortante, quando dispõem de preenchimento de alvéolos realizado antes da liberação da proteção na pista de concretagem. Exemplares com 04 alvéolos preenchidos resultam em valores superiores de resistência ao esforço cortante, quando submetidos ao procedimento de preenchimento de alvéolos após a liberação da proteção na pista de concretagem.

Observa-se para todos os ensaios realizados houve uma porcentagem excedente de resistência ao esforço cortante em relação aos valores teóricos, garantindo a segurança dos cálculos estruturais e indicando a necessidade de maior investigação e ajuste do fator de contribuição do preenchimento de alvéolos visando a otimização do produto.

Os ensaios propostos para serem realizados em ambiente fabril mostraram-se viáveis e factíveis, contudo há padrões mínimos de qualidade e exigência dos métodos de ensaio a serem cumpridos.

Finalmente, esta pesquisa propôs um programa experimental onde foram atingidos os objetivos de modo satisfatório. O trabalho confirma a necessidade de mais estudos sobre o tema, visando preencher as lacunas geradas a respeito de temas não abordados.

5.3 Proposta de trabalhos futuros

Como proposta de trabalhos futuros, pode-se propor:

- i. Ensaio para se avaliar a contribuição do preenchimento do alvéolo;
- ii. Avaliar a aderência do concreto de preenchimento com a superfície do alvéolo da laje;
- iii. Propor modelos de ensaio para implementar em outras fábricas, contemplando equipamentos para melhor aferição dos resultados;
- iv. Realizar uma campanha de ensaios semelhante a esta, porém com uma maior quantidade de réplicas, para se ter melhor avaliação do desvio padrão dos resultados.

ANTUNES, C. de F.M., Resistência ao cisalhamento de lajes alveolares preenchidas: uma análise exploratória. Dissertação de mestrado, UFG, 2011.

ARAUJO, C.A.M.; Contribuições para projetos de lajes alveolares protendidas. Florianópolis. 2011

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: cimento portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: argamassas e concretos - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023. Informação e documentação: referências – elaboração. Rio de Janeiro. 2002. 24p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062 Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado. Rio de Janeiro. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14861 Laje pré-fabricada – Painel alveolar de concreto protendido – Requisitos. Rio de Janeiro. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6118: 2003 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.

ASSOCIATION OF MANUFACTURERS OF PRESTRESSED HOLLOW CORE FLOORS – ASSAP – Manual ASSAP - The hollow core floor – Design and applications. Verona, Italy, 2002.

Comité Européen de Normalisation – CEN. EN1168:2005. Precast concrete products – Hollow core slabs (English version), Brussel: CEN.2005.

CANADIAN PRESTRESSED PRECAST CONCRETE STRUCTURES – CPCI. Prestressed concrete in Canada. A short history – 1952 to 2000. Disponível em: <www.cpci.ca/?sc=history&pn=prestressedincanada>. Acesso em 13 de abril de 2014.

CARVALHO, R.C.; Concreto Protendido. Notas de Aula. 2009.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R., Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2003; - 3.ed. - São Carlos:

EdUFSCar, 2007.

CATOIA, B. Lajes Alveolares Protendidas: Cisalhamento em Região Fissurada por Flexão. Tese de Doutorado, EESC-USP, 2011.

COSTA, O.O.; Avaliação de desempenho de elementos de lajes alveolares protendidos pré-fabricados. Dissertação de mestrado, UFSCar, 2010.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON – CEB-FIP – Model Code, 1990.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – CEN. EN 1168:2005 – Precast concrete products – Hollow core slabs. (English version) Brussels: CEN, 2005.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – CEN. EN 1192:2004 – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. (English version) Brussels: CEN, 2004.

COSTA. O. O., CARVALHO, R.C., ALMEIDA FILHO, F. M. e FERREIRA, M. A. Avaliação experimental de lajes alveolares em concreto protendido. Concreto & Construções, IBRACON, Ano XXXIX, nº 64, pág. 71 à 77, Out-Nov-Dez-2011..

DUPAS, M. A. Pesquisando e Normalizando: Noções Básicas e Recomendações Úteis para Elaboração de Trabalhos Científicos, EdUFSCar, 2004, 71p. (serieapontamentos).

