

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**“AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ELEMENTOS DE
LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS PRÉ-FABRICADAS”**

OLIVIA OLIVEIRA DA COSTA

SÃO CARLOS

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**“AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ELEMENTOS DE
LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS PRÉ-FABRICADAS”**

Olivia Oliveira da Costa

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

Linha de Pesquisa:

Sistemas Construtivos de Edificações

Orientador:

Marcelo de Araujo Ferreira

São Carlos
2009

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

C837ad

Costa, Olivia Oliveira da.

Avaliação de desempenho de elementos de lajes
alveolares protendidas pré-fabricadas / Olivia Oliveira da
Costa. -- São Carlos : UFSCar, 2010.
132 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São
Carlos, 2009.

1. Concreto pré-moldado. 2. Lajes alveolares. 3. Concreto
protendido. 4. Qualidade dos produtos. I. Título.

CDD: 624.183414 (20^a)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil
Programa de Pós-Graduação em Construção Civil
Via Washington Luís, Km 235 - CEP: 13.565-905 - São Carlos/SP/Brasil
Fone(16) 3351-8261
Site: www.ppgciv.ufscar.br Email: ppgciv@power.ufscar.br

**“AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ELEMENTOS DE LAJES ALVEOLARES
PROTENDIDAS PRÉ-FABRICADAS”**

OLÍVIA OLIVEIRA DA COSTA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 30 de novembro de 2009

Banca Examinadora constituída pelos membros:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Roberto Chust Carvalho', written over a horizontal line.

Prof. Dr. Roberto Chust Carvalho
Departamento de Engenharia Civil / PPGCIV / UFSCar

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Libânio Miranda Pinheiro', written over a horizontal line.

Prof. Dr. Libânio Miranda Pinheiro
Departamento de Engenharia de Estruturas / EESC / USP
Examinador Externo

A large, stylized handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line.

Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho
Departamento de Engenharia Civil / PPGCIV / UFSCar
Examinador Interno

Dedicatória:

À minha mãe Maria Eneide e a minha irmã, Lorena.

Aos professores Marcelo de Araujo Ferreira e Roberto Chust Carvalho.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Marcelo de Araujo Ferreira pela orientação, amizade, grande dedicação e paciência durante todo o andamento do mestrado.

Ao professor Roberto Chust Carvalho pela amizade, discussões, conversas, idéias e paciência durante a realização deste trabalho.

Ao prof. Guilherme Aris Parsekian pelas contribuições valiosas durante o Exame de Qualificação.

Ao prof. Libânio Miranda Pinheiro por pelas valiosas contribuições na banca de defesa.

Ao Eng. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho pelas sugestões e ajuda na realização deste trabalho.

À Capes pelo apoio financeiro concedido.

À Associação Brasileira de Construção Industrializada (ABCIC) pela concessão de bolsa no período em que estive sem. Às empresas associadas à ABCIC por terem cedido a utilização dos resultados dos ensaios realizados.

Aos professores do departamento de Engenharia Civil da UFSCar que me auxiliaram na minha longa caminhada de formação profissional, durante a graduação e depois no mestrado.

Aos colegas do PPGCiv, especialmente a Nathalia de Paula, Natalia S. Petrucelli e Adriana C. Boni, Edgar P. de Oliveira.

Aos colegas do laboratório do NETPRE, Bruna Catoia, Altibano Ortenzi Jr, Renata, Carolina A. Camillo, Matheus L. G. Marquesi e Luís A. Bacheга, e pelas horas de descontração, porque afinal NETPRE não é só ensaio de lajes alveolares.

Aos meus amigos da graduação Tatiana S. Imoto, Vitor S. M. Rossiti, Adhemar Watanuki, Daiana S. dos Santos, Flávio K. Nakaoka, Cássia de A. R. J. Faleiros e José Herbet Faleiros Junior e Olívia P. Mendonça, pela amizade.

Às minhas amigas, Ariane Camargo, Belenice Toma, Maria Claudia B. Pizzi, Miriam C. Toyama e Maria Cristina F. Duarte.

À Dhyneh, por ser uma gata muito inteligente .

A meus pais, por terem me dado o suporte necessário para estudar e seguir o meu caminho, especialmente a minha mãe pela dedicação e carinho. À minha família, avós, tios e primos, que apesar de estarem distantes terá sempre um espaço no meu coração.

À minha irmã Lorena Carla Oliveira da Costa, por sempre se preocupar comigo e sempre me dar uma palavra de ânimo nos momentos mais difíceis.

Às pessoas maravilhosas que Deus colocou em meu caminho durante minha trajetória que por ventura acabei esquecendo-me de citar.

À Deus, pelas oportunidades que surgiram na minha vida e por estar sempre presente em nossas vidas.

O SENHOR é o meu pastor; nada me faltará.
Ele me faz repousar em pastos verdejantes.
Leva-me para junto das águas de descanso;
Refrigera-me a alma. Guia-me pelas veredas
da justiça por amor do seu nome. Ainda que
eu ande pelo vale da sombra da morte, não
temerei mal nenhum, porque tu estás comigo;
o teu bordão e o teu cajado me consolam.
Preparas-me uma mesa na presença dos meus
adversários, unges-me a cabeça com óleo; o meu
cálice transborda. Bondade e misericórdia
certamente me seguirão todos os dias da
minha vida; e habitarei na Casa do SENHOR
para todo o sempre.

Salmo 23

RESUMO

O emprego de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas para piso está se tornando cada vez mais corrente no Brasil. Com montagem rápida e preço competitivo, esta solução proporciona uma seção eficiente dada à redução do peso próprio por meio dos alvéolos vazados, mas também pela possibilidade de diminuição da altura da laje graças à aplicação da pré-tração. No Brasil, a NBR-9062:2006 que trata das estruturas pré-moldadas de concreto não apresenta critérios específicos para lajes alveolares. Já a NBR-14861:2002 é específica para lajes alveolares pré-fabricadas, mas aborda apenas aspectos gerais de produto. Em processo de revisão desde 2008, a nova versão da NBR-14861 deverá fornecer tanto critérios de projeto, quanto procedimentos para avaliação de desempenho e controle de qualidade para produto. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi investigar procedimentos de ensaios para a avaliação de desempenho de lajes alveolares, com base nas referências internacionais, que no caso são encontradas nos boletins técnicos da FIB (FIP-CEB) e na norma europeia EN-1168:2005, onde se procurou apresentar possíveis recomendações para adequações e aplicação destes procedimentos para a realidade brasileira. Neste estudo são abordadas metodologias experimentais para três finalidades distintas: a) Ensaios para pesquisa; b) Ensaios para avaliação do desempenho de produto; c) Ensaios para controle de qualidade de elementos de laje. Adicionalmente, são apresentados exemplos de aplicação destes procedimentos com base nos resultados de um programa experimental realizado pelo NETPRE-UFSCar, dentro da parceria tecnológica com fabricantes de lajes alveolares associados à ABCIC. São apresentados resultados de ensaios de cisalhamento e de flexão, onde foram avaliados elementos de laje sem capa, com capa, com e sem preenchimento de alvéolos. Adicionalmente, estes resultados foram validados com base na comparação com resultados obtidos por modelos teóricos. Quanto à padronização de procedimentos de ensaios, verificou-se que o procedimento de ensaio para esforço cortante é adequado para avaliar lajes produzidas no Brasil. Entretanto, o procedimento recomendado para ensaios de flexão, com a utilização de elementos curtos de lajes, mostrou-se inadequado devido à grande interação entre mecanismos de flexão e de cisalhamento. A partir de validação experimental, recomenda-se uma relação mínima entre o comprimento e altura da laje para garantir que o mecanismo crítico ocorra por flexão.

Palavras-chave: *Lajes Alveolares, Avaliação de Desempenho, Concreto Protendido, Concreto Pré-moldado, Ensaios Experimentais.*

ABSTRACT

Prestressed precast concrete hollow core slabs used as floor is becoming increasingly current in Brazil. Being quickly assembled and with competitive price, this solution provides an efficient section given by the reduction of self-weight through the use of cores, but also by the possibility of reducing the height of the slab due to the application of pre-tension. In Brazil, the NBR-9062: 2006 which deals with precast concrete structures does not provide specific criteria for hollow core slabs. Meanwhile the NBR-14861: 2002 is specific to precast hollow core slabs, but only deals with general aspects of the product. In revision process since 2008, the new version of the NBR-14861 should provide both design criteria, and procedures for performance assessment and quality control to the product. In this context, the aim of this research was to investigate test procedures for performance assessment of hollow core slabs, based on international literature reference, in which are found in the bulletins of the FIB (CEB-FIP) and the European standard EN-1168: 2005, which sought to present recommendations for possible adjustments and application of these procedures for the Brazilian reality. In this study, experimental methodologies are discussed for three different purposes: a) research testing; b) product performance assessment, c) quality control tests for slab elements. Additionally, it is shown examples of these procedures based on the results of an experimental program conducted by NETRE-UFSCar, in a technological partnership between hollow core slabs manufacturers affiliated with the Brazilian precast concrete association ABCIC. Results from shear and bending tests are shown, where it was evaluated elements of slabs without cover, with cover, and non-filled cores. Additionally, these results were validated based in a comparison between results obtained from theoretical models. As the standardization of testing procedures, it was found that the testing procedure for shear is appropriate to evaluate slabs produced in Brazil. However, the procedure recommended for bending tests, with the use of short elements of slabs, was inadequate due to the great interaction between mechanisms of bending and shear. From experimental validation, it is recommended a minimum ratio between the length and height of the slab to ensure that the critical mechanism occurs by bending.

Keywords: *Hollow Core Slabs, Performance Assessment, Prestressed Concrete, Precast Concrete, Load Tests.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1:	Detalhe da seção transversal.....	02
Figura 1.2:	Localização dos cortes na laje [NPCAA(2003)].....	03
Figura 1.3:	Uso de capa estrutural em concreto moldado in loco.....	04
Figura 1.4:	Variação da espessura da capa [NPCAA(2003)].....	04
Figura 1.5:	Recortes para a colocação de tirantes [NPCAA(2003)].....	04
Figura 1.6:	Exemplos de seções transversais dos elementos de laje alveolar.....	05
Figura 1.7:	Máquina utilizada na fabricação pelo método da forma deslizante [ECHO, 2008].....	06
Figura 1.8:	a) Máquina Extrusora b) Detalhe das hélices [EDEKLING et all (2006)].....	06
Figura 1.9:	Corte longitudinal da máquina extrusora [TKALČIĆ et all (2007)].....	07
Figura 2.1:	Elemento de concreto protendido submetido a flexão e cisalhamento. a) Fissuras na nervura devidas o cisalhamento; b) Fissuras de cisalhamento e flexão; c) Fissuras de flexão [RETTNE E EDEKLING (2006)].....	12
Figura 2.2:	Fissuras de tração que ocorrem na face superior da laje devidas à protensão.....	13
Figura 2.3:	Fissuras de flexão em elementos de laje alveolar.....	13
Figura 2.4:	Tensões normais e de cisalhamento em um elemento protendido, submetido a força cortante e momento fletor no Estado 1 (a) e Estado 2 (b) [ENGSTROM (2005)].....	14
Figura 2.5:	a) Possível localização do ponto crítico próximo a região afetada pela reação do apoio; b) Pontos e seções levadas em consideração nos cálculos [PAJARI (2005)].....	15
Figura 2.6:	Posição do ponto crítico em relação a linha neutra [YANG (1994)].....	15
Figura 2.7:	Situação em que $6,0 > a_v/d > 2,5$ [KONG & EVANS (2001)].....	16
Figura 2.8:	Combinação de fissuras de cisalhamento, com efeito da flexão e fendilhamento com falha de ancoragem em ensaio de cisalhamento, com $a_v/d=2,5$	17
Figura 2.9:	Situação em que $2,5 > a_v/d > 1,0$ [KONG E EVANS (2001)].....	18
Figura 2.10:	Interação de fissuras de cisalhamento com fissuras de flexão em ensaio de flexão de uma laje de 200 mm com três metros de vão.....	18

Figura 2.11:	Tensões geradas no concreto na região de introdução da protensão [ÅKESSON (1993)].....	20
Figura 2.12:	Fissuração longitudinal devida ao fendilhamento do concreto nas nervuras.....	20
Figura 2.13:	Alguns mecanismos de falha que podem acontecer em laje alveolar com a presença de capa. a) Falha por cisalhamento na interface; b) falha da nervura por tração devida ao cisalhamento; c) ruptura dos cabos [GIRHAMMAR E PAJARI (2008)].....	21
Figura 2.14:	Problemas relativos à construção das capas de concreto. a) Problemas globais; b) Problemas relativos à rugosidade da superfície [IBRAHIM et al. (2008)].....	22
Figura 2.15:	Condições da interface com diferentes tipos de preparação de superfície [IBRAHIM et al. (2008)].....	24
Figura 3.1:	Uso de paquímetro para retirada de medidas. a.) da nervura b.) da borda superior.....	29
Figura 3.2:	Uso de paquímetro para retirada de medidas. a) diâmetro do alvéolo b) altura da laje.....	29
Figura 3.3:	Medidas da cordoalha. a) afundamento das cordoalhas b)distância do centro da cordoalha até a borda inferior.....	29
Figura 3.4:	Uso de uma faixa de madeira na interface da laje e da viga metálica de apoio [VTT (2006)].....	32
Figura 3.5:	Uso de graxa no ensaio de cisalhamento: a) situação antes do ensaio; b) situação durante o ensaio.....	32
Figura 3.6:	Ensaio de cisalhamento. a) Vista geral do apoio móvel; b) detalhe de rolete [HERON (1983)].....	33
Figura 3.7:	Detalhe do material para regularizar a superfície da laje [FERNANDES (2007)].....	33
Figura 3.8:	Amostra para extração de corpos-de-prova. [FIP (1992)].....	35
Figura 3.9:	Equipamento para extração de testemunhos de concreto para laje alveolar.....	35
Figura 3.10:	Máquinas utilizadas em Ensaio de compactação de concreto com baixa trabalhabilidade [Invelop Oy, (2009)].....	36

Figura 3.11:	Testemunhos extraídos de uma faixa da laje, para a determinação da resistência do concreto [HERON (1983)].....	36
Figura 3.12:	Desenho representativo do setup de ensaio de cisalhamento:a) Vista lateral b) Vista frontal, Corte A-A.....	38
Figura 3.13:	: Possíveis arranjos para o ensaio [EN1168-2005].....	39
Figura 3.14:	Ensaio para determinação da resistência do concreto à tração na flexão e da tensão de protensão no aço [FIP (1992)].....	41
Figura 3.15:	Desenho representativo do setup de ensaio de flexão:a) Vista lateral b) Vista frontal.....	42
Figura 3.16:	Ensaio de flexão de uma laje de 6,5 m no Laboratório do NETPRE-UFSCar.....	42
Figura 3.17:	Ensaio de Interação de Cisalhamento e Flexão [FIP(1982)].....	43
Figura 3.18:	a) Esquema do ensaio com Interação de Cisalhamento e Flexão em lajes alveolares; b) Esquema da vista frontal.....	43
Figura 3.19:	Ensaio de Interação de Cisalhamento e Flexão realizado no Laboratório NETPRE-Ufscar.....	43
Figura 3.20:	Esquema de ensaio de flexão que serve para determinar a resistência à tração do concreto de uma laje alveolar.....	44
Figura 3.21:	Esquema de ensaio de cisalhamento utilizado para determinar a resistência à tração do concreto de uma laje alveolar.....	45
Figura 3.22:	Utilização de sensores LVDT para indicação da leitura da flecha durante o ensaio de flexão.....	46
Figura 4.1:	Comparação entre os valores teóricos e experimentais da Força Cortante das lajes do Lote A.....	56
Figura 4.2:	Ocorrência de fissuras na laje ensaiada ao cisalhamento: a)Abertura de fissura de cisalhamento com interação de flexão na lateral da laje; b) Abertura de fissuras na parte inferior da laje.....	57
Figura 4.3:	Comparação entre os valores teóricos e os experimentais da força cortante das lajes.....	57
Figura 4.4:	Abertura de fissuras durante o ensaio de cisalhamento: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista lateral - lado direito.....	58

Figura 4.5:	Comparação entre os valores teóricos e os experimentais da força cortante das lajes da empresa C.....	59
Figura 4.6:	Abertura de fissura da laje L02-20-SC-6_C: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista lateral - lado direito; c) Parte inferior da laje.....	59
Figura 4.7:	Abertura de fissura da laje L03-20-SC-6_C: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista lateral - lado direito; c) Parte inferior da laje.....	59
Figura 4.8:	Abertura de fissura da laje L04-20-SC-6_C: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista lateral - lado direito.....	60
Figura 4.9:	Abertura de fissura da laje L09-20-SC-7_C: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista lateral - lado direito; c) Abertura de fissura no alveolo; d) Vista superior da laje.....	60
Figura 4.10:	Abertura de fissura da laje L10-20-SC-7_C: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista Superior da laje, fissura longitudinal; c) Vista inferior da laje.....	60
Figura 4.11:	Abertura de fissura da laje L11-20-SC-7_C: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista lateral - lado direito; c) Vista inferior da laje.....	61
Figura 4.12:	Comparação entre os valores de cortante obtidos no ensaio e no cálculo teórico, para as diversas empresas (V_{exp}/V_{teor}).....	61
Figura 4.13:	Comparação entre os valores de momento fletor obtidos nos ensaios e no cálculo teórico, para o Lote A, com lajes ensaiadas com comprimento de 3m.....	62
Figura 4.14:	Ensaio de Flexão - Abertura de fissura para laje com vão de 3,0m: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista lateral - lado direito.....	62
Figura 4.15:	Comparação entre os valores de momento fletor obtidos no ensaio e no cálculo teórico, para o Lote A com laje ensaiada com comprimento de 6m.....	63
Figura 4.16:	Comparação entre os valores de momento fletor obtidos nos ensaios e nos cálculos teóricos para o Lote B, com laje ensaiada com comprimento de 6m, lajes com altura igual a 200 mm e 150 mm.....	64
Figura 4.17:	Configuração de fissuração da laje L14-20-SC-7_C: a) Aplicação de carga na laje a 5,75.h do apoio; b) Fissuração da parte lateral (lado direito); c) Fissuração da parte inferior da laje.....	65

Figura 4.18:	Comparação entre os valores do cortante obtidos nos ensaios e no cálculo teórico, para as lajes do Lote A, de altura de 20 cm e capa de 5 cm.....	67
Figura 4.19:	Abertura de fissura da laje da Lote A: a) Vista lateral; b) Vista inferior.....	67
Figura 4.20:	Comparação entre os valores do cortante obtido no ensaio e no cálculo teórico, para a laje do Lote B, de altura de 20 cm e capa de 5 cm.....	68
Figura 4.21:	Configuração de fissuração da laje L06-20-CC-8_B. a) Fissuração na parte lateral; b) Fissuração da parte inferior; c) Vista frontal.....	69
Figura 4.22:	Comparação entre os valores de força cortante obtidos nos ensaios e nos cálculos teóricos para o Lote A, com lajes ensaiadas com comprimento de 6m , altura de 20 cm e capa de 5 cm.....	69
Figura 4.23:	Configuração da fissuração da laje L17-CC-7_C: a) Fissuração da lateral da laje (lado esquerdo); c) Fissuração da lateral da laje (lado direito); d) Fissuração da parte inferior da laje; e) Descolamento da capa.....	70
Figura 4.24:	Fissuração da laje L18-CC-6_C.....	70
Figura 4.25:	Comparação entre os valores de momento fletor obtidos no ensaio e no cálculo teórico para o Lote A, com lajes ensaiadas com comprimento de 3m, altura de 20 cm e capa de 5 cm.....	71
Figura 4.26:	Configuração de fissuração para laje de 3,0m de vão, submetida a ensaio de flexão: a) Fissuração da lateral esquerda; b) Fissuração da lateral direita da laje.....	72
Figura 4.27:	Comparação entre os valores de momento fletor obtidos nos ensaios e no cálculo teórico para o Lote A, com lajes ensaiadas com comprimento de 6m.....	72
Figura 4.28:	Configuração de fissuração da laje L12-20-SC-8_B: a) Vista lateral da região central da laje; b) Vista da superfície inferior da laje.....	73
Figura 4.29:	Configuração de fissuração da laje L14-20-CC-8_B: a) Vista lateral da laje;b) e c) Descolamento da capa nos apoios.....	73
Figura 4.30:	Esquema de ensaio à flexão usado para a determinação da resistência característica à tração do concreto de laje ensaiada.....	74

Figura 4.31:	Esquema de ensaio a flexão usado para a determinação da resistência característica à tração do concreto de laje ensaiada.....	76
Figura 4.32:	Gráfico de Força no Atuador versus Flecha - Esquema de ensaio.....	78
Figura 4.33:	Comparação entre os resultados experimentais e os teóricos para as lajes do Lote C, relativos ao ensaio de cisalhamento.....	79
Figura 4.34:	Configuração de fissuração da laje L01-SC-AP-6_C: a) e b) Fissuração da parte lateral (lado esquerdo); c) Fissuração da parte inferior da laje.....	80
Figura 4.35 :	Configuração de fissuração da laje L05-SC-AP-6_C: a) Fissuração da parte lateral (lado esquerdo); b) Fissuração da parte lateral (lado direito); c) Fissuração da parte superior da laje; d) Fissuração próxima a cordoalha de protensão.....	80
Figura 4.36:	Configuração de fissuração da laje L06-SC-AP-6_C: a) Fissuração da parte lateral (lado esquerdo); b) Fissuração da parte lateral (lado direito); c) Fissuração da parte superior da laje.....	80
Figura 4.37:	Configuração de fissuração da laje L08-SC-AP-7_C: a) Laje com dois alvéolos preenchidos; b) Fissuração da lateral da laje (lado esquerdo); c) Fissuração da lateral da laje (lado direito); d) e e) Laje após sua ruptura; f) Detalhe da fissuração ao redor das cordoalhas de protensão.....	81
Figura 4.38:	Configuração da fissuração da laje L12-SC-AP-7_C: a) Fissuração da lateral da laje (lado esquerdo); b) Fissuração da parte superior da laje; c) Fissuração da parte inferior da laje; d) Rompimento da parte superior da laje, junto ao alvéolo de extremidade.....	81
Figura 4.39:	Comparação entre os resultados experimentais e teóricos para as lajes do Lote A, relativos ao ensaio de cisalhamento.....	82
Figura 4.40:	Falha por torção em nervura da extremidade (dois alvéolos preenchidos).....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Ilustração de possíveis imperfeições nas superfícies da Laje Alveolar [FIB (2007); PCI (1983)].....	30
Tabela 4.1:	Comparação entre os resultados experimentais e os teóricos para as lajes do Lote A obtidos nos ensaios de cisalhamento.....	56
Tabela 4.2:	Comparação entre os resultados experimentais e teóricos para as lajes do Lote B obtidos no ensaio de cisalhamento.....	57
Tabela 4.3:	Comparação entre os resultados experimentais e os teóricos para as lajes do Lote C, relativos ao ensaio de cisalhamento.....	58
Tabela 4.4:	Comparação entre os resultados experimentais e teóricos para as lajes do Lote A, obtidos no ensaio de flexão realizado com peças com 3,0m de comprimento.....	62
Tabela 4.5:	Comparação entre os resultados experimentais e teóricos para as lajes do Lote A, obtidos no ensaio de flexão realizado com peças com 6,0m de comprimento.....	63
Tabela 4.6:	Comparação entre os resultados experimentais e teóricos para as lajes do Lote A, obtidos no ensaio de flexão realizado com peças com 6,0m de comprimento.....	64
Tabela 4.7:	Comparação entre os resultados experimentais e os teóricos para as lajes do Lote C, para análise de flexão e cisalhamento (comprimento de 4,65 m).....	65
Tabela 4.8:	Comparação entre os resultados experimentais e teóricos para as lajes do Lote A, relativos ao ensaio de cisalhamento.....	66
Tabela 4.9:	Comparação entre os resultado experimental e o teórico para a laje do Lote B, relativos ao ensaio de cisalhamento.....	68
Tabela 4.10:	Comparação entre os resultados experimentais e os teóricos para as lajes do Lote C, relativos ao ensaio de cisalhamento.....	69
Tabela 4.11:	Comparação entre os resultados experimentais e os teóricos para as lajes do Lote A, relativos ao ensaio de flexão realizado com peças com 3,0m de comprimento.....	71

Tabela 4.12:	Comparação entre os resultados experimentais e os teóricos para as lajes do Lote B, relativos ao ensaio de flexão realizado com peças com 3,0m de comprimento.....	72
Tabela 4.13:	Resultados experimentais e teóricos para as lajes do lote C ensaiadas ao cisalhamento.....	79
Tabela 4.14:	Resultados experimentais e teóricos para as lajes do Lote A ensaiadas ao cisalhamento.....	82

LISTA DE SÍMBOLOS

a_v	- Distância do apoio até o ponto de aplicação da carga concentrada
A_{SI}	- Área da armadura de tração
A_{TOT}	- Área total da laje considerando capa e alvéolos preenchidos, quando houver
b	- Largura da laje
b_w	- Largura mínima da seção ao longo da altura útil d
d	- Altura efetiva da seção transversal da laje
d'	- Distância entre o centro das cordoalhas e a face inferior da laje;
f_{ctm}	- Valores teóricos de tração do concreto para efeito de cálculo
$f_{ctm, exp}$	- Valores obtidos pelos ensaios de tração por compressão diametral do corpo de prova
h	- Altura da laje
H_{LA}	- Altura da laje
H_{TOT}	- Altura total considerando laje e capa, quando houver
I_{TOT}	- Momento de inércia total da laje, considerando capa e alvéolos preenchidos, quando houver;
L	- Comprimento da laje
N_{Sd}	- Força longitudinal na seção devida à protensão ou carregamento (compressão positiva)
M_r	- Momento de fissuração teórico, já descontado o momento devido ao peso próprio
$M_{r,exp}$	- Momento de fissuração obtido experimentalmente
M_R	- Momento resistente, sem coeficientes de ponderação dos materiais, já descontado o peso próprio
M_u	- Momento último obtido experimentalmente
V_{Rd}	- Resistência última de cálculo, com coeficientes de segurança aplicados
$V_{S,max}$	- Reação máxima admitida para situações de serviço
V_{Rk}	- Resistência última característica, calculada sem considerar coeficientes de majoração
$V_{u,exp}$	- Carga de ruptura obtida experimentalmente
ϕ_{alv}	- Diâmetro dos alvéolos
ϕ	- Diâmetro da cordoalha

- Σb_w - Soma das nervuras da laje;
- τ_{Rd} - Tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	01
1.1	Objetivo de Estudo.....	07
1.2	Metodologia.....	07
1.3	Justificativas.....	08
1.4	Apresentação do trabalho.....	09
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
2.1	Considerações Gerais.....	10
2.2	Mecanismos de Ruptura.....	11
2.3	Lajes com capa de concreto moldado no local.....	20
3	PROCEDIMENTOS PARA ENSAIOS DE LAJES ALVEOLARES.....	25
3.1	Diretrizes Normativas para Realização de Ensaios.....	26
3.1.1	Ensaios com Propósitos de Pesquisa e Desenvolvimento.....	27
3.1.2	Ensaios para Avaliação de Desempenho.....	27
3.1.3	Ensaios para Controle da Qualidade.....	28
3.2	Procedimentos para Registro dos Ensaios.....	28
3.2.1	Medidas Preliminares.....	28
3.2.2	Registro dos Ensaios.....	31
3.3	Recomendações para Aplicação dos Carregamentos.....	31
3.4	Condições de apoio para os diversos ensaios.....	32
3.5	Caracterização das propriedades mecânicas dos materiais empregados na confeção das lajes.....	34
3.5.1	Controle de Qualidade do Aço.....	34
3.5.2	Controle de Qualidade do Concreto.....	34
3.6	Ensaios de Cisalhamento.....	37
3.7	Interpretação dos resultados do ensaio de cisalhamento.....	39
3.8	Ensaios de Flexão.....	40
3.9	Ensaio com Interação de Cisalhamento e Flexão.....	42
3.10	Procedimentos para avaliação das resistências à tração e do módulo de elasticidade.....	44
3.10.1	Avaliação de f_{ctm} a partir do momento de fissuração experimental.....	44
3.10.2	Verificação de f_{ctk} a partir da resistência ao cisalhamento experimental.....	45

3.10.3	Avaliação de $E_{c,ef}$ a partir da flecha experimental.....	46
3.11	Comparação dos resultados experimentais com cálculos teóricos.....	47
3.11.1	Resistência ao Cisalhamento.....	47
3.11.2	Resistência à Flexão.....	49
3.12	Procedimento para fazer análise dos resultados.....	50
3.12.1	Capacidade resistente ao cisalhamento.....	50
3.12.2	Capacidade ao Momento Fletor.....	50
3.12.3	Momento de fissuração.....	51
4	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS LAJES.....	52
4.1	Exemplo 1 – Avaliação de desempenho em lajes sem capa ($h = 200$ mm e $h=150$ mm) para flexão e cisalhamento.....	53
4.1.1	Ensaio de cisalhamento.....	54
4.1.2	Ensaio de flexão do Lote A, com comprimentos $L = 3$ m e $L = 6$ m, e do Lote B, com comprimento $L=6,4$ m.....	61
4.1.3	Ensaio de Interação Flexão-Cisalhamento ($a_v = 5,75$ h).....	64
4.2	Exemplo 2 – Avaliação de desempenho em lajes com capa para flexão e cisalhamento ($h=200$ mm + 50 mm de capa, onde h é a altura da laje).....	65
4.2.1	Ensaio de Cisalhamento ($a_v = 2,5$ h).....	65
4.2.2	Ensaio de flexão para lajes com capa.....	70
4.3	Exemplo 3 - Verificação dos Valores Característicos em Lajes sem Capa.....	73
4.3.1	Determinação de f_{ctm} a partir do momento de fissuração experimental: ($h=200$ mm).....	74
4.3.2	Exemplo 3.2 - Determinação de f_{ctk} a partir da resistência experimental ao cisalhamento: ($h=200$ mm).....	75
4.3.3	Estimativa do E_c a partir das medidas de flecha em ensaio de flexão.....	77
4.4	Exemplo 4 – Avaliação de Desempenho em Lajes com preenchimento de 2 alvéolos.....	78
4.4.1	Preenchimento de alvéolos com concreto simples.....	78
4.4.2	Preenchimento de alvéolos com concreto reforçado com fibras metálicas.....	81
5	CONCLUSÕES.....	83
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	88
5.2	Considerações Finais.....	88
	REFERÊNCIAS.....	90
	ANEXO A.....	93

ANEXO B..... 99

ANEXO C..... 122

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

As lajes alveolares protendidas pré-fabricadas representam uma das soluções estruturais mais avançadas para sistemas de piso, podendo ser utilizadas em todo tipo de construção. As primeiras lajes alveolares surgiram ainda nos anos 50 e, portanto, a sua tecnologia de produção atual é bastante desenvolvida e consolidada. Apesar do alto custo inicial do maquinário, a produção é praticamente automatizada com grande produtividade. Desta forma, havendo demanda de mercado, este tipo de produto se apresenta bastante competitivo devido à sua racionalização de materiais, com redução considerável de concreto e de aço, e também pela grande economia nas formas, ausência de escoramento e velocidade na montagem.

Este tipo de laje pode ser empregado em diversos sistemas estruturais: concreto pré-moldado, concreto moldado in-loco, estrutura metálica, alvenaria estrutural. Por esta razão, o uso das lajes alveolares como soluções para pisos em construções mistas têm aumentado consideravelmente em todos os continentes, começando por Europa e EUA, indo até países asiáticos e africanos. No Brasil, esta tecnologia passou a ser empregada na década de 80 e teve a sua consolidação a partir do início do século XXI, acompanhando o maior aumento das estruturas pré-moldadas no Brasil.

A norma de estruturas pré-moldadas de concreto no Brasil, a NBR-9062:2006, estabelece, para algumas situações específicas, que parte do procedimento de projeto pode ser executado baseando-se em verificações experimentais. Segundo esta norma, podem ser realizados os seguintes ensaios: a) para estabelecer diretamente a resistência última ou o comportamento em serviço de elementos estruturais; b) para obter propriedades específicas de materiais; para teste de novos materiais ou produtos; c) para reduzir incertezas de parâmetros de carga ou de modelos de resistência. Entretanto, não existem na NBR-9062:2006 critérios ou procedimentos específicos para lajes alveolares. A NBR-14861:2002, que é uma norma específica para painéis alveolares protendidos, indica as condições para o recebimento e

utilização de lajes alveolares, mas não possui recomendações para procedimentos de projeto ou mesmo para a realização de ensaios para controle de qualidade e avaliação de desempenho deste produto. Por esta razão, tem-se a importância dos estudos dirigidos para os procedimentos de ensaios de lajes alveolares visando a avaliação de desempenho destes elementos. Sem este conhecimento, não se pode falar em certificação de produto ou em controle da qualidade do produto. Portanto, a presente pesquisa é relevante, no momento em que a NBR-14861:2002 está em fase de revisão e que existe um interesse muito forte por parte dos fabricantes de lajes alveolares em que sejam definidos parâmetros para que se possa desenvolver um futuro programa de certificação das lajes alveolares no Brasil.

O Manual de Controle de Qualidade de Lajes Alveolares da FIP (1992) possui indicações para a realização de ensaios de controle de qualidade e de prova de carga, assim como a EN 1168/2005, que também possui recomendações e procedimentos de cálculo.

É necessário definir ensaios para certificar o produto laje alveolar. Existem selos que certificam os métodos de produção, como é o caso do Selo de Qualidade da ABCIC. É importante que também seja avaliado o desempenho dessas peças e que ocorra verificação do projeto a partir de ensaios.

As lajes alveolares pré-moldadas protendidas surgiram da necessidade de se reduzir o peso próprio do elemento e dessa forma, conseqüentemente, reduzir o custo de fabricação e o preço de venda, permitindo seu uso em grandes vãos. O seu baixo peso próprio é devido ao uso de vazios ou alvéolos na seção transversal do elemento de laje, como visto na Figura 1.1.

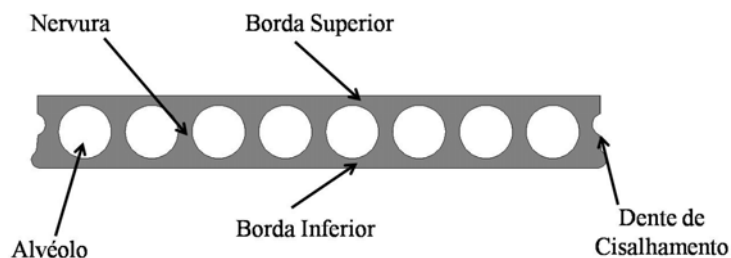


Figura 1.1: Detalhe da seção transversal.

O uso de lajes alveolares como pavimento está sendo amplamente utilizado na construção tanto de edifícios comerciais como industriais e habitacionais. São, geralmente, apoiadas em vigas de concreto pré-moldadas, mas também podem ser apoiadas em paredes estruturais ou vigas metálicas (neste caso, quando há dois materiais diferentes, a estrutura recebe o nome de estrutura mista).

Segundo Melo(2004), a ação estrutural das lajes alveolares é devida a sua padronização e racionalização do projeto. O fato de o produto ser industrializado e envolver um baixo número de horas/homem na sua produção aumenta a sua característica industrial-mecanizada e caso seja necessária intervenção manual, algum recorte ou reforços nos alvéolos da laje, este eleva bastante seu custo de produção. Na Figura 1.2, estão indicadas algumas opções de corte em lajes alveolares.

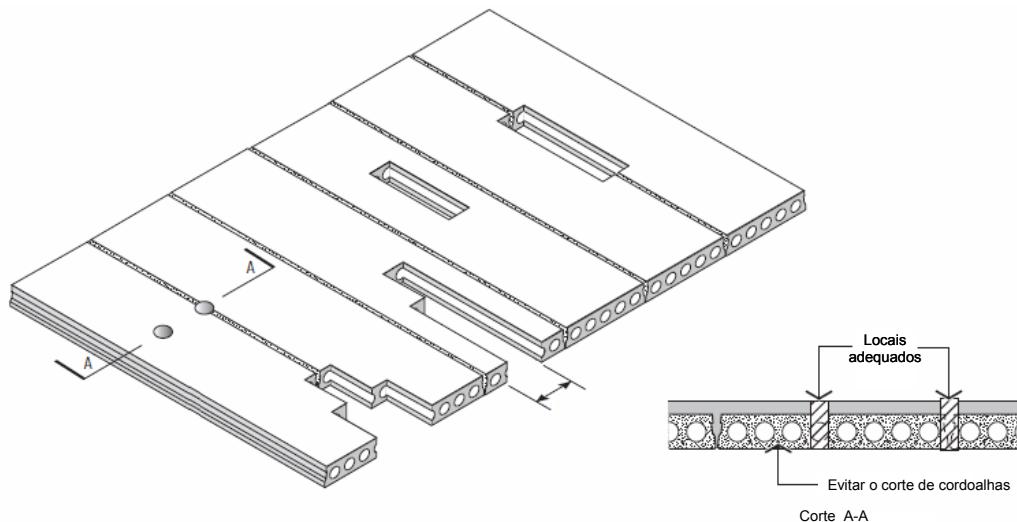


Figura 1.2: Localização dos cortes na laje [NPCAA(2003)].

Como pode ser visto em Folch (2008), um aspecto importante a ser considerado no projeto é a modulação, pois é este que define a viabilidade econômica do sistema. A laje é considerada inteira na hora de orçar o projeto. Assim haverá desperdícios se elas forem recortadas longitudinalmente para acertar a modulação. Por isso há necessidade de se prever a paginação do empreendimento para não causar prejuízos ao empreendedor, devendo este estudo ser realizado na fase de projeto.

As lajes alveolares possuem em torno de 1,20 m de largura, altura variando entre 0,15m e 0,40 m e são muito utilizados no Brasil vãos entre seis e 12 metros. De acordo com FIP (1992), podem suportar carregamento acidental maior que $30,0 \text{ kN/m}^2$. Pode ser utilizada com capa estrutural de concreto moldado in loco (Figura 1.3) com espessura média de 5,0 cm, pois esta pode variar de acordo com a contraflecha da laje (Figura 1.4). A capa tem finalidades de acabamento, mas também função estrutural. Como acabamento, sua função é garantir o nivelamento da superfície da laje e correção da contraflecha causada pela protensão. Sob o ponto de vista estrutural, a capa melhora o comportamento da seção, aumentando muito a inércia, e serve também para proporcionar um efeito de diafragma horizontal na estrutura,

permitindo a mobilização de todos os elementos para absorver as ações laterais de vento. No caso da estrutura utilizar peças de concreto pré-moldado com concreto moldado in loco, este sistema recebe o nome de estrutura composta.

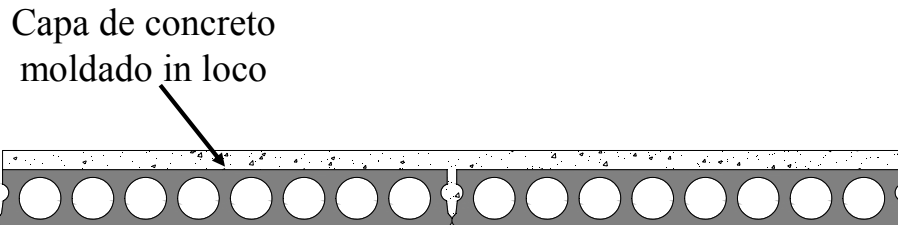


Figura 1.3: Uso de capa estrutural em concreto moldado in loco.

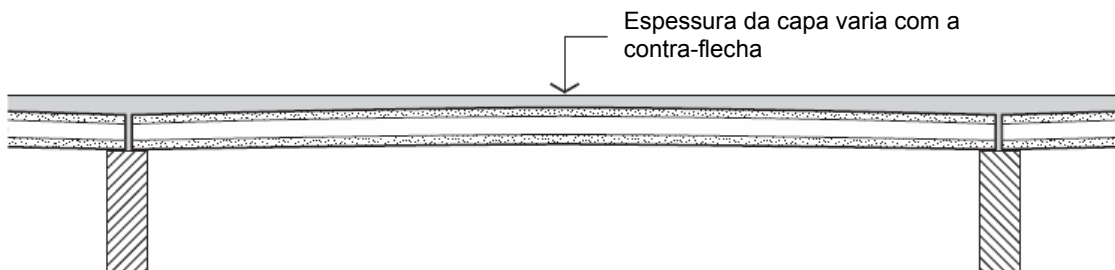


Figura 1.4: Variação da espessura da capa [NPCAA(2003)].

Para garantir a solidarização do piso são realizados recortes na laje e inseridos tirantes, como mostra a Figura 1.5.



Figura 1.5: Recortes para a colocação de tirantes [NPCAA(2003)].

Com relação às armaduras são utilizadas cordoalhas longitudinais protendidas e ancoradas por aderência na borda inferior da nervura. Caso a laje alveolar seja colocada em balanço deverão ser empregadas cordoalhas na borda superior da nervura. Em geral, não há o uso de estribos nas nervuras. Somente em casos extremos de laje com altura superior a 40 cm poderá ser necessário o uso.

Há no mercado inúmeras variações de seções transversais. Uma das principais características que diferem cada tipo são a altura, a largura, a quantidade de cordoalhas e o formato dos alvéolos. O formato do alvéolo é definido de acordo com o tipo de máquina utilizada no processo produtivo, podendo ser oval no caso de utilizar fôrma deslizante ou circular se utilizado uma extrusora, como mostrado na Figura 1.6.

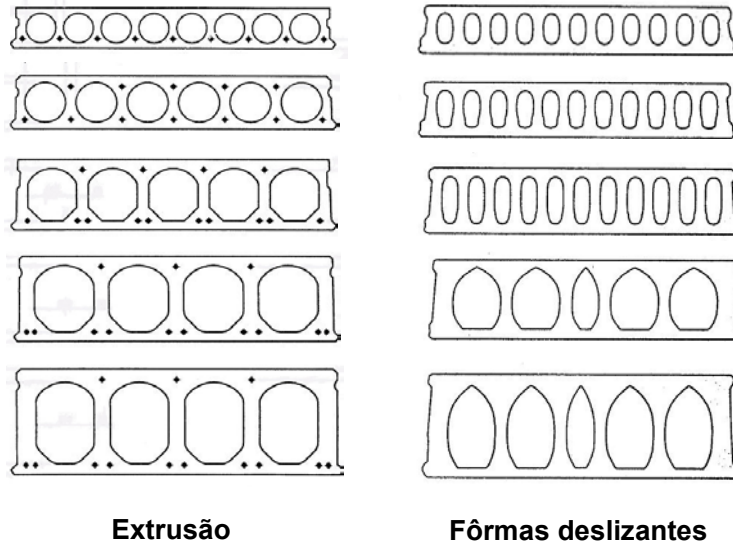


Figura 1.6: Exemplos de seções transversais dos elementos de laje alveolar.

As lajes alveolares são geralmente produzidas em pistas com comprimento de 150 m, podendo ser recortada no comprimento desejado de projeto. Existem dois métodos básicos de produção de lajes alveolares: fabricação por extrusão ou por fôrma deslizante. Na fôrma deslizante, a fabricação ocorre em várias camadas de concreto, ele é lançado e compactado pela máquina de produção em dois ou quatro estágios e a compactação é realizada externamente por vibradores. A Figura 1.7 mostra uma máquina utilizada nesse processo produtivo.



Figura 1.7: Máquina utilizada na fabricação pelo método da forma deslizante [Echo (2008)].

Na fabricação por extrusão, o concreto com slump baixo é empurrado para a pista pela máquina (Figura 1.8 a). Os alvéolos são formados pela compactação do concreto por tubos helicoidais, como mostrado na Figura 1.8 b. Neste método há apenas um estágio de lançamento e de compactação do concreto. Na Figura 1.9 tem-se o corte longitudinal da extrusora, que mostra o concreto lançado sendo moldado em apenas uma etapa.



a)



b)

Figura 1.8: a) Máquina Extrusora b) Detalhe das hélices [EDEKLING et all (2006)].

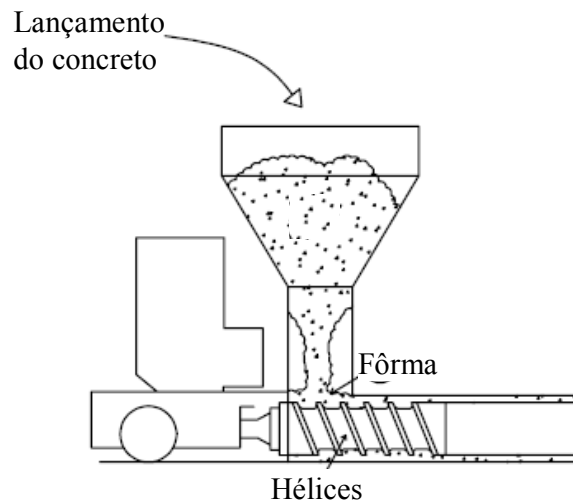


Figura 1.9: Corte longitudinal da máquina extrusora [TKALČIĆ et all (2007)].

De acordo com FIP (1992), as propriedades do concreto são diferentes em cada método. Para o método de extrusora, o fator água/cimento (a/c) é de 0,30 a 0,40. De qualquer modo, pode ser usada água adicional próximo às cordoalhas, dando um fator a/c próximo a 0,60. Conseqüentemente a alta resistência no concreto pode ser obtida, variando de 50 até 75 MPa. Para o método de fôrma deslizante, são utilizados fatores a/c mais altos e, por essa razão, as resistências no concreto são mais baixas.