EL DEBS, M. K. Concreto pré-moldado: Fundamentos e aplicações. São Carlos: EESC-USP, 2000.

ELEMATIC – Extruder E9 – Product Description. Disponível em: <http://www.precastfountain.com/precast_machinery/extruder-1>. Acesso em 13 de abril de 2014.

ELLIOTT, K. S., Precast Concrete Structures. Oxford: Elsevier, 2002.

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

FERNANDES, N.S; Cisalhamento em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido, ensaio padrão de apoio para controle de qualidade. Dissertação de mestrado, UFSCar, 2010.

FRANÇA, A.A.V; Estudo Das Lajes Alveolares Pré-Fabricadas Em Concreto Protendido Submetidas A Ensaio De Cisalhamento. Dissertação de mestrado, UFPR, 2012.

FERREIRA, M. A., Manual de sistemas pré-fabricados de concreto (tradução). Autor do texto original: Arnold Van Acker (FIP-2002). Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto – ABCIC, São Paulo, 2003.

GUIDE OF GOOD PRACTICE – BULLETIN 6 FIB. Special desing considerations for precast prestresses hollow core floors – 174pág. Switzerland, 2000.

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,

Vol. 22, pág. 1708-1722, 2008.

JUNG, S.; KIM K.S. Knowledge-based prediction of shear strength of concrete beams without shear reinforcement. *Engineering Structures*, Volume 30, Issue 6, p. 1515-1525, jun. 2008.

LACERDA, I. G. Diretrizes para a reutilização de ancoragem ativa em lajes de edificações verticais de múltiplo uso e/ou pisos industriais protendidos. Dissertação de mestrado, PPGCC, UFPR, 2007.

MARTI, P. Application of Plastic Analysis to Shear Design of Reinforced Concrete Members. Lecture notes for a visit to Japan, sponsored by the Building Research Institute, Ministry of Constructions, Japan, 1987.

MANSELL, J.; COSTA, M.; ARRUDA, M. E.; BOUVIER, M. Notas de aula da Disciplina Tecnologia da Edificação I, 2010.

MELO, C. E. E. Manual Munte de projeto em pré-fabricados de concreto. São Paulo: Pini, 2004.

PINHEIRO, G.L., FERREIRA, M.A., ALMEIDA FILHO, F. M. e CARVALHO, R.C. Estudo preliminar sobre a influência do preenchimento dos alvéolos na resistência à força cortante em lajes alveolares protendidas pré-fabricadas. 3º PPP, 2013, 10 pág, 2013.

PETRUCELLI, N.S. Considerações sobre projeto e fabricação de lajes alveolares protendidas. Dissertação de Mestrado, UFSCar, 2009.

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE (PCI) Manual for the design of hollow core slabs. Second Edition, Chicago, Illinois, 1998.

REVEL, M. La prefabricacion em la construccion .1973.

RIBEIRO, J. L. D e CATEN, C. Projeto de Experimentos. Série Monográfica Qualidade, Porto Alegre, 2003.

ROBSON, C. Real World Research. 2nd Ed. Blackwell Publishing, 2002.

SANTOS, D. Análise de vigas de concreto armado utilizando modelos de bielas e tirantes. Dissertação de mestrado, EESC-USP, 2006.

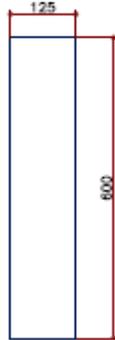
SERRA, S.M.B. ; FERREIRA, M.de A.; PIGOZZO, B. N., Evolução dos Pré-Fabricados de Concreto. 2010.

SILVA, R.C. e GIONGO, J.S. Modelos de Bielas e Tirantes Aplicados a Estruturas de Concreto Armado. São Carlos: EESC-USP, 2000.