1.1 Objetivo de Estudo

O objetivo deste trabalho é realizar uma investigação sobre os principais procedimentos de ensaios que podem ser utilizados para a avaliação de desempenho de lajes alveolares, com base nas recomendações dos manuais da FIB (FIP-CEB) e da norma européia para lajes alveolares EN-1168:2005, mas voltados para as tipologias de lajes brasileiras, com vistas à atual revisão da NBR-14861:2002.

1.2 Metodologia

Dentro da revisão bibliográfica realizada sobre o assunto, são abordadas investigações realizadas tanto para elementos isolados quanto para a avaliação do comportamento conjunto do pavimento. Entretanto, no tocante à sistematização do conhecimento sobre as recomendações de procedimentos para ensaios visando à avaliação de desempenho do produto

laje alveolar, são apresentados arranjos de ensaios de lajes isoladas, onde são discutidas metodologias experimentais empregadas para três finalidades distintas:

- a) Ensaios para pesquisa;
- b) Ensaios para avaliação do desempenho potencial de produto;
- c) Ensaios para controle de qualidade de elementos de laje.

Finalmente, são apresentados exemplos de aplicação a partir do acompanhamento de um programa experimental realizado pelo NETPRE-UFSCar em parceria com fabricantes de lajes alveolares no Brasil.

1.3 Justificativas

O crescente aumento da competitividade existente no setor de construção civil brasileiro fez com que a necessidade em se utilizar novas tecnologias na construção civil aumentasse. A finalidade de reduzir custos e elevar a qualidade dos processos produtivos incrementou o uso do concreto pré-moldado.

O produto laje alveolar em concreto protendido pré-moldado insere-se de forma vantajosa para o setor de construção, devido a sua extensa utilização em pisos de edifícios de múltiplos pavimentos, coberturas e até mesmo como paredes de vedação. Seu baixo custo na produção, processo produtivo que pode ser tanto mecanizado quanto automatizado contribui para o seu uso, em alguns casos não é necessário a utilização de forros devido a sua superfície inferior plana e por último possui boas características termo-acústicas.

Contudo, a importância em realizar estudos na área de lajes alveolares está na necessidade de verificar o seu comportamento e padronizar o produto, ou seja, com a certificação. É indispensável que sejam realizados ensaios de aceitação na fábrica, avaliando o desempenho do produto. Na parte de controle de qualidade são realizados ensaios destrutivos, também na fábrica. Havendo necessidade de se desenvolver o produto, este estudo deverá ser realizado na universidade com uma equipe especializada em pesquisa e desenvolvimento. Paralelamente a esta pesquisa está ocorrendo a revisão da norma sobre lajes alveolares, a NBR-14861:2002, onde está sendo discutido o uso de ensaios na certificação de produto.

Portanto, esta pesquisa é justificada pelo interesse em se divulgar e empregar cada vez mais o uso de lajes alveolares de qualidade pelas construtoras e fabricantes do Brasil. A partir do convênio de cooperação tecnológica universidade-empresa existente entre o Núcleo de Estudo

e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto (NETPRE/UFSCar), pretende-se guiar a criação uma certificação para este produto “laje”.

1.4 Apresentação do trabalho

O trabalho é composto por cinco capítulos, sendo que no primeiro é apresentada a introdução, objetivo, metodologia e justificas. No segundo capítulo é descrita a fundamentação teórica e os mecanismos de funcionamento da peça próximo ao colapso. No terceiro capítulo são apresentados os principais tipos de ensaios para a avaliação de desempenho em elementos de laje alveolar com as respectivas recomendações de procedimentos. No quarto capítulo são apresentados alguns exemplos de aplicação com os resultados experimentais de ensaios obtidos que foram realizados no NETPRE (Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto) e acompanhados durante a pesquisa de mestrado, com as respectivas análises e considerações sobre os resultados. No quinto capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para continuação do trabalho.

Capítulo 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações Gerais

Do ponto de vista do projeto, as lajes alveolares precisam ser verificadas para evitar o seu colapso, mas também para funcionarem adequadamente. Na literatura pode-se encontrar, portanto, as situações em que os colapsos ocorrem ou as situações em que estão próximos de ocorrer. A maneira de funcionar o concreto e as armaduras nestas situações, simplificada, são chamados, neste trabalho, de mecanismos de ruptura. Talvez o nome mais adequado fosse designar tais funcionamentos como mecanismos de comportamento próximo ao colapso. No caso dos ensaios feitos em laboratório procura-se sempre que possível chegar a tais mecanismos. Assim, embora os estados limites de utilização (fissuração e deformação excessiva) sejam importantes para o projetista, não são o foco principal dos ensaios.

Os mecanismos de ruptura na laje alveolar, entre outros, são bastante influenciados pela geometria da seção transversal (altura efetiva da laje, espessura das nervuras, formato dos alvéolos), pelo nível de protensão (considerando as perdas de protensão desde a fase inicial até as perdas ao longo do tempo), pelas resistências à compressão e à tração do concreto, pela qualidade da aderência entre o concreto e armadura ativa. Somada a todas estas variáveis há de se destacar que o painel de laje alveolar na prática é dimensionado para funcionar junto com uma capa de concreto que será acrescida posteriormente. Desta forma, somam-se às condições anteriores as questões de aderência entre o elemento pré-fabricado e a capa.

É importante lembrar que nesse trabalho, entende-se que o cisalhamento é decorrente da força cortante e não é considerado o efeito do esforço torsor.

2.2 Mecanismos de Ruptura

De forma geral, as lajes alveolares podem apresentar diferentes mecanismos de ruptura. Como foram definidos anteriormente, podem ocorrer mais do que um dos mecanismos próximo ao colapso da peça, como é visto adiante, por exemplo, nos ensaios de cisalhamento.

Entre os diversos mecanismos de ruptura podem ser citados os seguintes: a) falha por perda da ancoragem (escorregamento da armadura); b) falha por cisalhamento (tensão no ponto crítico da nervura superior à resistência de tração do concreto); c) falha por cisalhamento em região fissurada (com efeito combinado de cisalhamento, flexão e escorregamento); d) falha por cisalhamento combinado com torção (em peças que não são planas); e) falha por flexão (ELU), com grande possibilidade, próximo à ruptura, do escorregamento da armadura ativa junto ao apoio; f) falha por interação dos mecanismos de flexão e cisalhamento, que pode ocorrer em peças com vãos pequenos e/ou com carregamentos mais elevados; g) falha por combinação de flexão e escorregamento da armadura ativa, h) separação da capa de concreto com o elemento pré-fabricado.

A falha de ancoragem em peças pré-tracionadas é mais corriqueira do que as de peças com pós-tração, pois estas últimas possuem dispositivos mecânicos para introdução do esforço de protensão. Nas peças pré-tracionadas a introdução da protensão causa tensões normais de tração ao longo de um trecho da cordoalha, piorando as condições de ancoragem. Na laje alveolar, como as superfícies de concreto (faces do alvéolo) estão sempre próximas da armadura, este efeito é mais influente.

Das situações listadas em seguida à ancoragem, percebe-se que há diversos mecanismos que dependem da flexão, do cisalhamento devido ao cortante ou de ambos combinados. Isto fica mais claro quando se analisa um elemento biapoiado (no caso de concreto armado) como o ilustrado na Figura 2.1, submetido a esforços de flexão e cortante. Pode-se perceber nessa figura que há três diferentes configurações de fissuras. Próximo ao apoio, onde o cisalhamento é maior e o momento é quase nulo, as fissuras inclinadas de cisalhamento aparecerão na nervura quando a tensão de tração principal alcançar a resistência à tração do concreto no ponto crítico, conforme observado na Figura 2.1 a. No caso de carregamento distribuído, onde as regiões centrais da laje possuem momentos mais elevados e cisalhamento reduzido, é mais comum a incidência de fissuras de flexão, conforme a Figura 2.1 c. Entretanto, nas regiões intermediárias, as fissuras de flexão podem se propagar em fissuras inclinadas de cisalhamento (Figura 2.1 b.), onde a tensão de cisalhamento é mais elevada. Em geral, estas fissuras são denominadas fissuras de cisalhamento e flexão, pois de fato tem-se

uma interação dos mecanismos de flexão e de cisalhamento, sendo que o mecanismo de ruptura nem sempre é bem definido, mas sim é o resultado da interação ou da combinação de mecanismos.

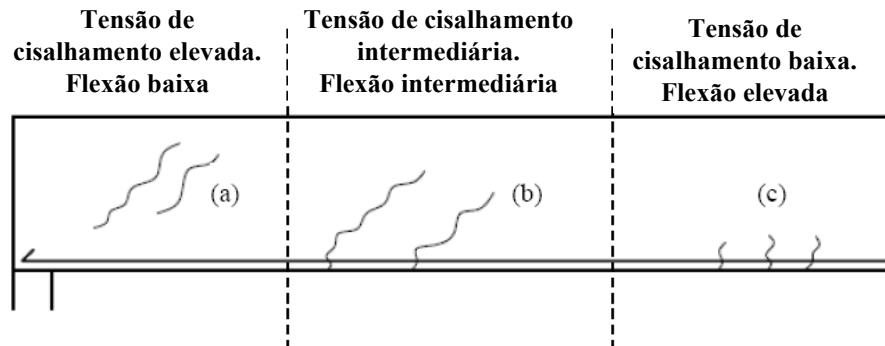


Figura 2.1: Elemento de concreto protendido submetido a flexão e cisalhamento. a) Fissuras na nervura devidas o cisalhamento; b) Fissuras de cisalhamento e flexão; c) Fissuras de flexão [Rettne e Edekling (2006)].

Da mesma forma que o cortante pode provocar fissuras devidas praticamente a seu efeito isolado ou podem se combinar com os efeitos da flexão, a torção pode provocar fissuras devidas ao seu efeito isolado ou combinada ao cortante de flexão.

Quando o elemento composto laje+capa está submetida à flexão, surge uma tensão de cisalhamento entre as superfícies da capa e do elemento pré-fabricado, que se for maior que o valor resistente do concreto, provoca a separação entre os dois elementos.

A seguir são apresentados resumidamente os aspectos dos principais mecanismos de ruptura, divididos em aqueles mecanismos que podem ocorrer nos ensaios de flexão e os mecanismos que podem ocorrer nos ensaios de cisalhamento nas lajes alveolares. Mostra-se também algumas situações particulares que ocorrem próximas ao apoio.

2.2.1 Mecanismos de ruptura devidos à flexão em lajes alveolares

Segundo Pajari (1989) e Rettne e Edekling (2006) os mecanismos de ruptura na flexão em lajes alveolares podem estar associados aos seguintes mecanismos isolados ou por combinação deles:

- Ruptura por tração na face superior (face sem armadura) da laje devida à protensão, ruptura em vazio, caracterizada pelo aparecimento de fissuras junto à borda superior e próximas ao apoio (vide Figura 2.2); este tipo de ruptura não ocorre durante um ensaio, pois deve ocorrer na liberação da protensão na fábrica.
- Ruptura das cordoalhas por tração devida à solicitação por flexão;

- Ruptura do concreto à compressão devida à solicitação por flexão;

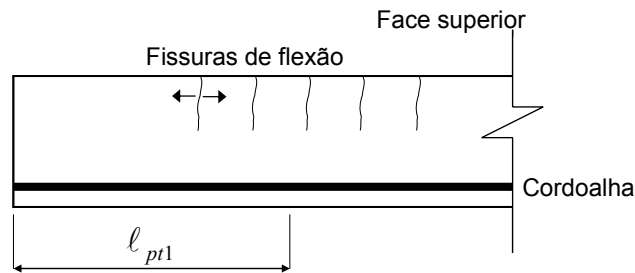


Figura 2.2: Fissuras de tração que ocorrem na face superior da laje devidas à protensão.



Figura 2.3: Fissuras de flexão em elementos de laje alveolar.

Para o caso dos ensaios de flexão por meio da aplicação de um carregamento concentrado, é preciso se ter certeza de que a seção onde ocorre a ruptura seja do tipo c (Figura 2.1). Caso contrário ocorrerá a interação de cisalhamento e flexão.

No caso de projetos de lajes alveolares, além das situações de colapso, é importante verificar a questão da deformação excessiva da laje e a ocorrência da fissuração por tração na fibra inferior, para momentos positivos superiores ao momento de fissuração, ultrapassando a resistência de tração do concreto. Embora os ensaios não sejam voltados para estas situações, estes podem fornecer importantes dados a este respeito, como é visto posteriormente, de maneira que os projetista tenham informações sobre características do elemento e não mais só dos materiais constituintes.

2.2.2 Mecanismos de ruptura devidos ao cisalhamento em lajes alveolares

Os mecanismos de falha devidos ao cisalhamento são os seguintes:

- Falha da nervura por tração devida ao cisalhamento;

- Fissuração do concreto devido à interação de cisalhamento e flexão;
- Falha por compressão no concreto devida ao cisalhamento;
- Falha por escorregamento devido ao cisalhamento ao longo de uma fissura inclinada.
- Falha de ancoragem dos cabos;

a) Falha da nervura por tração devida ao cisalhamento

Segundo ENGSTROM (2005), a distribuição da tensão de cisalhamento ao longo de uma seção de laje alveolar solicitada por força cortante e por momento fletor se difere para os Estádio 1 e Estádio 2, ou seja, antes e após a fissuração, conforme apresentado nas Figuras 2.4 a. e 2.4 b., respectivamente. No caso do cisalhamento sem a presença de fissuras de flexão (Estado 1), a falha ocorrerá por tração diagonal na nervura devida ao cisalhamento, conforme ilustrado na Figura 2.4 a. De modo contrário, para uma peça submetida ao cisalhamento com a presença de fissuras de flexão, conforme Figura 2.4 b., a distribuição das tensões tangenciais ao longo da seção apresenta um aumento na parte inferior da laje, na região da cordoalha, aparecendo então uma interação das fissuras de flexão com as fissuras diagonais de cisalhamento.

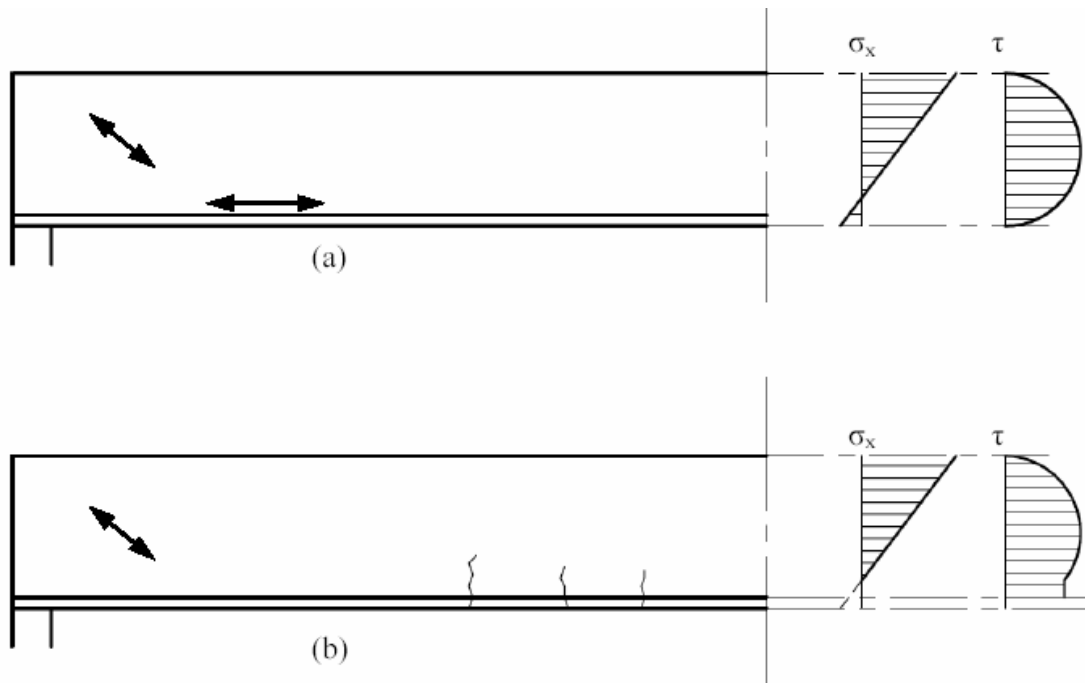


Figura 2.4: Tensões normais e de cisalhamento em um elemento protendido, submetido a força cortante e momento fletor no Estado 1 (a) e Estado 2 (b) [ENGSTROM (2005)].

Em Yang (1994) foi realizada uma calibração por meio de métodos numéricos e analíticos, onde se identificou que a posição (x,z) mais crítica, próxima ao apoio, é encontrada ao longo de uma linha inclinada com ângulo de 35° com o eixo horizontal. Acima dessa linha

inclinada, a falha por tração devida ao cisalhamento não é crítica devido à influência de tensão de compressão vertical próxima ao apoio. Mais distante do apoio, dentro da região não fissurada, todas as seções dentro do intervalo A'-B' devem ser verificadas nos pontos considerados na nervura, conforme indicado na Figura 2.5 b. De acordo com Yang (1994), a tensão de compressão vertical devida à reação do apoio é levada em consideração, como mostrado na Figura 2.5. Escolhendo pontos próximos, denominados pontos considerados, ao longo da linha, e calculando a tensão principal máxima em cada um deles, o ponto crítico onde a tensão principal tem seu valor máximo pode ser determinado para cada caso de carregamento. Pela variação da carga é determinada a resistência contra a falha por cisalhamento da nervura. A posição do ponto crítico pode variar para seções com alvéolos circulares e alvéolos misulados, conforme ilustrado na Figura 2.6.

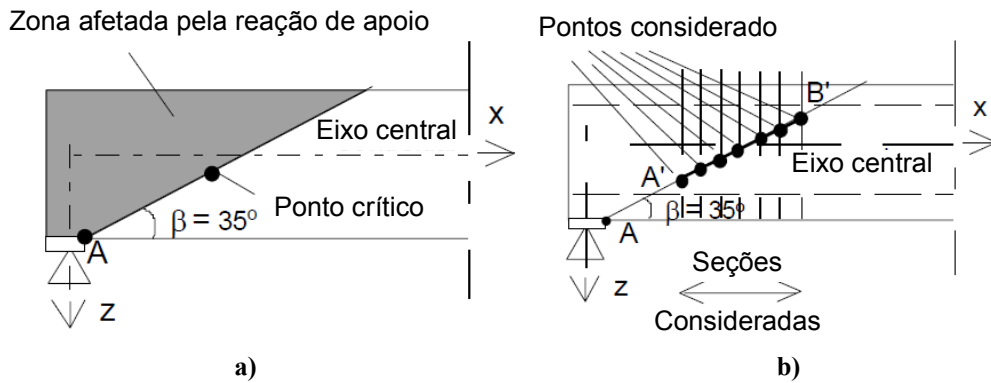


Figura 2.5: a) Possível localização do ponto crítico próximo a região afetada pela reação do apoio; b) Pontos e seções levadas em consideração nos cálculos [Pajari (2005)].

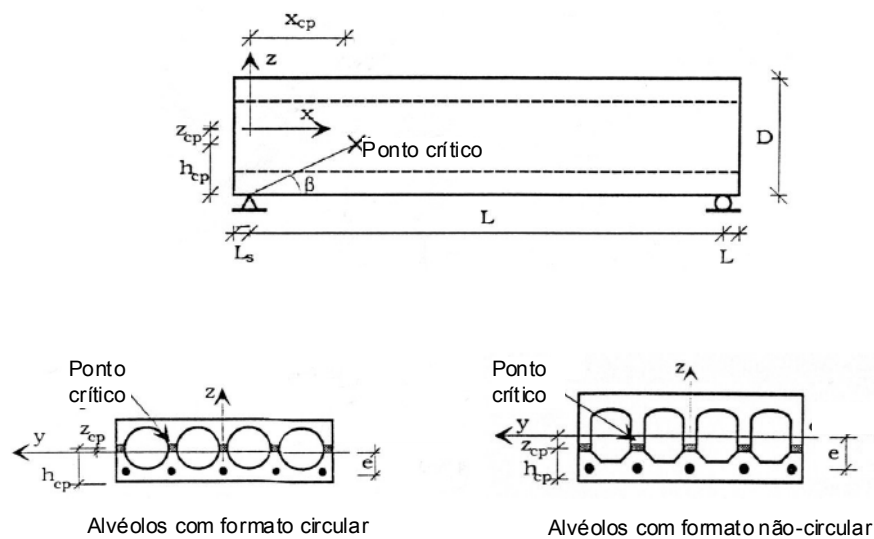


Figura 2.6: Posição do ponto crítico em relação a linha neutra [Yang (1994)].

b) Fissuração do concreto devida à interação de cisalhamento e flexão

Segundo KONG & EVANS (2001), quando a carga concentrada está aplicada a uma distância do apoio de cerca de $6 > a_v/d > 2,5$, a falha tende a ocorrer por cisalhamento, mas existe a interação das fissuras de flexão com fissuras inclinadas de cisalhamento.

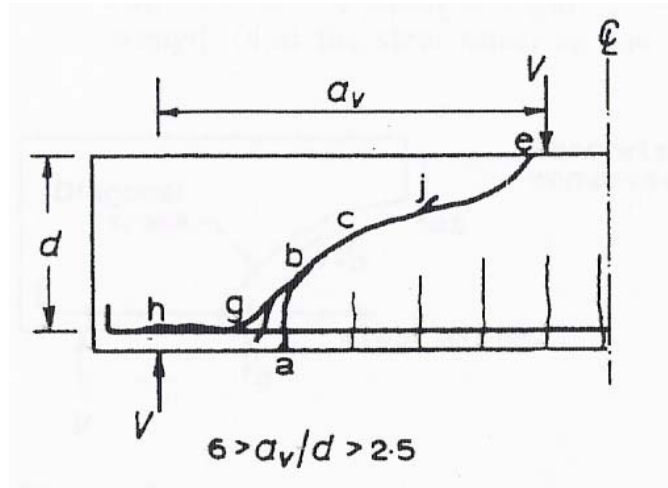


Figura 2.7: Situação em que $6,0 > a_v/d > 2,5$ [KONG & EVANS (2001)].

Com referência à Figura 2.7, com o aumento da força V , a fissura de flexão $a-b$, próxima ao apoio, se propaga em direção ao ponto de aplicação da força V , gradualmente, se tornando inclinada, que é conhecida como fissura de cisalhamento e flexão, ou mais frequentemente denominada simplesmente de fissura diagonal (ver fissuras entre os pontos $a-b-c$ na Figura 2.7). Com aumento adicional da força V , a falha pode ocorrer de dois modos. Se a relação a_v/d for relativamente alta, a fissura diagonal rapidamente se estenderia até “ e ”, resultando em colapso por ruptura da viga em dois pedaços. Este modo de falha é frequentemente chamado de falha por tração diagonal. Nesse modo de falha, a carga última é a mesma que aquela necessária à formação da fissura diagonal. Se a relação a_v/d for relativamente baixa, a fissura diagonal tende a parar em algum lugar em “ j ” (Figura 2.7). Um número de fissuras aleatórias pode se desenvolver no concreto em torno da armadura de tração longitudinal. Como V é ainda maior, a fissura diagonal se amplia e se propaga ao longo do nível da armadura de tração (Figura 2.7: fissura $g-h$). O aumento da força de cisalhamento causa a destruição da aderência entre o concreto e o aço, usualmente conduzindo ao fendilhamento do concreto ao longo de $g-h$. Se a armadura longitudinal não tem gancho na extremidade, a destruição da aderência e o fendilhamento do concreto causarão o colapso imediato. Se existirem ganchos, o aumento da força na armadura longitudinal causará a destruição do concreto existente ao redor do gancho, onde ocorre o colapso. Este modo de falha é

frequentemente chamado de falha por tração devida ao cisalhamento ou falha da ancoragem devida ao cisalhamento. Novamente a carga última não é muito maior que a carga de fissuração diagonal.

Na Figura 2.8 é apresentada a ilustração de um mecanismo de ruptura ocorrido em um ensaio típico de cisalhamento, para uma relação $a_v/d = 2,5$.

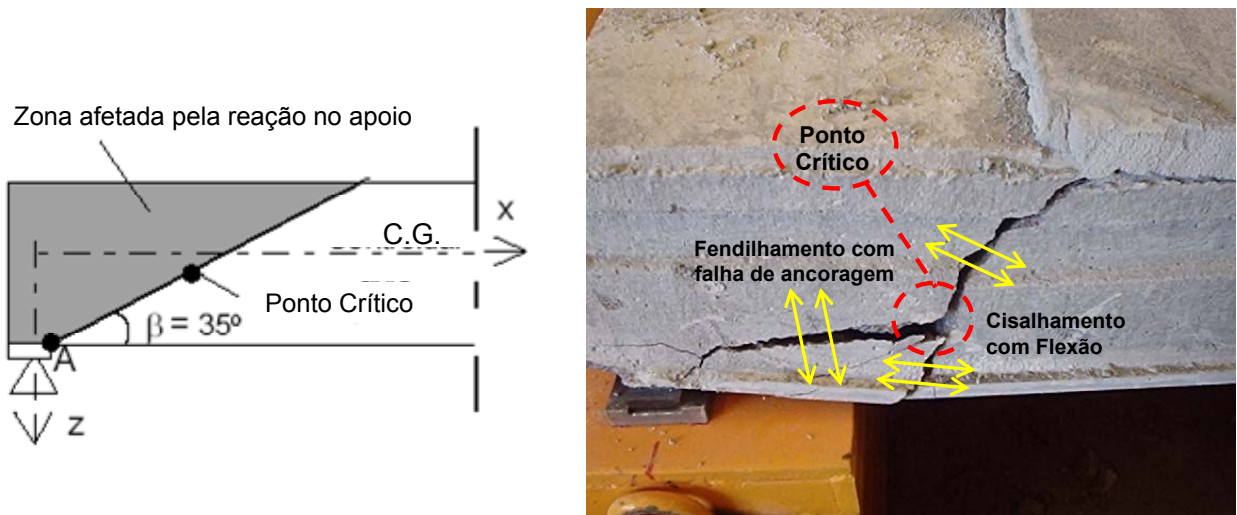


Figura 2.8: Combinação de fissuras de cisalhamento, com efeito da flexão e fendilhamento com falha de ancoragem em ensaio de cisalhamento, com $a_v/d = 2,5$.

c) Falha por compressão no concreto devida ao cisalhamento

Segundo KONG & EVANS (2001), quando a carga concentrada está aplicada a uma distância do apoio de cerca de $2,5 > a_v/d > 1$, a fissura diagonal frequentemente se forma independentemente e não como um desenvolvimento de uma fissura de flexão (Figura 2.9). A viga usualmente permanece estável após tal fissuração. Neste caso, o aumento adicional na força V irá causar a fissura diagonal, para penetrar na zona de compressão do concreto no ponto de carregamento, até eventualmente ocorrer a falha por esmagamento do concreto, às vezes de forma explosiva (Figura 2.9, porção sombreada). Este modo de falha é usualmente chamado de falha por compressão devida ao cisalhamento. Para esse modo, a carga última é às vezes maior que o dobro daquela relativa à fissura diagonal.

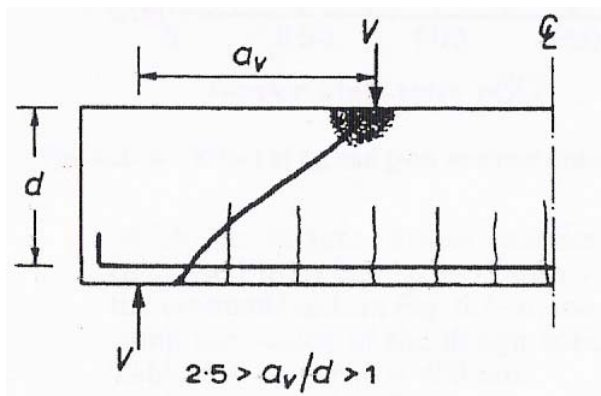


Figura 2.9: Situação em que $2,5 > a_v/d > 1,0$ [Kong e Evans (2001)].

d) Falha por escorregamento devido ao cisalhamento

Falha por escorregamento devido ao cisalhamento de um elemento de concreto sem armadura transversal ocorre quando o atrito e o efeito de intertravamento nas fissuras assim como o efeito de pino da armadura ou do aço de protensão, são insuficientes para transferir o cisalhamento.

Dependendo do comprimento da laje, após a formação das fissuras de flexão, anterior ao carregamento último para a flexão, é possível que se o cisalhamento na seção seja significativo a tal ponto de alguma fissura por flexão possa se desenvolver em uma fissura diagonal. Neste caso, haverá uma interação de mecanismos de flexão e cisalhamento. Se esta região estiver longe do apoio, deve-se ter uma condição de ancoragem ainda razoável e a maior probabilidade é que esta fissura diagonal avance em direção à face superior da laje, devendo ocorrer uma ruptura por compressão do concreto. Por outro lado, para o caso de uma de comprimento pequeno, seria mais provável que a fissura se desenvolvesse a partir do encontro.

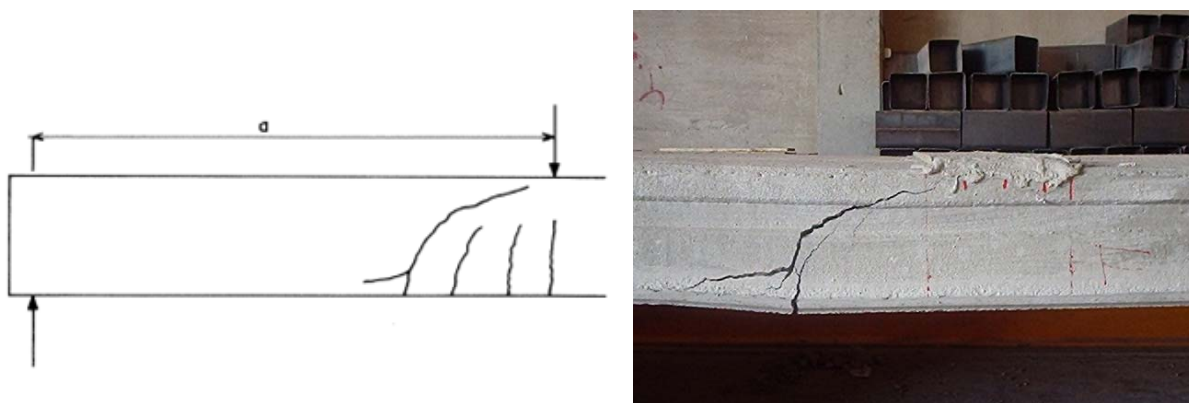


Figura 2.10: Interação de fissuras de cisalhamento com fissuras de flexão em ensaio de flexão de uma laje de 200 mm com três metros de vão.

e) Falha de ancoragem dos cabos

O mecanismo de falha por ancoragem pode ocorrer em duas situações. A primeira situação está relacionada com falhas de ancoragem em regiões fissuradas por flexão, ocorrendo um pico de tensões próximas a essas fissuras, onde essas tensões podem ultrapassar a tensão de aderência máxima e ocorrer o escorregamento da cordoalha. Além disso, quando se tem combinação de fissuras inclinadas de cisalhamento nas nervuras em trechos da laje com fissuras de flexão, pode haver um espalhamento de uma fissura horizontal ao longo da armadura, desde o ponto de encontro da fissura inclinada com a fissura de flexão em direção ao apoio, destruindo a aderência entre o concreto e a cordoalha, havendo o escorregamento e a ruptura por falha de ancoragem. A ocorrência de um desses mecanismos é fortemente influenciada pelas condições impostas de carregamento, pelo vão da laje e pelas condições dos vínculos nos apoios. Adicionalmente, sabe-se pela literatura técnica que situações de carregamentos cíclicos, onde ocorre a formação de fissuras por flexão, a resistência da ancoragem pode ser bastante afetada. No caso da resistência ao cisalhamento, a posição das tensões críticas de tração na nervura é fortemente dependente da geometria dos alvéolos (espessura e forma geométrica) e pelo nível da protensão. Desta forma, o desempenho das lajes alveolares frente ao cisalhamento pode mudar de forma significativa para diferentes tipologias de lajes alveolares, ou ainda, pode mudar mesmo para lajes com mesma geometria, mas com nível de protensão diferente. Sendo assim, cada tipologia de laje alveolar, para determinadas situações de projeto, pode apresentar mecanismos de ruptura bastante particulares. Neste contexto, é importante lembrar que as tipologias de lajes alveolares mais empregadas no Brasil variam entre 150 e 265 mm de altura, enquanto na Europa as lajes mais empregadas estão entre 200 e 400 mm. Estas opções de projeto na Europa são decorrentes da preocupação de projeto em diminuir a intensidade das tensões críticas atuantes nas lajes, as quais podem ocorrer em lajes de baixa altura com protensão elevada para vencer grandes vãos ou para resistir sobrecargas elevadas. Além da resistência, este critério de projeto diminui os problemas causados pela fluência do concreto, pois, uma vez que as tensões são menores, também diminuem as deformações. Neste contexto, a realização de ensaios para avaliação do desempenho de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas no Brasil é de grande importância para que se ganhe um melhor entendimento do funcionamento, que por sua vez também permite o aprimoramento de projeto.

Em Åkesson (1993), foram analisados os efeitos de escorregamento do elemento a partir do

apoio, o fendilhamento na região de compressão e a expansão por fragmentação decorrente de perda de aderência entre concreto e cordoalhas, resultante dos esforços de tração no concreto. Na Figura 2.11, é possível observar o esquema de cada fase analisada, com a direção dos principais mecanismos de falha.



Figura 2.11: Tensões geradas no concreto na região de introdução da protensão [Åkesson (1993)].

f) Situação particular

Uma situação particular consiste na fissuração longitudinal devido ao fendilhamento do concreto nas nervuras nas extremidades da laje devida a tensões excessivas de protensão (Figura 2.12). O fenômeno decorre da tendência de haver tração na direção perpendicular a protensão (estado de compressão paralelo ao eixo da peça) que está sendo introduzida na extremidade da peça.

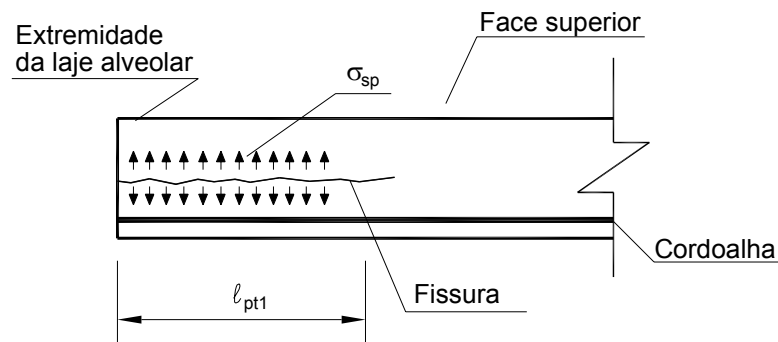


Figura 2.12: Fissuração longitudinal devida ao fendilhamento do concreto nas nervuras.

2.3 Lajes com capa de concreto moldado no local

Apresentam-se mecanismos de falha em unidades alveolares com a presença de capa de concreto. De acordo com Girhammar e Pajari (2008), a laje alveolar com capa pode chegar à ruína devido a três mecanismos críticos de falha. O primeiro tipo é o deslocamento na interface da laje alveolar com a capa de concreto devida ao cisalhamento (Figura 2.13 a.). O segundo consiste numa falha na nervura por tração devido ao cisalhamento na laje alveolar

(Figura 2.13 b); já o último mecanismo está relacionado com a ruptura das cordoalhas na laje alveolar (Figura 2.13 c).

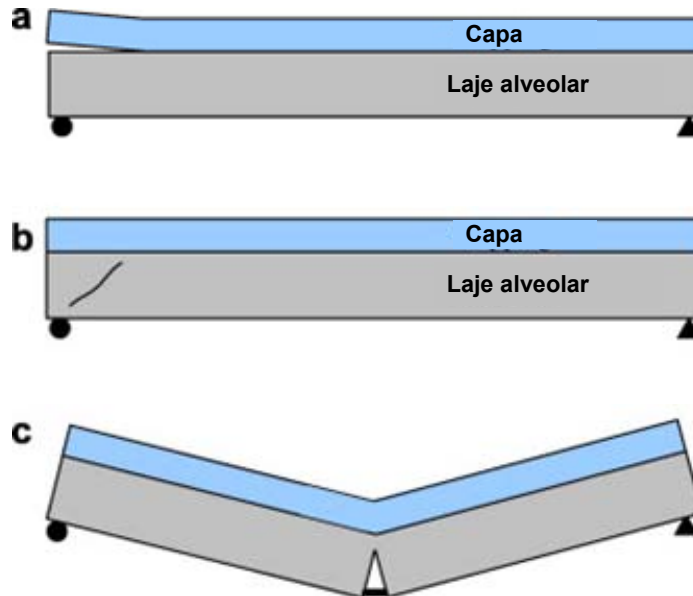


Figura 2.13: Alguns mecanismos de falha que podem acontecer em laje alveolar com a presença de capa.
a) Falha por cisalhamento na interface; b) falha da nervura por tração devida ao cisalhamento; c) ruptura dos cabos [Girhammar e Pajari (2008)].

Durante a execução da capa de concreto em lajes alveolares, diversos problemas podem ocorrer, como mostra a Figura 2.14. Nos pisos pré-moldados protendidos com elevada relação resistência-rigidez, a falha pode ser brusca. Por exemplo, no Reino Unido, milhões de libras são gastas em trabalhos dispendiosos de reparo, desperdícios e elevada espessura da capa de concreto, causados por problemas relacionados ao processo construtivo.

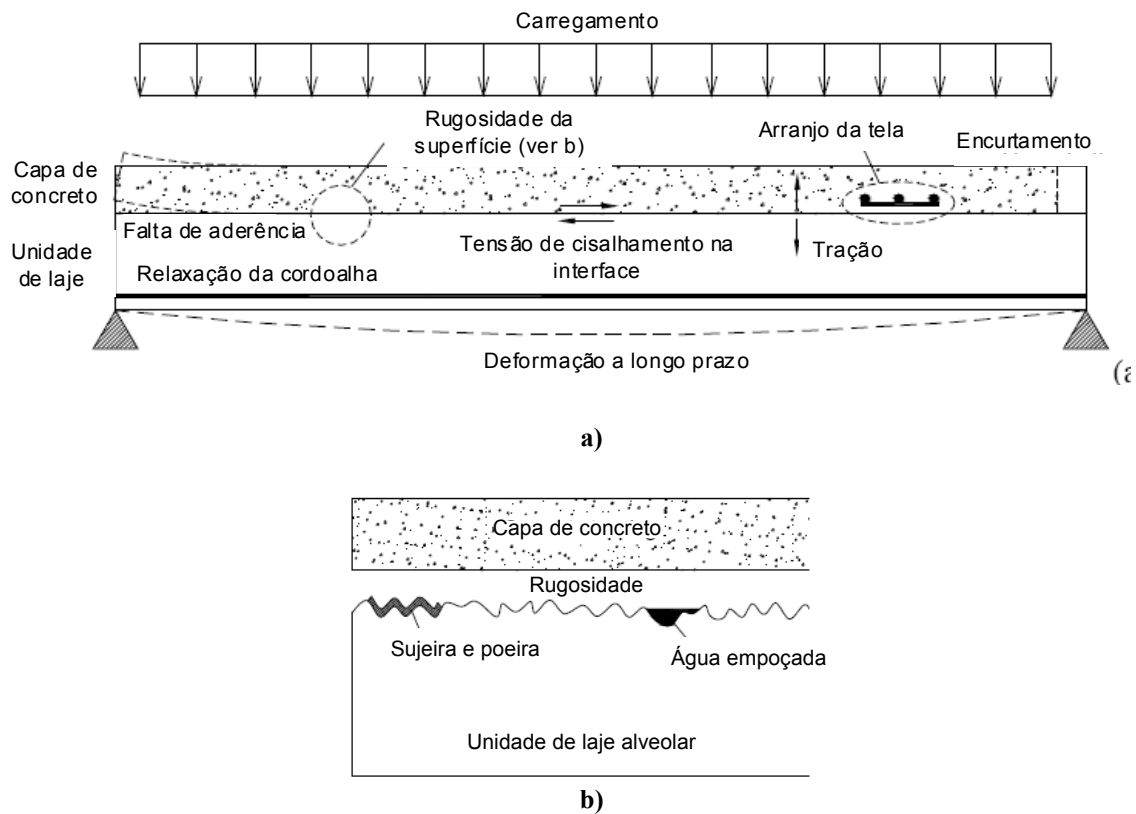


Figura 2.14: Problemas relativos à construção das capas de concreto. a) Problemas globais; b) Problemas relativos à rugosidade da superfície [IBRAHIM et al. (2008)].

Os problemas geralmente são causados por técnicas incorretas de construção e preparação das superfícies, influenciando dessa forma o comportamento global da estrutura, quando esta é considerada de forma monolítica. O construtor comumente ignora as consequências do efeito do teor de umidade, da retração ou das características na superfície da laje alveolar durante a concretagem da capa de concreto.

A ação conjunta entre os dois elementos, a laje alveolar e a capa de concreto moldado no local, depende essencialmente da transferência do cisalhamento horizontal ao longo da interface laje-capa.

Quando concreto moldado no local é lançado em uma unidade pré-moldada, usualmente não há chave mecânica na forma de armadura prevista entre os dois tipos de concreto. A segurança tem que ser garantida pela aderência e pela resistência ao cisalhamento entre as superfícies de contato.

Na FIP (1982), os tipos de superfícies que uma unidade pré-moldada pode ter antes de receber o concreto moldado no local são identificados em dez categorias. Eles são classificados com base na produção final da unidade pré-moldada, sendo difícil distinguir entre superfície “lisa”

e “rugosa”. Dentro da comissão de discussão sobre lajes alveolares da FIB existe uma teoria que superfície lisa e limpa tem melhor aderência global do que superfícies rugosas, muitas vezes empoeiradas e sujas, onde ocorrem falhas de aderência localizadas. A FIP (1982) recomenda que os contaminantes devam ser removidos, quer por jato de água, limpeza a vácuo ou a ar comprimido. Limpeza com vassoura não é suficiente para eliminar a poeira localizada nas pequenas depressões da interface. Além da rugosidade, o tratamento da superfície desempenha um importante papel no que diz respeito à transferência da tensão de cisalhamento através da superfície devido a:

- a) Poeira, detritos, água, etc, que são comumente encontrados nas cavidades da superfície, sendo difícil sua remoção;
- b) Se a superfície do elemento pré-moldado, antes do lançamento, é muito seca, este elemento absorverá água do concreto moldado no local, de modo que a qualidade adjacente à interface passa a ser governada pela capacidade da interface;
- c) Se a superfície é muito úmida, ou seja, encharcada, a relação água-cimento na interface será muito elevada, resultando em fraca resistência de aderência.

Quando os poros da superfície estão totalmente tratados, a superfície se encontra em condições úmidas. Se a superfície pré-moldada foi deixada repousando ao ar livre em condições ambientes antes do lançamento da capa de concreto, uma parte da água contida na unidade irá evaporar e será inferior à saturada, ou seja, seca ao ar (condições secas).

Para produzir uma superfície em condição extremamente seca, uma secagem prolongada em estufa ou em um complexo fechado quente iria reduzir o teor de umidade do concreto, até a secagem total. No entanto, esta condição não é alcançável para produção em larga escala de unidades pré-moldadas.

As diferentes fases das condições da superfície são mostradas na Figura 2.15. Para uma condição extrema, a superfície se encontra em condições saturadas. Se a superfície da unidade pré-moldada antes do lançamento é muito seca ela, irá absorver a água da capa de concreto, sendo a qualidade adjacente à interface regulada pela capacidade da interface. Em contrapartida, se a superfície for encharcada, a grande quantidade de água livre na superfície irá enfraquecer a aderência da interface, reduzindo, assim, a capacidade da laje composta.

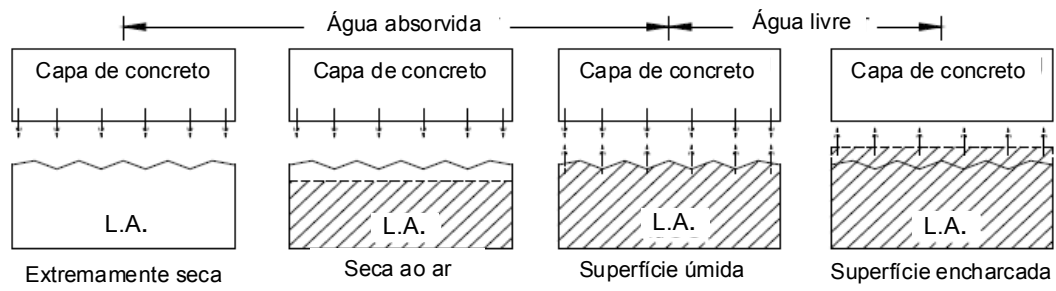


Figura 2.15: Condições da interface com diferentes tipos de preparação de superfície [IBRAHIM et al. (2008)].