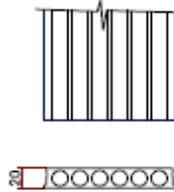
ANEXO I

PROJETO 01: ENSAIO PINHEIRO,G.L. - Projetista: Marcia Makiyama

LA001-LP20(01x)
VOL:0,810m3(2,025ton)



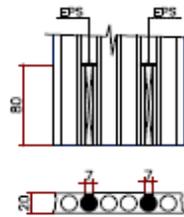
DETALHE 01



LA002-LP20(01x)
VOL:0,810m3(2,025ton)



DETALHE 01



NOTAS:

fck do concreto = 35MPa
fck de desprotensão = 21MPa
cobrimento mínimo da armadura = 2,5cm
fator $a/e < 0,45$

Preenchimento:

- LA002 fck = 35MPa / na pista
- LA003 fck = 35MPa / na obra
- LA004 fck = 45MPa / na pista
- LA005 fck = 45MPa / na obra

Obs.:

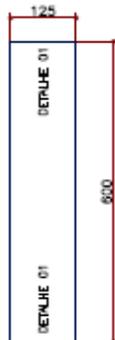
- LA001 sem preenchimento

ARMADURA PARA AS LAJES LP20

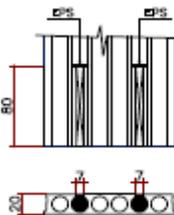


Contra-Flecha esperada = 06mm
Contra-Flecha máx. admissível = 19mm

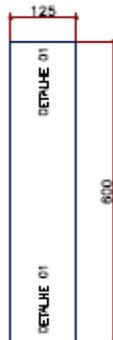
LA003-LP20(01x)
VOL:0,810m3(2,025ton)



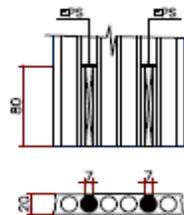
DETALHE 01



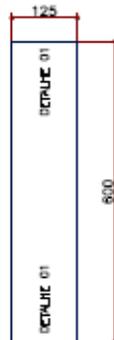
LA004-LP20(01x)
VOL:0,810m3(2,025ton)



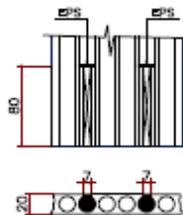
DETALHE 01



LA005-LP20(01x)
VOL:0,810m3(2,025ton)

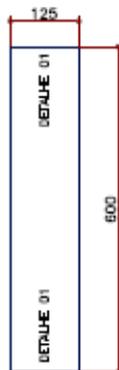


DETALHE 01

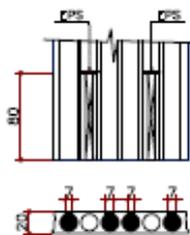


PROJETO 02: ENSAIO PINHEIRO,G.L. – Projetista: Marcia Makiyama

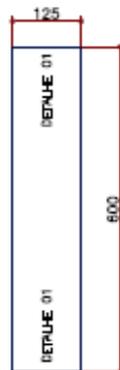
LA006-LP20(01x)
VOL:0,810m3(2,025ton)



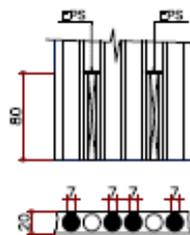
DETALHE 01



LA007-LP20(01x)
VOL:0,810m3(2,025ton)



DETALHE 01



NOTAS:

feq do concreto = 35MPa
feq de desprotensão = 21MPa
cobrimento mínimo da armadura = 2,5cm
fator a/c < 0,45

Preenchimento:

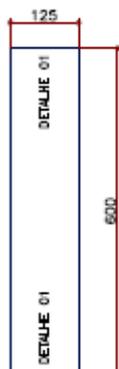
- LA006 feq = 35MPa / na pista
- LA007 feq = 35MPa / na obra
- LA008 feq = 45MPa / na pista
- LA009 feq = 45MPa / na obra

ARMADURA PARA AS LAJES LP20

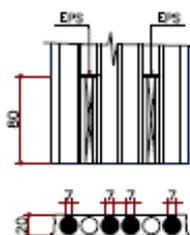


Contra-Flecha esperada = 06mm
Contra-Flecha máx. admissível = 19mm

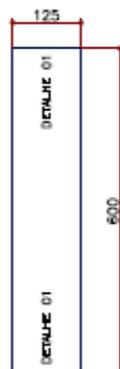
LA008-LP20(01x)
VOL:0,810m3(2,025ton)



DETALHE 01



LA009-LP20(01x)
VOL:0,810m3(2,025ton)



DETALHE 01