Capítulo 3

3 PROCEDIMENTOS PARA ENSAIOS DE LAJES ALVEOLARES

A laje alveolar é um elemento de características únicas e específicas. Segundo Van Acker (2007), quando surgiram as lajes alveolares, primeiro se desenvolveu o processo de fabricação e depois vieram pesquisas para o avanço dos modelos de cálculo. Sendo assim, inicialmente os procedimentos empregados para lajes protendidas com seções retangulares foram adaptados e empregados com auxílio da verificação experimental. Por esta razão, existiu uma grande preocupação com a padronização dos ensaios na Europa nos anos 80.

Devido ao fato de que essas lajes não apresentam armadura transversal, dependendo exclusivamente da qualidade da aderência (ancoragem) das cordoalhas protendidas e da resistência à tração do concreto, existe a necessidade de um controle de qualidade rigoroso para esse tipo de produto. Por essa razão, os manuais da FIP (1982) recomendam que os fabricantes de lajes alveolares possuam um procedimento de ensaio reconhecido e instalações para testes regulares como parte da planta da fábrica. Se a empresa que fornece as lajes é responsável pelo projeto, é assumido que o projeto é confiado a pessoal qualificado e experiente. O controle de qualidade deve ser de responsabilidade de uma pessoa competente, independente da linha de produção. Quando a pessoa responsável pelo controle de qualidade não estiver satisfeita, por alguma razão, com a adequação do produto, então se deve determinar se o produto pode ser vendido ou não, consultando um engenheiro qualificado. O foco, portanto, são os ensaios relativos a flexão, cisalhamento devido ao cortante, interação de ambos, para lajes sem e com capa de concreto. Ensaio de ancoragem e torção não são o objetivo nesse trabalho e portanto não serão citados.

3.1 Diretrizes Normativas para Realização de Ensaios

Ensaios de elementos de lajes alveolares (flexão ou cisalhamento) podem ser utilizados no começo da produção, como ensaios de aceitação ou como ensaios de controle de qualidade durante o processo de produção. Em ambos os casos, devem ser utilizados o mesmo arranjo e o mesmo procedimento de ensaio, bem como se deve ter o mesmo critério de aceitação. Esses ensaios podem ser feitos em instituições de pesquisa, em laboratórios privados ou em laboratório da própria fábrica.

A EN 1168:2005 indica que a frequência para a realização dos ensaios deve ser de no mínimo três elementos para cada novo projeto de lajes (tipo novo de laje a ser produzida), quando houver uma nova linha de produção (novo equipamento), uma alteração significativa no projeto, uma modificação no processo produtivo ou alguma modificação dos materiais (concreto ou cordoalhas).

A NBR-14861:2002 trata apenas dos requisitos gerais para aceitação das lajes alveolares, onde o comprador pode exigir que o desempenho dessas lajes seja comprovado por meio de ensaios de prova de carga. Entretanto, não existem indicações de um procedimento padronizado para validação e controle de qualidade dessas lajes.

A NBR 9062:2006 sugere que no caso de situações onde o cálculo analítico aproximado não conduz a resultados teóricos satisfatórios ou onde economia pode resultar de testes em protótipos, parte do procedimento de projeto pode ser executado com base em verificações experimentais. Os objetivos desses ensaios seriam: estabelecer diretamente a resistência última ou o comportamento em serviço de elementos estruturais; obter propriedades específicas de materiais; teste de novos materiais ou produtos ou reduzir incertezas de parâmetros em carga ou de modelos de resistência. Nesses ensaios devem ser obedecidos os seguintes requisitos: a) os ensaios devem ser elaborados e os respectivos resultados avaliados de forma que a estrutura ou o elemento estrutural ensaiado tenha o mesmo nível de confiabilidade do que uma estrutura ou elemento estrutural projetado conforme as prescrições de projeto estabelecidas nessa Norma, com relação a todos os possíveis estados limites e todas as situações de projeto; b) a amostragem de espécimes a serem ensaiadas bem como as condições durante os ensaios devem ser representativas. Os ensaios devem reproduzir as condições de carregamento e de apoio.

De modo geral, os ensaios realizados em lajes alveolares podem ser divididos em três categorias apresentadas a seguir.

3.1.1 Ensaios com Propósitos de Pesquisa e Desenvolvimento

Inicialmente, esses ensaios estão relacionados com ensaios exploratórios que podem ser utilizados para melhor entender o comportamento de um determinado produto (elemento estrutural). Esses ensaios possuem um caráter mais voltado para a engenharia de projeto de produto. Num segundo momento, quando já existe um produto desenvolvido, têm-se os ensaios de pesquisa com o propósito de se estudar o comportamento estrutural desse produto (elemento estrutural). Em geral, esse tipo de ensaio é realizado em centros de pesquisa, pois necessita de uma instrumentação para medir um número maior de parâmetros (força, deslocamentos e/ou deformações), a fim de se caracterizar melhor o comportamento estrutural. Finalmente, ensaios com propósito de pesquisa podem ser realizados a fim de validar ou ajustar os modelos analíticos que são utilizados para o projeto de elementos estruturais. No caso de lajes alveolares, esse tipo de ensaio foi muito realizado na Europa, uma vez que vários dos modelos originais eram feitos para elementos retangulares protendidos.

3.1.2 Ensaios para Avaliação de Desempenho

Os ensaios para avaliação de desempenho podem ser subdivididos em três grupos: a) ensaios para a caracterização das propriedades dos materiais, os quais serão fundamentais para as análises dos parâmetros representativos dos materiais; b) ensaios para validação de projeto; c) ensaios para validação de produto, que são os ensaios utilizados para a Certificação de Produto, que compõe o processo de Certificação da Qualidade, a qual envolve a certificação do processo e do produto. Dado o fato de que o desempenho de uma laje alveolar é influenciado por suas características geométricas, características de projeto, materiais componentes e pelo seu processo produtivo, a certificação dos elementos de lajes alveolares somente pode ser conseguida por meio de ensaios mecânicos que comprovem o desempenho esperado no projeto. As amostras para este tipo de ensaio devem ser escolhidas por terceiros, pessoas técnicas ou auditores que não façam parte da empresa. Da mesma forma, para que haja certificação de produto, é necessário que o laudo com a análise dos resultados seja feito por profissional ou instituição externa à empresa.

3.1.3 Ensaios para Controle da Qualidade

Uma vez iniciada a produção, os ensaios podem ser realizados com certa frequência a fim de se ter o Controle da Conformidade do Desempenho de Produto, obtido a partir dos ensaios para certificação do produto. As amostras para este tipo de ensaio devem ser escolhidas por terceiros, pessoas técnicas ou auditores que não façam parte da empresa, mas os ensaios e a análise de seus resultados pode ser feita pela própria empresa, desde que haja um profissional responsável e que os processos de ensaio e de análise utilizados, bem como seus resultados, passem por auditoria externa.

3.2 Procedimentos para Registro dos Ensaios

Serão consideradas medidas preliminares e o registro dos ensaios propriamente ditos.

3.2.1 Medidas Preliminares

As tolerâncias dimensionais deverão ser respeitadas. O comprimento da laje pode influenciar nas condições de apoio. Portanto, é importante lembrar que o fato de uma das extremidades da laje estar desnivelada pode influenciar e originar tensões de torção.

Com relação ao controle de fissuração as lajes devem ser submetidas a um rigoroso controle de qualidade. Antes de iniciar a protensão, fissuras transversais de retração não podem ser aceitas. Depois de cortar a laje, deve ser feita uma boa descrição das fissuras que não podem ser aceitas (por exemplo as fissuras horizontais nas nervuras próximas à extremidade).

Antes da realização do ensaio, preferencialmente antes de sua montagem, são necessárias certas medições. É importante medir as características geométricas, tais como altura, largura e comprimento da laje, largura na metade da nervura e também os diâmetros dos alvéolos, como indicado nas Figuras 3.1 a 3.3. Todas essas características são importantes de se obter, pois as medidas efetivas fornecidas pelo projeto podem sofrer algumas modificações devidas a influências na produção, tais como a falta de calibração da extrusora.



a)

b)

**Figura 3.1: Uso de paquímetro para retirada de medidas: a) da nervura
b) da borda superior.**



a)

b)

Figura 3.2: Uso de paquímetro para retirada de medidas: a) diâmetro do alvéolo b) altura da laje.



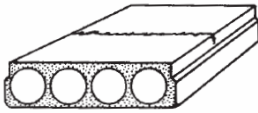
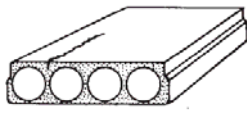
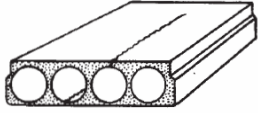
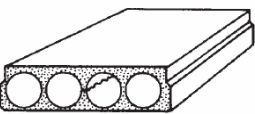
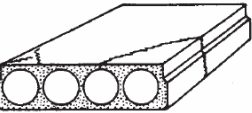
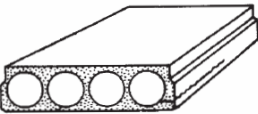
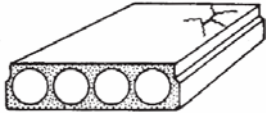
a)

b)

Figura 3.3: Medidas da cordoalha: a) afundamento das cordoalhas b) distância do centro da cordoalha até a borda inferior.

É importante indicar a quantidade de cabos, sua área, a força de protensão, a existência de capa, a altura da capa e o preenchimento ou não dos alvéolos. É importante obter esses dados com certa antecedência para auxiliar no cálculo da força efetiva esperada para que a laje rompa. Um exemplo de folha para utilizar neste tipo de controle encontra-se no Anexo A. Deve-se observar a existência de fissuras antes do início do ensaio. Alguns tipos estão indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Ilustração de possíveis imperfeições nas superfícies da Laje Alveolar [Fib (2007); PCI (1983)].

Tipos de imperfeições		Possíveis causas
Fissura Transversal		Projeto Inapropriado Produção Inapropriada Manuseio Inapropriado
Fissura longitudinal na nervura		Produção Inapropriada
Fissura longitudinal ao longo dos alvéolos (causa, prevenção, efeito, reparo)		Projeto Inapropriado Produção Inapropriada Manuseio e Estocagem Inapropriados
Fissura na nervura acima das cordoalhas		Projeto Inapropriado Produção Inapropriada
Fissura no canto do elemento		Produção Inapropriada Manuseio e Estocagem Inapropriados
Fissuras longitudinais na nervura, próximos à cordoalha		Projeto Inapropriado Produção Inapropriada Manuseio Inapropriado
Fissuras com diversos padrões		Retração da Superfície Mistura do Concreto Inapropriada Operação Inapropriada de Equipamentos

3.2.2 Registro dos Ensaios

Ao iniciar o ensaio, é importante ter em mãos um check-list de itens a serem observados na realização do ensaio. Esta folha deve conter: identificação da peça a ser ensaiada; data da produção, data e local de ensaio, temperatura ambiente; laboratório e pessoa responsável pelo ensaio; todas as características dos materiais utilizados no ensaio; qualquer tipo de problema observado durante a inspeção visual; tipo do ensaio a ser realizado; equipamentos utilizados durante o ensaio; força prevista para a falha da laje; força de ruptura; tipo de falha caracterizada pela abertura de fissuras e, por último, quaisquer observações sobre o ensaio e eventuais transtornos percebidos durante sua realização. No anexo A encontra-se um exemplo de folha para ser utilizada no ensaio.

3.3 Recomendações para Aplicação dos Carregamentos

A velocidade de aplicação de carga influencia nos resultados obtidos no ensaio e no modo como a laje se comportará. Quanto à velocidade do carregamento, a FIP (1992) sugere a aplicação de 50 kN por minuto. Já a EN 1168:2005 recomenda que deva ser aplicado 10% da carga última por minuto.

Nos ensaios realizados em lajes para a resistência ao cisalhamento obtiveram-se cargas máximas de 150 kN. Isto significa que ao se usar o indicativo da FIP (1992), o ensaio deveria ser feito em três minutos. Seguindo a determinação da EN 1168:2005 o mesmo ensaio deveria ser realizado em dez minutos e, portanto, com uma velocidade de 15 kN/minuto. De uma maneira geral procurou-se realizar os ensaios constantes deste trabalho com esta última velocidade.

Para se avaliar a capacidade de uma laje ao esforço cortante ou outro tipo de esforço, é recomendado que os ensaios atinjam a carga correspondente a ruptura do elemento. Desta forma a relação entre valor resistido e calculado (sem a consideração de coeficientes de segurança) permite avaliar a segurança do procedimento de cálculo ou mesmo capacidade do elemento. No caso específico de ensaios de controle da qualidade, o Manual de Qualidade da FIP (1992) sugere que possa ser aplicado um carregamento até a força cortante solicitante do projeto (V_{sd}) acrescido de 25%.

No caso de carregamentos cíclicos, o que pode ser interessante para o estudo da interação dos mecanismos, a EN1168:2005 recomenda que sejam aplicados dez ciclos com cerca de 70 % \pm 2% da carga de última e no último ciclo avançar até a ruptura.

3.4 Condições de apoio para os diversos ensaios

O apoio próximo da aplicação da carga (no caso dos ensaios de cisalhamento) deve ser um apoio móvel, de forma que nenhuma força axial seja gerada pela rotação do elemento no apoio. Para compensar as irregularidades existentes na superfície e eventuais curvaturas na direção transversal da peça, entre a laje e a viga de suporte pode ser utilizado 10mm de madeira, neoprene ou gesso. A Figura 3.4 mostra o ensaio de cisalhamento realizado pela Universidade de Chalmers, na Suécia, onde foi utilizada uma faixa de madeira para acomodar a laje.



Figura 3.4: Uso de uma faixa de madeira na interface da laje e da viga metálica de apoio [VTT (2006)].

Outras alternativas foram utilizadas por centros de pesquisa. Na Figura 3.5 no ensaio de cisalhamento realizado pelo NETPRE em 2009 utilizou-se graxa entre duas lâminas metálicas onde foi apoiada a vigota de madeira na viga metálica. Essa técnica permitiu o deslocamento da laje durante o ensaio.



a) antes do ensaio



b) durante o ensaio

Figura 3.5: Uso de graxa no ensaio de cisalhamento: a) situação antes do ensaio; b) situação durante o ensaio.

Outra alternativa é a confecção de roletes metálicos parafusados na viga metálica com a finalidade de permitir que a laje se desloque e não sejam geradas forças axiais devidas a sua rotação, como mostra a Figura 3.6.

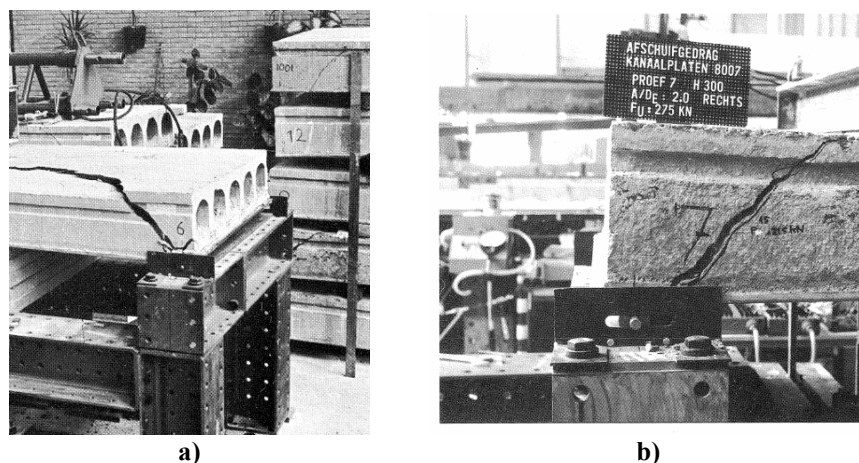


Figura 3.6: Ensaio de cisalhamento. a) Vista geral do apoio móvel; b) detalhe de rolete [Heron (1983)].

Uma outra solução foi adotada no ensaio realizado por Fernandes(2007), onde para evitar eventuais rotações, foi inserido pistões dentro da viga metálica. Para regularizar a superfície foi criado uma estrutura metálica para apoiar o neoprene, mostrado na Figura 3.7.



Figura 3.7: Detalhe do material para regularizar a superfície da laje [Fernandes (2007)].

3.5 Caracterização das propriedades mecânicas dos materiais empregados na confecção das lajes

Antes de realizar os ensaios dos elementos de laje, é necessário obter as características dos materiais empregados na fabricação da laje, tais como o aço e o concreto. Esses dados serão posteriormente utilizados em cálculos, antes do início do ensaio.

3.5.1 Controle de Qualidade do Aço

O controle de qualidade do aço deve ser claramente definido e, se não for garantido por um certificado, tem de ser verificado. Características como relaxação e deformação devem ser conhecidas para as condições normais de temperaturas e de cura.

3.5.2 Controle de Qualidade do Concreto

Segundo a FIB (1992), os valores característicos da resistência do concreto podem ser determinados a partir de ensaios de compressão normal e compressão diametral (tração) realizados com três a seis testemunhos cilíndricos, os quais devem ser ensaiados imediatamente após serem extraídos. Esses testemunhos devem ser extraídos em uma faixa do elemento de laje alveolar a ser ensaiada, sendo essa faixa com comprimento variando entre 50 mm e 200 mm. Quando a resistência do concreto é ensaiada antes da liberação da protensão, esse trecho de laje pode ser serrado da extremidade da laje na pista de protensão, e o testemunho deve ser extraído da parte superior da laje alveolar. Segundo esse documento da FIB, o desvio padrão dos ensaios dos corpos-de-prova extraídos é maior do que os corpos-de-prova cúbicos ou cilíndricos.

Para o caso do controle da qualidade recomenda-se que seja cortada uma faixa da laje, onde os testemunhos devem ser mantidos sob condições úmidas e extraídos conforme apresentado na Figura 3.8. De modo geral, para lajes produzidas pelo método da extrusão, os testemunhos extraídos da parte inferior da laje apresentam valores de resistência um pouco superiores aos obtidos através dos testemunhos extraídos da parte superior da laje, em virtude de haver um grau de compactação maior na região inferior da laje. A extração dos testemunhos é realizada com a máquina Hilt, indicada na Figura 3.9.

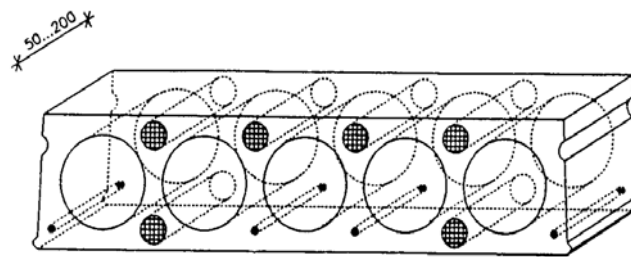


Figura 3.8: Amostra para extração de corpos-de-prova [FIP (1992)].



Figura 3.9: Equipamento para extração de testemunhos de concreto para laje alveolar.

A qualidade do concreto pode ser determinada por ensaios de corpos-de-prova (cúbicos, cilíndricos ou prismáticos). É importante que o concreto das amostras seja o mesmo utilizado na laje. O fato é que o concreto é muito seco e torna-se necessário vibrar o concreto que é moldado para confecção dos corpos-de-prova cilíndricos ou cúbicos. Procurando solucionar este problema, existem equipamentos na Europa que permitem reproduzir, com boa aproximação, a compactação do concreto existente na laje, que passou pelo processo de extrusão, conforme apresentado na Figura 3.10.



Figura 3.10: Máquinas utilizadas em Ensaio de compactação de concreto com baixa trabalhabilidade [(INVELOP OY, 2009)].

As características a serem determinadas por meio de corpos-de-prova são: resistência à compressão, resistência à tração, valores de deformação e retração e módulo de elasticidade. O valor da resistência à tração medida no corpo-de-prova deve ser aquele que corresponde ao tipo de tensões de tração permitidas na laje (resistência à tração direta ou resistência à tração determinado pela flexão da amostra com dimensões correspondentes às da laje). Cilindros verticais e horizontais foram extraídos, como indicado na Figura 3.11.

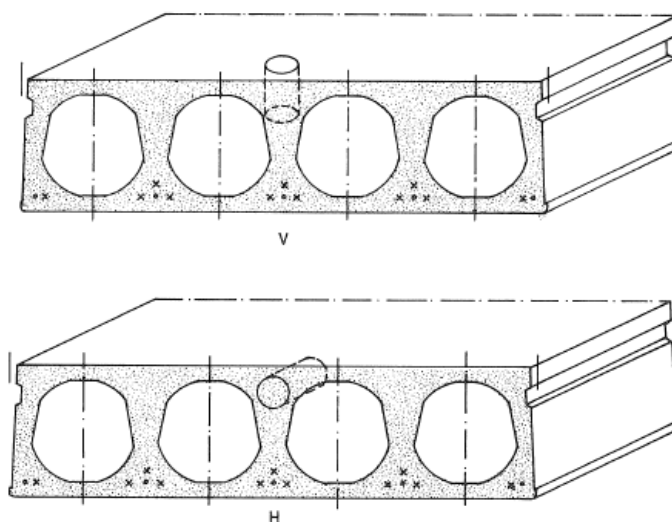


Figura 3.11: Testemunhos extraídos de uma faixa da laje, para a determinação da resistência do concreto [HERON(1983)].

Segundo HERON (1983), as resistências à compressão, obtidas por meio de testemunhos extraídos (corpos-de-prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm), denominadas $f_{ck,C50}$, são equivalentes às resistências à compressão de corpos-de-prova cúbicos de 150 mm, $f_{ck,CC150}$.

Sendo que a fórmula para resistência à tração do concreto está definida como uma função da resistência característica à compressão do concreto f_{ck} , obtida a partir de um corpo-de-prova cilíndrico de diâmetro de 150 mm, $f_{ck,C150}$, e considerando que a resistência cilíndrica é 85 % da resistência cúbica, deve-se fazer esta correção para se obter a resistência do concreto à tração característica do concreto a partir da resistência à compressão obtida a partir do testemunho de 50 mm. Desta forma as referidas expressões ficam:

$$f_{ctm} = 0,3 \times (f_{ck,C150})^{2/3} \quad (3.1)$$

$$f_{ctm} = 0,3 \times (0,85 \times f_{ck,C50})^{2/3} \quad (3.2)$$

Os valores do módulo de elasticidade, deformação e retração são medidos uma a duas vezes por ano, a resistência à compressão tem que ser determinada para a laje no momento da protensão e depois de 28 dias. Os corpos-de-prova devem ir para cura nas mesmas condições ambientais da laje. Para a resistência de 28 dias (compressão e tração) a taxa de amostra tem de permitir que cálculos estatísticos determinem os valores.

Adicionalmente aos ensaios destrutivos, existem alguns procedimentos não destrutivos que estimam a resistência do concreto de forma rápida e simples, que podem apresentar uma correlação razoável com os ensaios mecânicos. No relatório de pesquisa HERON (1983) é apresentado o resultado de um estudo sobre a utilização de esclerômetro como instrumento para avaliação da resistência de lajes alveolares. Naquela pesquisa, foram comparados os resultados de ensaios de corpos-de-prova com valores estimados a partir das leituras por meio de esclerômetro. Os valores determinados por meio do esclerômetro foram obtidos em lugares diferentes nos lados e nas faces serradas na extremidade dos elementos. Observou-se que os valores obtidos nas faces laterais da laje são um pouco inferiores do que aqueles obtidos nas faces serradas da extremidade, o que é explicado pela maior massa de concreto encontrada pelo esclerômetro. Por outro lado, verificou-se que os valores obtidos por meio do esclerômetro, a partir das faces serradas da extremidade, apresentaram uma boa concordância com os resultados experimentais obtidos em corpos-de-prova cúbicos.

3.6 Ensaio de Cisalhamento

Para avaliar a resistência das lajes alveolares ao cisalhamento (entende-se aqui que o cisalhamento é oriundo apenas de esforço cortante não tendo a participação de cisalhamento

oriundo de momento torçor) utiliza-se o ensaio padrão indicado no manual da FIP (1992) e na norma europeia EN1168-2005.

As amostras a serem ensaiadas devem ser produzidas na mesma pista de concretagem e pertencer à mesma classe de concreto, conforme agendado para a produção atual. A peça a ser ensaiada deve ser um elemento de largura real, com vão de $4m$ ou $15 \times h$, prevalecendo o maior, Figura 3.12. O ensaio deve ser realizado na temperatura entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Essa temperatura deve ser gravada. Para obter valores de referência da resistência do concreto, testemunhos devem ser extraídos do elemento, conforme recomendações apresentadas no item 3.5.2. Ao invés de testemunhos, corpos-de-prova cúbicos ou cilíndricos de concreto usado na fabricação podem ser usados como referência para o valor da resistência, mas apenas sob a condição de que seja provado que a compactação destes esteja de acordo com a compactação atual da laje, pela comparação de densidade.

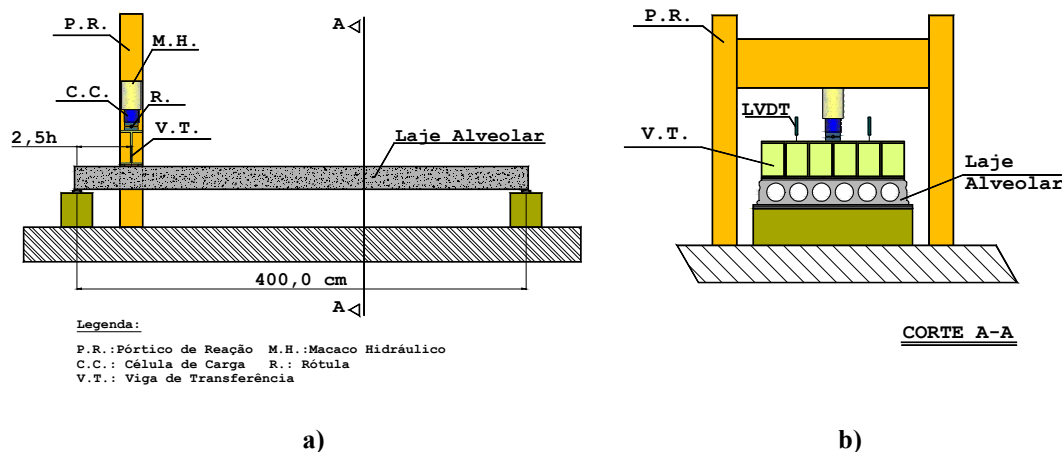


Figura 3.12: Desenho representativo do setup de ensaio de cisalhamento: a) Vista lateral b) Vista frontal, Corte A-A.

A transferência de força para a laje será realizada a partir de uma viga rígida, de preferência metálica (Figura 3.13.a e Figura 3.13.b). Esta deve possuir altura mínima de 150 mm, mas é indicado o uso de 250 mm no caso de ser utilizado um macaco hidráulico. Deverá haver, ao longo de toda a largura, uma distribuição uniforme de forças. O apoio mais próximo do ponto de aplicação da carga deve ser móvel, de forma que nenhuma força axial seja gerada pela rotação do elemento no apoio. Entre o elemento e a viga de apoio, um material para a distribuição de cargas como 10 mm de madeira compensada ou neoprene ou uma faixa de argamassa ou gesso podem ser aplicadas. Esse material deve compensar as irregularidades da superfície da laje e alguma eventual curvatura do elemento, na direção transversal (Figura 3.13.c).

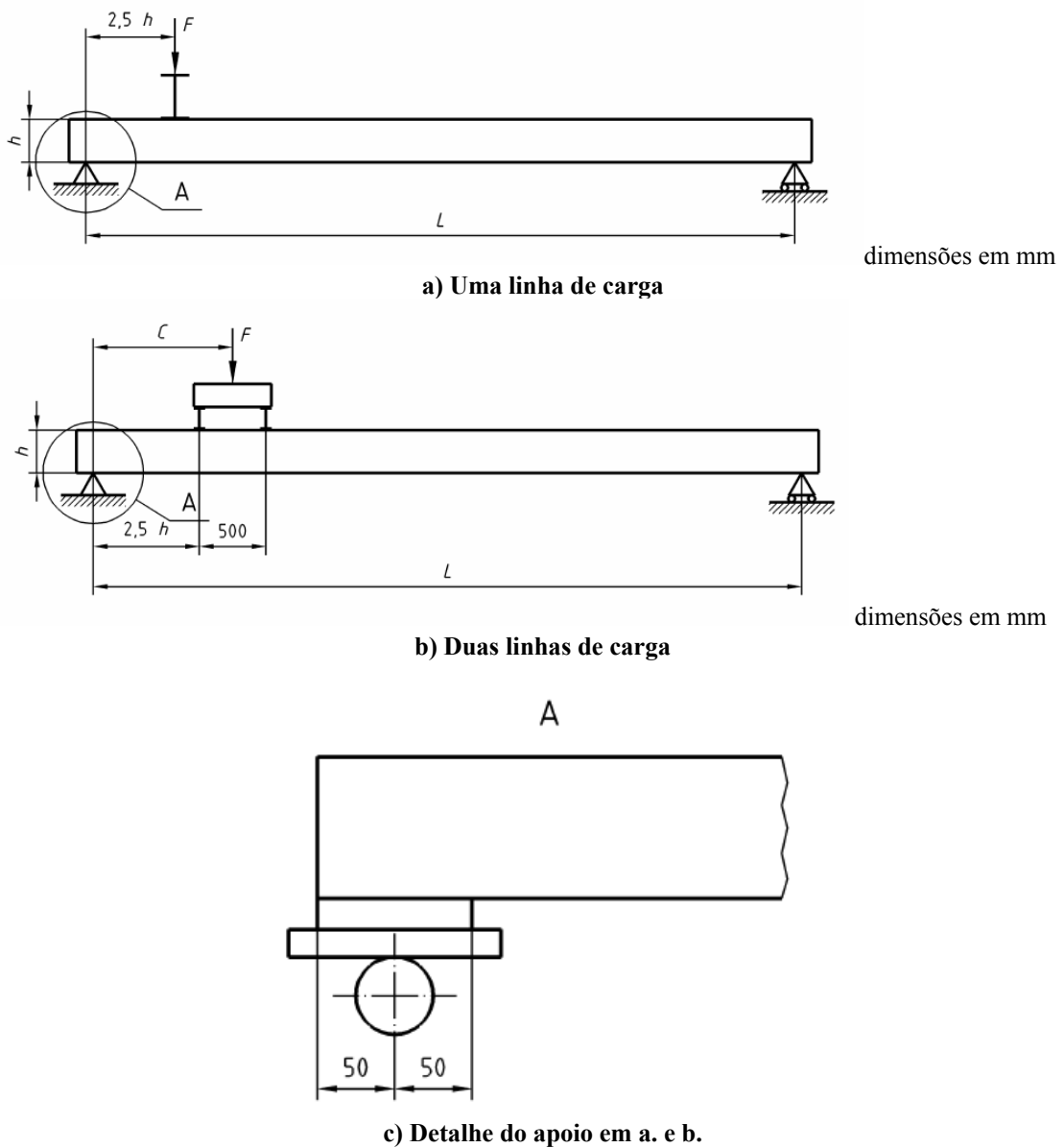


Figura 3.13: Possíveis arranjos para o ensaio [EN1168-2005].

3.7 Interpretação dos resultados do ensaio de cisalhamento

De acordo com a revisão que está sendo realizada da EN 1168, a aprovação da peça ensaiada só irá ocorrer se atender as seguintes condições:

$$V_{\text{test}} / V_{\text{calc}} \geq 0,95 \quad \text{para cada ensaio}$$

$$\text{Proporção } (V_{\text{test}} / V_{\text{calc}}) \geq 1,00 \text{ para a média de três ensaios}$$

Onde:

V_{calc} é a resistência ao cisalhamento última calculada para cada elemento ensaiado

V_{test} é a resistência ao cisalhamento última atual para cada elemento ensaiado

A proporção ($V_{\text{test}}/V_{\text{calc}}$) é o valor médio dos três valores de cada carga última atual e o correspondente esperado da carga última.

De acordo com a EN1168(2009), só dessa forma a confiabilidade do modelo de projeto é confirmada.

Se os resultados não cumprirem com os dois requerimentos anteriores, uma das seguintes ações deve ser tomada:

- melhorar a produção (máquinas e/ou misturador de concreto) e testar três novos elementos;
- ajustar o modelo do projeto para a concepção do produto.

Um novo documento publicado recentemente, a versão EN 1168:2005+A2:2009, indica que o modo de falha observado no ensaio deve corresponder ao modelo assumido no cálculo. Os resultados dos ensaios devem ser verificados com a carga última calculada F_{calc} .

A confiabilidade do modelo de projeto é confirmada se os seguintes requisitos são preenchidos:

$F_{\text{test}}/F_{\text{calc}} \geq 0,95$ para cada ensaio;

$F_{\text{test}}/F_{\text{calc}} \geq 1,00$ para a média de três ensaios.

Onde:

F_{calc} é a carga última calculada, correspondente ao modo de falha observado para cada elemento ensaiado;

F_{test} é a carga última atual para cada elemento ensaiado;

Proporção ($F_{\text{test}}/F_{\text{calc}}$) é o valor médio entre os três valores da divisão entre a carga última atual e o correspondente da carga última estimada.

3.8 Ensaio de Flexão

O objetivo deste ensaio é obter informações sobre a força de protensão e a resistência do concreto à tração na flexão. O ensaio de flexão pode ser feito, de acordo como manual FIP (1992), com a parte remanescente da peça utilizada no ensaio de cisalhamento. Nos ensaios realizados neste trabalho, preferiu-se não usar esta técnicas, usando então elementos para o ensaio à flexão e outros para os de cisalhamento. Quando se usa a mesma peça para ensaio à

flexão e ao cisalhamento, procura-se descartar a região já ensaiada (no cisalhamento), utilizando-se os 3 m posteriores. A força é aplicada no meio do vão. De acordo com a FIP (1992), é recomendado um ensaio de flexão padrão, que é realizado com uma laje de vão equivalente a 3m, sendo a força aplicada no meio do vão, como pode ser observado na Figura 3.14. Durante o ensaio, a força deve ser aumentada até ocorrerem fissuras por flexão. A partir daí, a laje é descarregada e carregada novamente. Assim, quando o momento de descompressão (M_0) for atingido, as fissuras abrirão novamente. Por meio do momento de fissuração (M_f) e do momento de descompressão (M_0), é possível obter a resistência à tração na flexão (f_{ctf}) e a tensão de protensão no aço (σ_p).

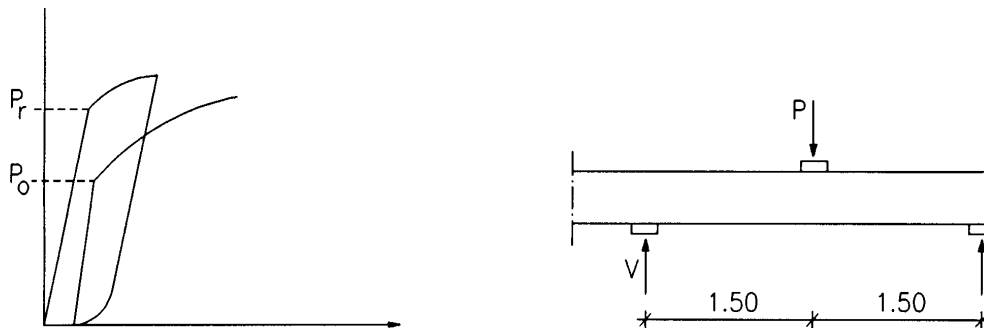


Figura 3.14: Ensaio para determinação da resistência do concreto à tração na flexão e da tensão de protensão no aço [FIP (1992)].

Em Ferreira et al. (2007) foram realizados ensaios de flexão seguindo as recomendações da FIP (1992), com vigas de 3m de vão, com e sem capa de preenchimento. Entretanto, os resultados experimentais obtidos com essas lajes revelaram uma forte interação dos mecanismos de flexão e de cisalhamento. Isso foi observado mais claramente nas lajes sem capa, a partir da obtenção de valores de momento último muito próximos do momento de fissuração, o que não era esperado nos cálculos teóricos. Além disso, nas lajes de 3m sem a presença da capa de preenchimento, os resultados teóricos de momento de fissuração e de momento resistente se apresentaram superiores aos valores experimentais. Assim, foram realizados novos ensaios para lajes com comprimento de 6m, visando definir um comprimento que fosse mais adequado para ensaios à flexão em lajes típicas no Brasil, com espessura de 200 mm. Com os ensaios de flexão para peças de 6m de vão, pôde-se observar que o comportamento na ruptura ocorreu de acordo com os princípios da teoria de flexão, sendo obtidos valores de momento último superiores, no caso de seções com capa, e próximos dos valores teóricos, no caso das lajes sem capa. Na Figura 3.15 mostra um esquema

representativo do setup utilizado durante os ensaios no laboratório. Já a Figura 3.16 é uma foto do ensaio de flexão realizado em laje de comprimento de 6,5m.

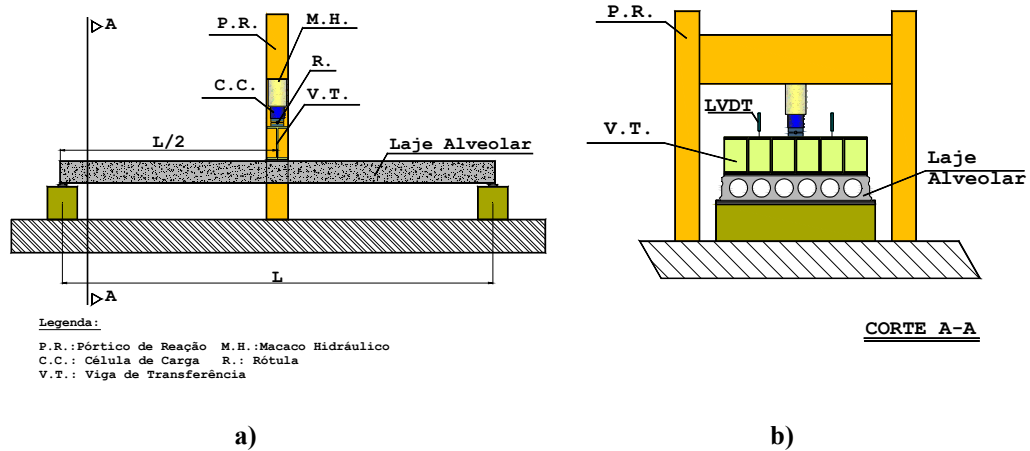


Figura 3.15: Desenho representativo do setup de ensaio de flexão:a) Vista lateral b) Vista frontal.



Figura 3.16: Ensaio de flexão de uma laje de 6,5 m no Laboratório do NETPRE-UFSCar.

Dessa forma, nos estudos desenvolvidos por Ferreira *et al.* (2007), foi observado que para ensaiar à flexão lajes alveolares tipicamente brasileiras, sem capa e sem nenhum preenchimento de alvéolo, o mais adequado é empregar lajes com 6m ou 30h de comprimento.

3.9 Ensaio com Interação de Cisalhamento e Flexão

Este tipo de ensaio é indicado para observar a interação da flexão com o cisalhamento. De acordo com o Research Report da FIP (1982), o carregamento deve ser aplicado a 1m de distância do apoio em uma laje de comprimento de 3m. De acordo com os ensaios realizados no NETPRE, este valor deve ser 5h ou 1m, já que o manual FIP (1982) utilizava lajes com 20 cm de altura (Figura 3.17).

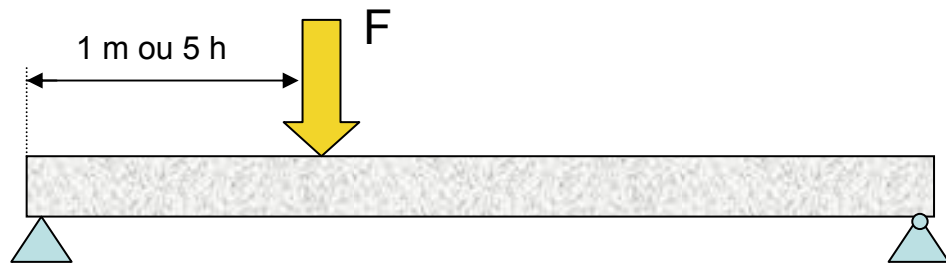


Figura 3.17: Ensaio de Interação de Cisalhamento e Flexão [FIP(1982)].

Mas de acordo com os ensaios realizados no NETPRE foi utilizado 5,75 h como distância do apoio até a aplicação da carga, como indicado na Figura 3.18 e Figura 3.19.

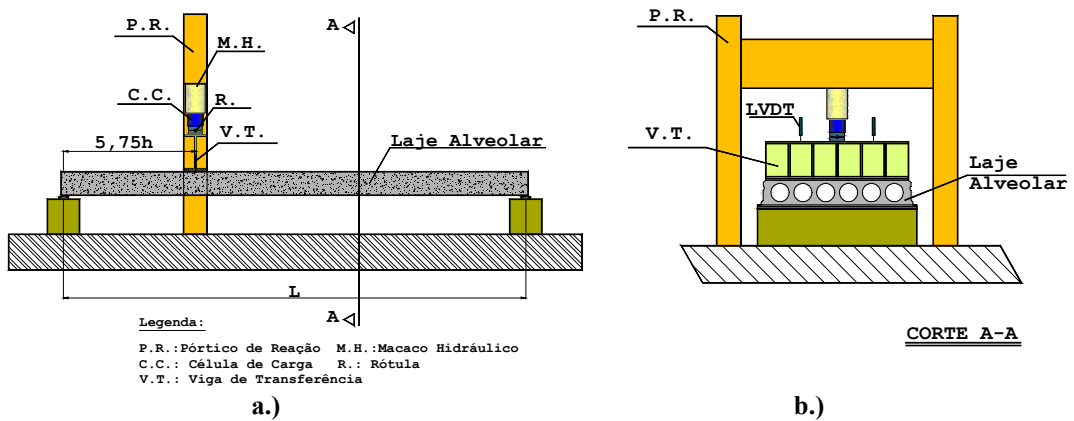


Figura 3.18 a) Esquema do ensaio com Interação de Cisalhamento e Flexão em lajes alveolares;
 b) Esquema da vista frontal.



Figura 3.19: Ensaio de Interação de Cisalhamento e Flexão realizado no Laboratório NETPRE-Ufscar.

3.10 Procedimentos para avaliação das resistências à tração e do módulo de elasticidade

Usando os ensaios de flexão ou cisalhamento já descritos, a partir dos resultados obtidos, pode-se tentar obter valores de resistência à tração e do módulo de elasticidade da peça. Isto pode ser feito através das fórmulas de modelos de cálculos já consagrados que são listados em seguida.

3.10.1 Avaliação de f_{ctm} a partir do momento de fissuração experimental

Considerando o esquema estrutural de uma viga bi-apoiada com uma carga concentrada como o usado no ensaio de flexão, cujo esquema é dado na Figura 3.20, pode-se calcular a resistência à tração do concreto. Isto feito usando a expressão do momento de fissuração e nesta isolando o valor da resistência à tração. Desta chega-se a expressão (3.3). Com os valores obtidos do ensaio e substituindo na expressão (3.3) obtêm-se o valor desejado.

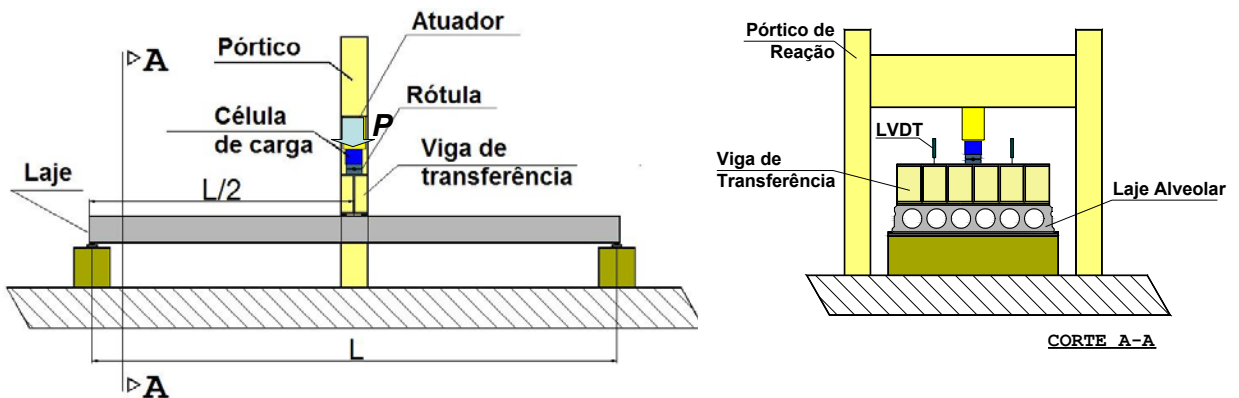


Figura 3.20 Esquema de ensaio de flexão que serve para determinar a resistência à tração do concreto de uma laje alveolar.

$$f_{ctm} = \left[\frac{N_p}{A_c} + \frac{N_p \times e_p \times y_t}{I_0} - \frac{M_{r,exp} \times y_t}{I_0} \right] / \alpha_f \quad (3.3)$$

onde:

$$M_{r,exp} = \frac{P_{r,exp} \times L}{4} + \frac{pp \times L^2}{8}$$

Momento de fissuração relativo à força aplicada no atuador, no momento da primeira fissura da laje (considerando o peso próprio da laje).

N_p - Força de protensão na data do ensaio (descontando as perdas calculadas para a data do ensaio).

A_c - Área de concreto considerando a geometria efetiva da laje ensaiada.

I_H – Momento de inércia da geometria homogênea da laje ensaiada.

e_p - excentricidade efetiva (valor médio para as posições das cordoalhas da laje ensaiada).

$$\alpha_f = 1,5$$

É importante observar que o resultado do f_{ctm} obtido por este procedimento é o mais representativo devido à menor variabilidade dos resultados para a formação do mecanismo de fissuração de flexão.

3.10.2 Verificação de f_{ctk} a partir da resistência ao cisalhamento experimental

De maneira análoga a anterior agora o valor da resistência à tração pode ser obtido a partir da expressão (3.4). Esta expressão nada mais é do que aquela que fornece o valor do cortante resistido por um painel alveolar, modificada de forma a conter o valor resistência à tração em função das demais variáveis. Os valores a serem empregados nesta expressão são obtidos do ensaio de cisalhamento cujo esquema estrutural está indicado na Figura 3.21.

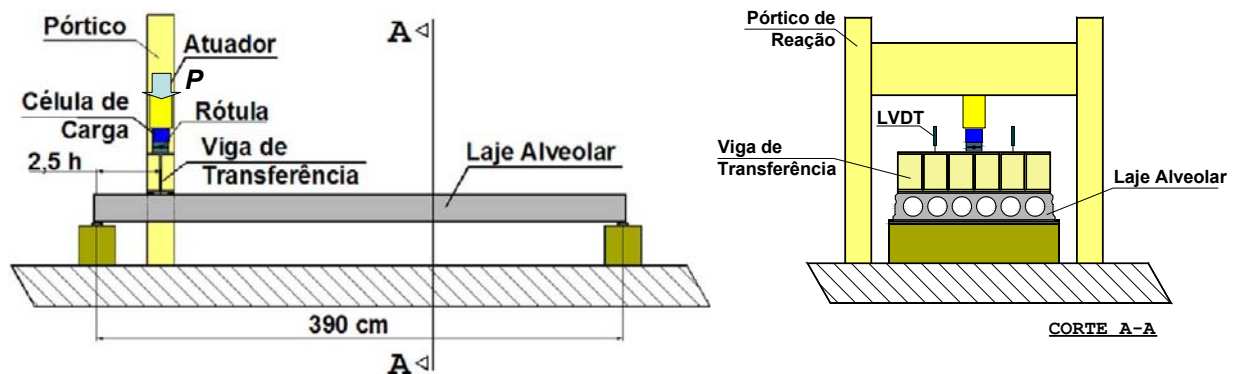


Figura 3.21 Esquema de ensaio de cisalhamento utilizado para determinar a resistência à tração do concreto de uma laje alveolar.

$$f_{ctm} = \left[\frac{(V_{R,exp} - 0,15 \times \sigma_{cp} \times d \times \sum b_w)}{(0,25 \times d \times \kappa \times \sum b_w \cdot (1,2 + 40 \times \rho))} \right] / 0,70 \quad (3.4)$$

onde:

$$V_{R,exp} = P_{exp} \cdot \left(\frac{L - 2,5 \times h}{L} \right) + \frac{pp \times L}{2}$$

$$\sigma_{cp} = N_p / A_c$$

N_p - Força de protensão na data do ensaio (descontando as perdas calculadas para a data do ensaio).

A_c - Área de concreto considerando a geometria efetiva da laje ensaiada.

d - altura efetiva da laje ensaiada (considerando a geometria efetiva e a posição média das cordoalhas).

$\sum b_w$ - somatória das larguras efetivas das nervuras da laje ensaiada.

$$\kappa = 1,6 - d$$

$$\rho = \frac{A_s}{d \times \sum b_w}$$

Observação a ser considerada: esta estimativa é mais para controle do desempenho da peça ao cisalhamento, uma vez que pode haver uma interação ou combinação dos mecanismos de fissuração (fissuras diagonal de cisalhamento, fissuras de flexão, fissuras por torção) nos ensaios de cisalhamento, o que pode conduzir a uma interpretação errônea dos resultados.

3.10.3 Avaliação de $E_{c,ef}$ a partir da flecha experimental

Também a mesma lógica dos itens anteriores pode-se determinar o valor módulo de elasticidade do concreto pode ser calculado através da leitura da flecha do ensaio de flexão. A Figura 3.22 mostra a localização dos LVDT para a obtenção da flecha durante o ensaio. Para calcular a flecha utiliza-se a equação 3.5.

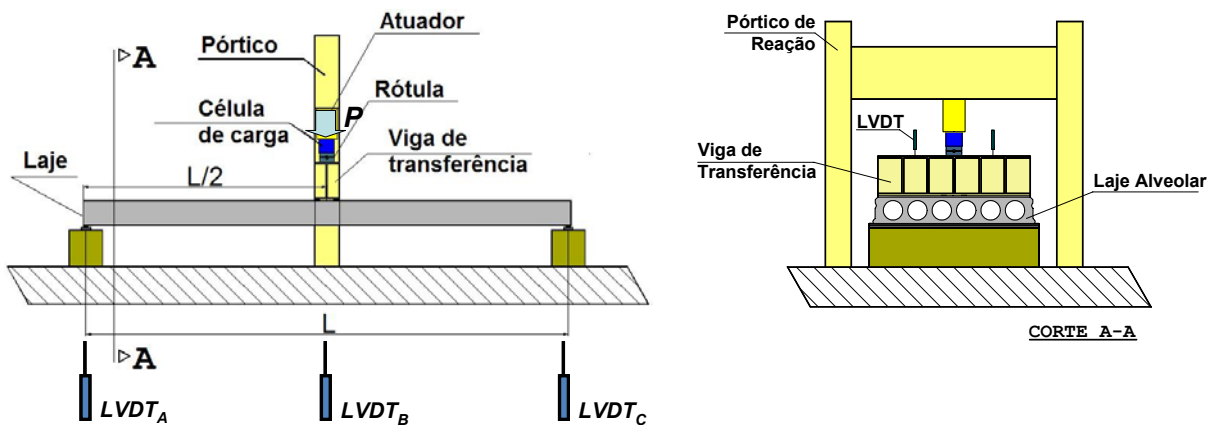


Figura 3.22 Utilização de sensores LVDT para indicação da leitura da flecha durante o ensaio de flexão.

a) Flecha experimental

$$a_{exp.} = LVDT_B - \frac{LVDT_A + LVDT_C}{2} \quad (3.5)$$

b) Estimativa do módulo de elasticidade

$$E_{c,ef} = \frac{P_{exp.}}{a_{exp.}} \cdot \left(\frac{L^3}{48I_0} \right) \quad (3.6)$$

Em todos os cálculos teóricos a serem realizados, é preciso lembrar que ao longo do tempo a resistência do concreto muda e a resistência dos cabos também; portanto, no dia do ensaio, devem ser considerados esses valores também.

3.11 Comparação dos resultados experimentais com cálculos teóricos

Neste item procura-se mostrar, de forma resumida, como se obtém os valores, denominados de teóricos em cada ensaio para poder comparar os resultados dos ensaios com estes valores e decidir pela aceitação do elemento ou não.

3.11.1 Resistência ao Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento de lajes alveolares pode ser calculada através da NBR-6118:2003, de acordo com a Equação 3.7:

$$V_{Rd} = \left[\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_t) + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (3.7)$$

Onde:

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

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c \quad (\text{com } \gamma_c = 1,0)$$

$$\rho = A_{s1} / b_w \cdot d$$

$$\sigma_{cp} = N_{sd} / A_{c, calc}$$

κ = coeficiente com os seguintes valores:

- para elementos em que 50% da armadura inferior não chega ao apoio: $\kappa = |1|$;

- para os demais casos: $\kappa = |1,6 - d|$ (não menor que 1), com d em metros.

A_{s1} é a área da armadura de tração que se estende até não menos que $d + L_{b,nec}$ além da seção considerada.

b_w é a largura mínima da seção ao longo da altura útil d (L_{pacp} – número de alvéolos x diâmetro dos alvéolos).

d = altura útil ($h_{laje} - d'$).

N_{sd} = força longitudinal na seção devida à protensão.

$\gamma_c = 1,0$, não sendo considerado no cálculo, neste caso.

$A_{c,calc}$ = área calculada de concreto nos painéis de laje alveolares.

Considerando a Equação 3.7, o aumento da capacidade ao esforço cortante atuante pode ser conseguido por meio do preenchimento dos alvéolos para aumentar a área da seção de concreto da laje na região em que o cortante atuante é maior que o máximo, sendo que este ganho é proporcional à área do concreto de preenchimento dos alvéolos.

A resistência de ruptura média nos ensaios, $V_{rup,méd}$, deve ser superior à resistência última de cálculo, V_{Ru} , calculada pela Equação 3.8, sem os coeficientes de minoração dos materiais:

$$V_{rup,méd} \geq V_{Ru} \quad (3.8)$$

O cisalhamento máximo de serviço, $V_{máx}$, na região do apoio da laje alveolar, foi aqui considerado pela relação dada na Equação 3.9.

$$V_{máx} \leq V_{Rd}/1,4 \quad (3.9)$$

Para a comparação com os resultados experimentais, foram calculados os valores teóricos da resistência ao cisalhamento, de acordo com a Equação 3.8, sem considerar os coeficientes de segurança previstos pela NBR 6118. Para a data de ensaio, considerou-se uma perda inicial de protensão de 10%.

Nos ensaios das lajes sem capa, a melhor aproximação entre a resistência de cálculo (sem coeficientes de ponderação) e a resistência experimental foi obtida quando se considerou a resistência à tração igual a 4,0 MPa. Por outro lado, para o caso corrente de projeto, onde a resistência de cisalhamento é calculada com base na resistência teórica à tração, calculada segundo a NBR-6118:2003, no caso com valor de 3,5 MPa, o coeficiente de segurança foi de $\lambda = 2,02$. Lembrando que o equacionamento recomendado pela NBR-6118:2003 está de acordo com a EN-1168:2005 e as recomendações da FIB (CEB-FIP), pode-se dizer que os valores para o esforço máximo de cisalhamento de cálculo atenderam aos critérios de segurança dessas normas para todas as lajes sem capa ensaiadas, com a exceção de um caso de um ensaio de uma laje sem capa e sem preenchimento dos alvéolos.

Em ambos os casos de lajes com capa (com tela e com fibras), a contribuição da capa foi significativa para o aumento da resistência ao cisalhamento, com alguma vantagem para o caso da capa com fibra. Em geral, o coeficiente de segurança ficou entre de $2,30 < \lambda < 3,11$. A

razão para isto é que, na equação da resistência ao cisalhamento, considera-se uma seção com largura efetiva igual ao somatório das espessuras das nervuras (na sua parte mais estreita), em toda a sua altura, subestimando a seção no caso da laje com capa.

Em terceiro lugar, observa-se que o preenchimento dos alvéolos (para lajes sem capa) não resultou em um aumento da resistência ao cisalhamento de forma proporcional ao aumento da área preenchida, onde para o cálculo teórico se considera toda a área preenchida bem como a largura efetiva da laje, somando as espessuras das nervuras mais os diâmetros dos alvéolos preenchidos. Nesses casos, o coeficiente de segurança ficou em torno de $1,55 < \lambda < 1,70$ para o caso de lajes com preenchimentos de dois alvéolos, mas para o caso das lajes com preenchimento de quatro alvéolos esses valores ficaram entre $1,20 < \lambda < 1,31$, com pouca folga. Entretanto, cabe ressaltar o efeito favorável do preenchimento dos alvéolos no sentido de aumentar a resistência à torção do elemento de laje, o que deve explicar o fato de que, no caso dos ensaios de apoio padrão de lajes sem capa (com preenchimento de alvéolos), as resistências de ensaio foram muito próximas umas das outras.

Para que se consiga um efeito desfavorável da flexão sobre o mecanismo de resistência ao cisalhamento, o ensaio de apoio padronizado, recomendado pelo manual da FIP (1992) e pela norma EN-1168:2005, estabelece que a carga sobre a laje seja aplicada a uma distância de 2,5h do apoio mais solicitado, cujo arranjo de ensaio está ilustrado na Figura 3.12. O comprimento da laje deve ser igual ao maior dos valores: de 4 m ou 15h. A velocidade do carregamento é estabelecida dentro do procedimento padronizado.

3.11.2 Resistência à Flexão

O modelo teórico utilizado para o cálculo da resistência à flexão, o qual foi utilizado para comparação com os valores experimentais, está apresentado no Anexo B. Esse modelo está baseado nos critérios clássicos do cálculo de concreto protendido e está de acordo com a NBR-6118:2003. Na Tabela 4.4 são apresentadas comparações entre os resultados experimentais e os valores calculados, já descontando o momento devido ao peso próprio da laje ensaiada (conforme apresentado no Anexo B).

Conforme pode ser observado na Tabela 4.4, os resultados experimentais estão todos acima dos valores teóricos, com exceção dos ensaios das lajes sem capa para 3 m de vão. De fato, esta foi a razão pela qual se decidiu realizar novos ensaios, mas para vãos maiores (6 m). Entretanto, no caso das lajes sem capa (3 m) com preenchimento dos alvéolos, onde a

resistência ao cisalhamento é maior, os momentos últimos experimentais foram superiores aos valores de cálculo.

3.12 Procedimento para fazer análise dos resultados

A seguir será apresentado um resumo para a realização da análise dos resultados experimentais dos ensaios de cisalhamento e de flexão.

3.12.1 Capacidade resistente ao cisalhamento

Deve ser feita a comparação das resistências atingidas nos ensaios com as resistências teóricas. Para isto, as resistências experimentais devem considerar as cortantes últimas aplicadas (devido à força aplicada no atuador) mais as cortantes devidas ao peso próprio da laje e da viga metálica.

Pode-se fazer o cálculo do fim para o começo, com base no V_{Rk} , onde são descontadas as cortantes devidas ao peso próprio da laje e da viga metálica, para obter a máxima força cortante aplicada no ensaio. Com base nesse valor obtém-se a carga máxima aplicada prevista:

$$P_{\max} = V_{\max} * (L/0.897L) \quad (3.10)$$

$$V_{\max} = V_{Rk} - V_{(PP)} \quad (3.11)$$

3.12.2 Capacidade ao Momento Fletor

Como no item anterior, deve-se fazer a comparação das resistências atingidas nos ensaios com as resistências teóricas. Para isto, as resistências experimentais devem considerar os momentos últimos aplicados (devidos à força aplicada no atuador) mais os momentos devidos ao peso próprio da laje e da viga metálica.

Pode-se fazer o cálculo do fim para o começo, com base no M_{Rk} , onde são descontados os momentos devido ao peso próprio da laje e da viga metálica, para obter o momento máximo aplicado no ensaio e, com base nesse valor se obtém-se a carga máxima aplicada prevista:

$$P_{\max} = 4M_{\max}/L \quad (3.12)$$

3.12.3 Momento de fissuração

De forma análoga aos dois itens anteriores, deve ser feita a comparação dos momentos efetivos de fissuração com os valores teóricos. Para isto, os valores experimentais devem considerar os momentos aplicados, relativos à fissuração, mais os momentos devidos ao peso próprio da laje e da viga metálica.

Alternativamente, pode-se fazer o cálculo inverso, com base no M_r , onde são descontados os momentos devidos ao peso próprio da laje e da viga metálica, para obter o momento aplicado esperado na fissuração. A partir desse valor se obtém-se a carga aplicada prevista para a fissuração:

$$P_r = 4M_{r2}/L \quad (3.13)$$

$$M_{r2} = M_{r,Téo} - M_{(peso\ próprio)} \quad (3.14)$$

Capítulo 4

4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS LAJES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios dos programas experimentais de lajes alveolares realizados pelo NETPRE (Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto) entre os anos de 2006 e 2009. Esses ensaios foram desenvolvidos com a cooperação de três fabricantes nacionais de laje alveolar. Parte dos resultados foram apresentados nos trabalhos de Fernandes (2007) e Ferreira et al.(2007). A partir dos ensaios é possível avaliar o desempenho dessas peças. A seguir é apresentado um breve resumo dos exemplos constantes no presente trabalho:

- Verificação dos Valores Característicos de Esforços Solicitantes de Lajes sem Capa (Avaliação de desempenho);
- Verificação dos Valores Característicos de Esforços Solicitantes de Lajes com Capa (Avaliação de desempenho);
- Determinação do valor da resistência à tração do concreto do elemento (f_{ctm}) a partir do momento de fissuração experimental;
- Estimativa do módulo de elasticidade do concreto da peça (E_c) a partir das medidas de flecha em ensaio de flexão;
- Verificação dos Valores Característicos de Esforços Solicitantes de Lajes com preenchimento de dois alvéolos (Avaliação de desempenho).

No quadro 4.1 a seguir são mostrados os exemplos contidos neste capítulo e os itens analisados.

Quadro 4.1: Resumo dos exemplos desenvolvidos no capítulo

<i>Exemplo 1:</i> laje alveolar sem capa	Cisalhamento Flexão Flexão-cisalhamento
<i>Exemplo 2:</i> laje com capa	Cisalhamento Flexão
<i>Exemplo 3</i>	Verificação de f_{ck} Verificação de E_c
<i>Exemplo 4 :</i> preenchimento dos alvéolos	Sem fibra Cisalhamento Com fibra

4.1. Exemplo 1 – Avaliação de desempenho em lajes sem capa ($h = 200$ mm e $h=150$ mm) para flexão e cisalhamento

Neste primeiro exemplo, são avaliados os elementos de laje alveolar sem capa para três tipos de ensaios: cisalhamento, flexão e interação cisalhamento e flexão. Procura-se mostrar os principais valores obtidos nos ensaios e os correspondentes valores teóricos obtidos, sem empregar os coeficientes de segurança para poder fazer a avaliação de desempenho. Também os resultados são agrupados por empresa, pois há pequenas variações de medidas nas lajes e também há variação na quantidade de armadura longitudinal empregada, ou seja, não deve ser comparado, por exemplo, o produto da empresa A com o da B, e sim os valores de ensaio e o correspondente resultado teórico esperado.

Serão apresentados os resultados de ensaios realizados em lajes com altura igual a 200 mm e 150 mm, sem capa.

Procura-se sempre mostrar os valores numéricos e gráficos de barra para uma rápida visualização dos resultados obtidos.

4.1.1 Ensaios de cisalhamento

Neste exemplo, são utilizados os resultados dos ensaios de cisalhamento realizados em lotes de lajes alveolares de três empresas, denominados Lote A, Lote B e Lote C. Esses ensaios foram realizados dentro de um convênio universidade-empresa.

As características geométricas e produtivas das lajes utilizadas nos ensaios estão no Anexo C.

Para a realização desses ensaios, foram tomadas como base as recomendações do manual FIB (CEP-FIP, 1992) bem como a norma EN-1168:2003.

As peças aqui ensaiadas foram submetidas a uma carga concentrada aplicada a uma distância do apoio de $a_v=2,5 h$, sendo que esta distância para a laje de 150 mm é igual a 375 mm, e para lajes de 200 mm de altura esta distância de aplicação foi de 500mm.

De acordo com o manual da FIB (1992), a peça ensaiada deve ter no mínimo 4,0 m de comprimento. As lajes da Lote A possuíam 4,0 m de comprimento. Já as lajes do Lote B apresentaram 6,5m de comprimento. E, por último, as lajes da Lote C possuíam os seguintes comprimentos: 4,0 m, 4,15 m e 4,65 m.

Como mostra o texto do manual da FIB (2000), a ruptura de uma laje alveolar submetida a ensaios de cisalhamento pode ocorrer de duas maneiras: quando a tensão de cisalhamento supera a resistência à tração diagonal do concreto na nervura do alvéolo; ou quando a tensão de cisalhamento se combina com as tensões de tração oriundas da protensão ou da flexão da peça.

Com a expressão do item 19.4.1. da NBR-6118:2003, dada a seguir para lajes sem armadura para força cortante, é possível calcular o valor do cortante teórico característico, ou seja, aplicar na expressão 4.1 os valores sem coeficientes de segurança.

$$V_{Rdf} = [\tau_{Rd} \cdot k(1,2 + 40\rho_1) + 0,15\sigma_{cp}] b_w \cdot d \quad (4.1)$$

Onde:

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

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

$$\rho_1 = A_{s1}/b_w \cdot d, \text{ não maior que } 0,02$$

$$\sigma_{cp} = N_{sd}/A_c ; N_{sd} - \text{Força de protensão de projeto}$$

k é um coeficiente que tem os seguintes valores:

- para elementos onde 50% da armadura inferior não chega até o apoio: $k = |1|$;
- para os demais casos: $k = |1,6 - d|$, não menor que $|1|$, com d em metros;

Para fazer as verificações usa-se a nomenclatura indicada a seguir:

$V_{s,máx}$: cortante máxima de serviço;

V_{Rk} : cortante característica (capacidade final de carga da seção sem nenhum coeficiente de ponderação);

$V_{u,exp}$: Força cortante última no ensaio (valor retirado do gráfico, somando o peso próprio);

$M_{u,exp}$: momento último, correspondente a $V_{u,exp}$, obtido no ensaio (somando o momento correspondente ao peso próprio);

M_{Rk} : momento resistente característico (calculado considerando a seção do ponto de aplicação da carga, sem nenhum coeficiente de segurança);

ℓ_p : distância de regularização da protensão;

$F_{p,seção}$: força de protensão na seção do ponto de aplicação da carga;

M_r : momento de fissuração (considerando a seção do ponto de aplicação da carga).

O critério utilizado para verificação e análise do ensaio, que será chamado de índice de comparação, é baseado na relação entre os resultados experimentais e o teórico para cada ensaio, ou seja: $V_{exp}/V_{teor} \geq 0,95$.

a) Lote A

Os valores teóricos e os experimentais encontrados nos ensaios de cisalhamento e os respectivos índices de comparação são observados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Comparação entre os resultados experimentais e os teóricos para as lajes do Lote A obtidos nos ensaios de cisalhamento.

Laje	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{Rk} (kN)	$\lambda_R = \frac{V_{u,exp}}{V_{Rk}}$	$V_{s,máx}$ (kN)	$\lambda_s = \frac{V_{u,exp}}{V_{s,máx}}$
L01-20-SC-5_A	124,83	102,66	1,22	58,34	2,14
L02-20-SC-5_A	124,22	102,66	1,21	58,34	2,13
L03-20-SC-5_A	144,61	102,66	1,41	58,34	2,48
L04-20-SC-5_A	115,29	102,66	1,12	58,34	1,98
L05-20-SC-5_A	90,97	102,66	0,89	58,34	1,56

Observa-se na Tabela 4.1 que todas as lajes ensaiadas atenderam ao índice de comparação, menos a laje “L05-20-SC-5_A”, cujo valor foi menor que 0,95.

Na Figura 4.1, o gráfico de barras ilustra a comparação entre os valores teóricos e os experimentais da força cortante.

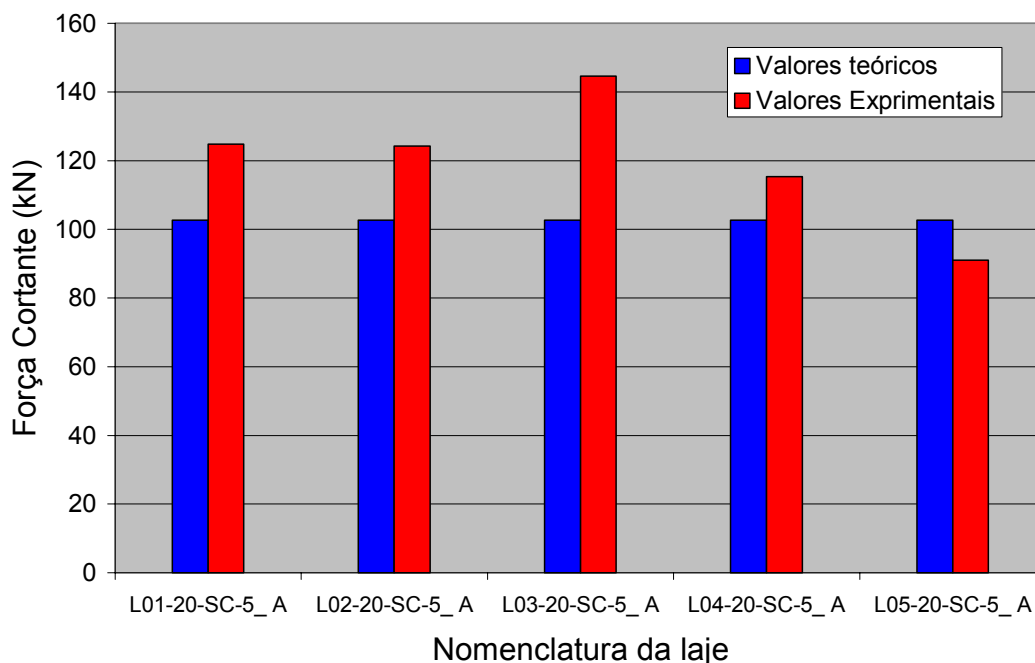


Figura 4.1: Comparação entre os valores teóricos e experimentais da Força Cortante das lajes do Lote A.

A partir dos resultados dos ensaios, observa-se que as lajes possuíam comportamento semelhante, ocorrendo interação de cisalhamento e flexão, sendo que apenas na última delas houve efeito combinado entre cisalhamento, flexão e torção. A Figura 4.2 é mostra a

configuração de fissuração, sendo possível perceber fissuras de cisalhamento com interação da flexão.

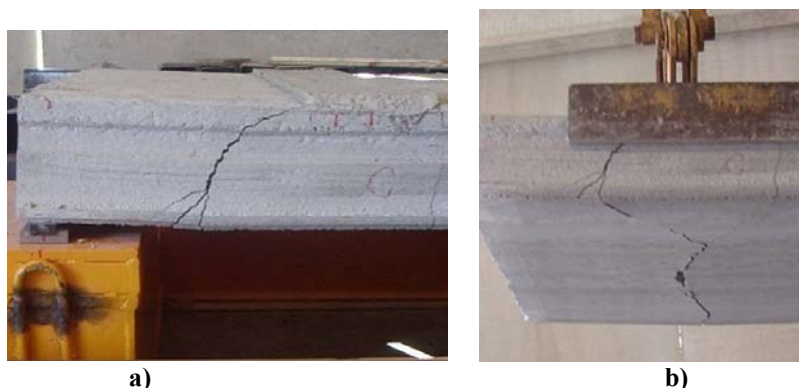


Figura 4.2: Ocorrência de fissuras na laje ensaiada ao cisalhamento: a) Abertura de fissura de cisalhamento com interação de flexão na lateral da laje; b) Abertura de fissuras na parte inferior da laje.

b) Lote B

Os valores experimentais encontrados a partir dos ensaios de cisalhamento, os valores teóricos e o índice de comparação são observados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Comparação entre os resultados experimentais e teóricos para as lajes do Lote B obtidos no ensaio de cisalhamento.

Laje	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{Rk} (kN)	$\lambda_R = \frac{V_{u,exp}}{V_{Rk}}$	$V_{s,m\acute{a}x}$ (kN)	$\lambda_s = \frac{V_{u,exp}}{V_{s,m\acute{a}x}}$
L05-20-SC-8_B	222,39	171,20	1,30	98,84	2,25

Observa-se na Tabela 4.2 que a laje ensaiada atendeu ao índice de comparação, sendo maior que 0,95.

Na Figura 4.3, o gráfico de barras ilustra a comparação entre os valores teóricos e os experimentais da força cortante.

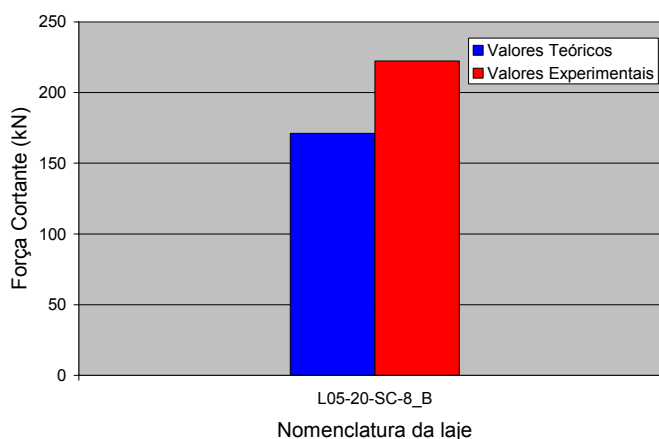


Figura 4.3: Comparação entre os valores teóricos e os experimentais da força cortante das lajes.

A título ilustrativo, apresenta-se na Figura 4.4 o aspecto da extremidade da laje ensaiada ao cisalhamento.



Figura 4.4: Abertura de fissuras durante o ensaio de cisalhamento: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista lateral - lado direito.

c) Lote C

Os valores experimentais encontrados a partir dos ensaios de cisalhamento, os valores teóricos e o índice de comparação são observados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Comparação entre os resultados experimentais e os teóricos para as lajes do Lote C, relativos ao ensaio de cisalhamento.

Laje	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{Rk} (kN)	$\lambda_R = \frac{V_{u,exp}}{V_{Rk}}$	$V_{s,máx}$ (kN)	$\lambda_s = \frac{V_{u,exp}}{V_{s,máx}}$
L02-20-SC-6_C	125,14	112,86	1,11	64,29	1,95
L03-20-SC-6_C	163,46	122,24	1,34	69,80	2,34
L04-20-SC-6_C	144,51	119,31	1,21	68,10	2,12
L09-20-SC-7_C	121,71	94,75	1,28	52,91	2,30
L10-20-SC-7_C	137,04	95,43	1,44	53,17	2,58
L11-20-SC-7_C	142,17	95,50	1,49	53,26	2,67
L13-20-SC-7_C	135,44	97,24	1,39	54,23	2,50

Observa-se na Tabela 4.3 que as lajes ensaiadas atenderam ao índice de comparação, sendo λ_R maior que 0,95 para todos os modelos.

Na Figura 4.5, o gráfico de barras ilustra a comparação entre os valores teóricos e os experimentais da força cortante.

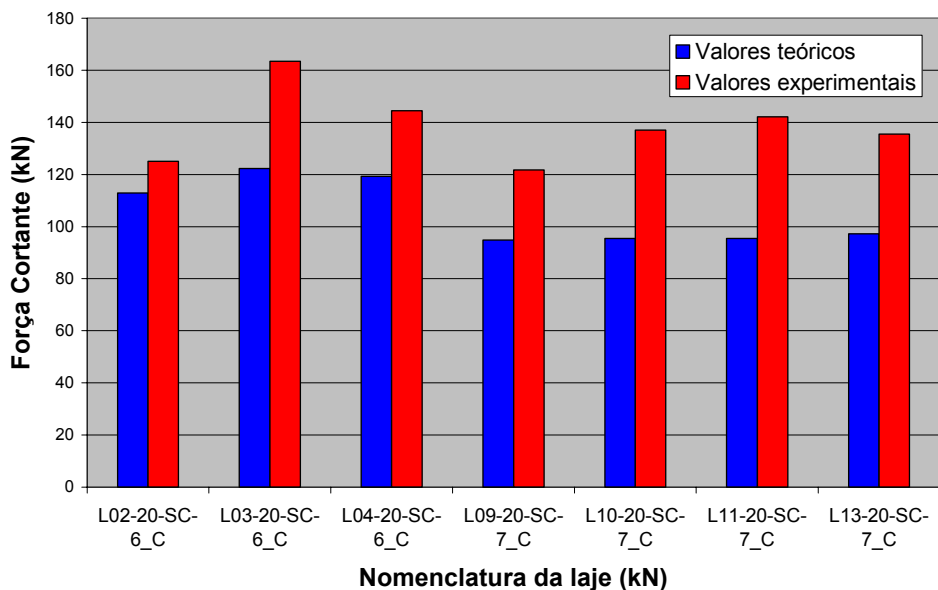


Figura 4.5: Comparação entre os valores teóricos e os experimentais da força cortante das lajes da empresa C.

Nas figuras de 4.6 a 4.11, são apresentados as configurações das fissuras nos ensaios de cisalhamento, mostrando o tipo de abertura de fissura e a combinação de efeito.

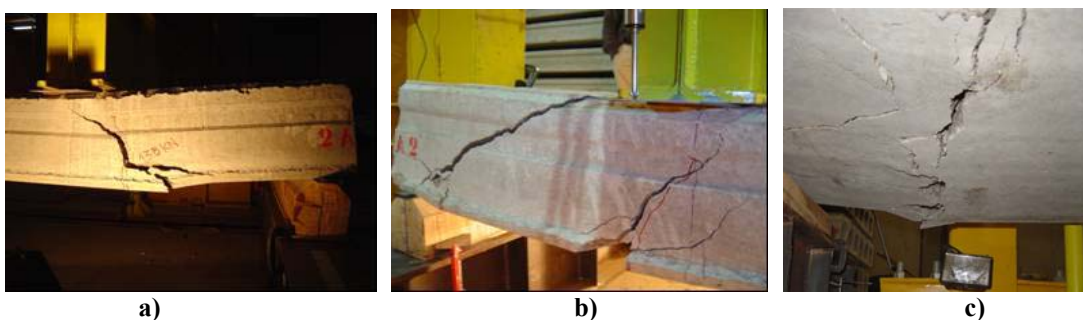


Figura 4.6: Abertura de fissura da laje L02-20-SC-6_C: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista lateral - lado direito; c) Parte inferior da laje.

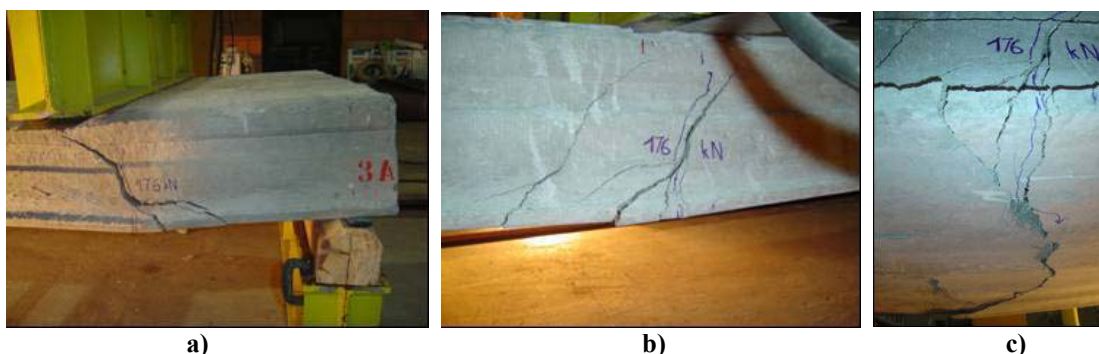


Figura 4.7: Abertura de fissura da laje L03-20-SC-6_C: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista lateral - lado direito; c) Parte inferior da laje.



Figura 4.8: Abertura de fissura da laje L04-20-SC-6_C: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista lateral - lado direito.

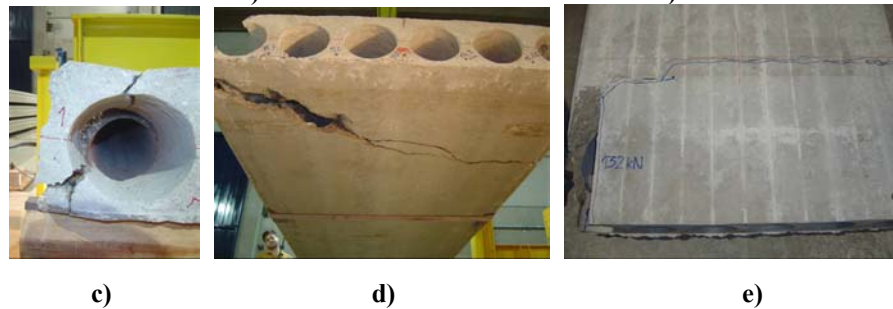


Figura 4.9: Abertura de fissura da laje L09-20-SC-7_C: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista lateral - lado direito; c) Abertura de fissura no alveolo; d) Vista superior da laje.

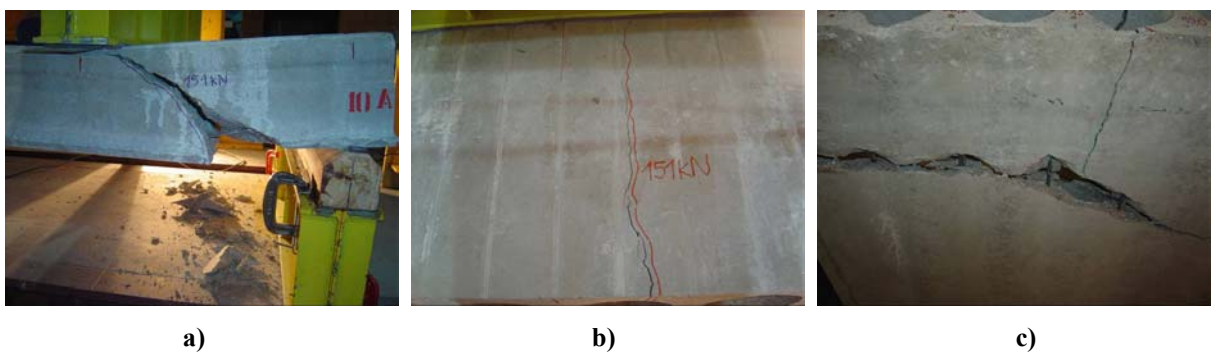


Figura 4.10: Abertura de fissura da laje L10-20-SC-7_C: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista Superior da laje, fissura longitudinal; c) Vista inferior da laje.

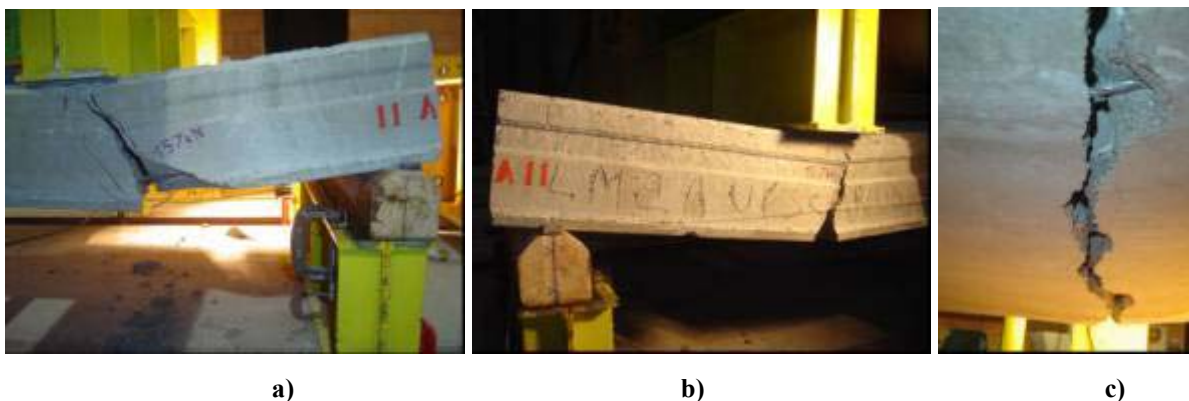


Figura 4.11: Abertura de fissura da laje L11-20-SC-7_C: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista lateral - lado direito; c) Vista inferior da laje.

Com os resultados dos ensaios a cisalhamento das três empresas pode-se fazer um gráfico (Figura 4.12) onde se apresenta a relação entre o valor experimental e o teórico. Apenas um dos modelos resultou em valor inferior à unidade, e em quase todos foram maiores que 0,95, valor recomendado pela norma EN 1168 (2003).

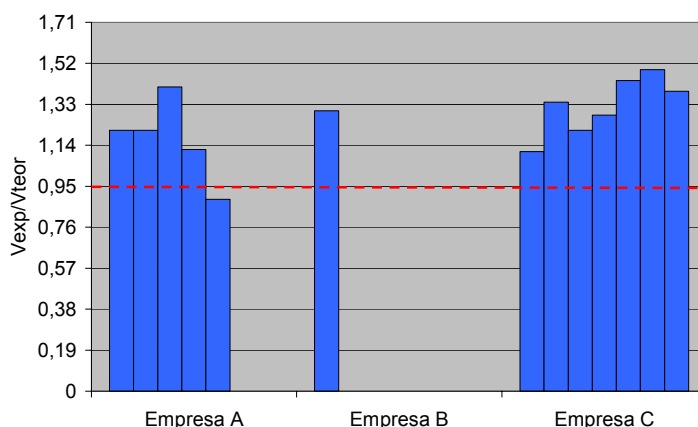


Figura 4.12: Comparação entre os valores de cortante obtidos no ensaio e no cálculo teórico, para as diversas empresas (V_{exp}/V_{teor}).

4.1.2 Ensaios de flexão do Lote A, com comprimentos $L = 3$ m e $L = 6$ m, e do Lote B, com comprimento $L=6,4$ m

Para o cálculo do valor do momento fletor teórico resistido usa-se a teoria normal de concreto protendido, como pode ser visto em CARVALHO (2009) e no resumo dado no Anexo B. Neste caso são sempre avaliadas as perdas de protensão, e também não se considera os coeficientes de minoração das resistências dos materiais.

a) Lote A

São apresentados resultados de ensaios de cinco lajes de altura de 20 cm, na Tabela 4.4 e no gráfico da Figura 4.13.

Tabela 4.4: Comparação entre os resultados experimentais e teóricos para as lajes do Lote A, obtidos no ensaio de flexão realizado com peças com 3,0m de comprimento.

Laje	$M_{u,exp}$ (kN.m)	M_{Rk} (kN.m)	$\frac{M_{u,exp}}{M_{Rk}}$	$M_{r,exp}$ (kN.m)	M_r (kN.m)	$\frac{M_{r,exp}}{M_r}$
L06-20-SC-5_A	109,70	135,65	0,81	101,22	93,11	1,09
L07-20-SC-5_A	125,30	135,65	0,92	107,00	93,11	1,15
L08-20-SC-5_A	102,42	135,65	0,75	99,80	93,11	1,07
L09-20-SC-5_A	97,17	135,65	0,72	97,17	93,11	1,04
L10-20-SC-5_A	100,40	135,65	0,74	86,15	93,11	0,93

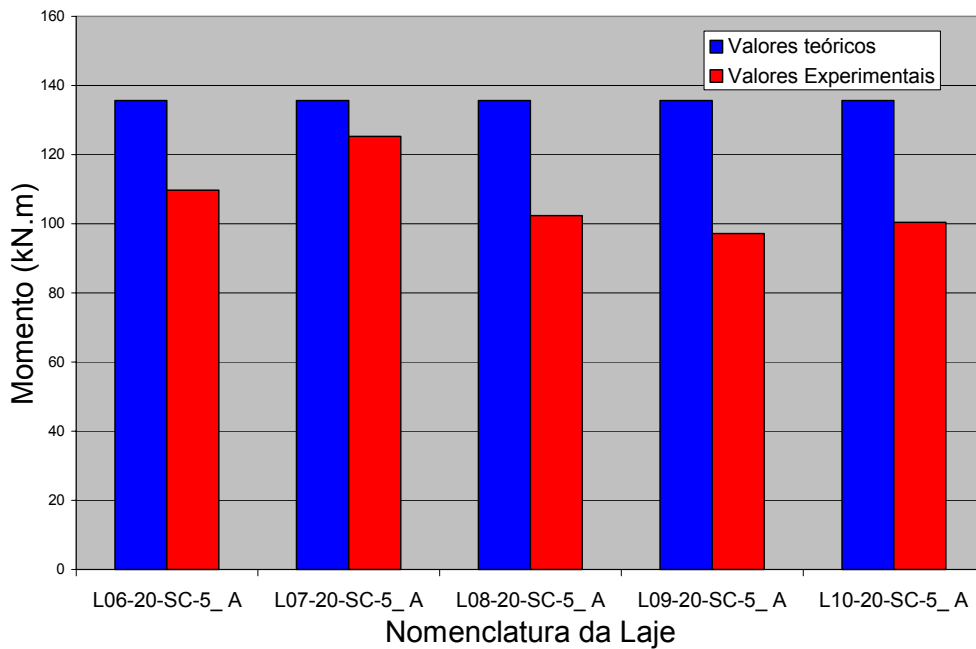


Figura 4.13: Comparação entre os valores de momento fletor obtidos nos ensaios e no cálculo teórico, para o Lote A, com lajes ensaiadas com comprimento de 3m

A título ilustrativo, na Figura 4.14 é observada a interação das fissuras de flexão com as de cisalhamento, para os ensaios de flexão realizados em peças de 3 m.



Figura 4.14: Ensaio de Flexão - Abertura de fissura para laje com vão de 3,0m: a) Vista lateral - lado esquerdo; b) Vista lateral - lado direito.

Para todos os protótipos deste ensaio de flexão, percebe-se que os momentos obtidos no ensaio (experimental) são inferiores ao teórico. O motivo desses resultados pode ser explicado pela interação da força cortante com o momento fletor, como pode ser visto em FERNANDES (2007). Isto levou a se realizar ensaios com modelos de vão maior (6,0 m), onde se pode avaliar melhor o comportamento da flexão (sem interação do cisalhamento). Assim, para o mesmo lote, fez-se mais um ensaio, com o protótipo com vão de 6 m, com os resultados apresentados na Tabela 4.5 e na Figura 4.15. Como pode ser visto neste caso, há concordância entre o valor de ensaio e o calculado de forma teórica.

Tabela 4.5: Comparação entre os resultados experimentais e teóricos para as lajes do Lote A, obtidos no ensaio de flexão realizado com peças com 6,0m de comprimento.

Laje	$M_{u,exp}$ (kN.m)	M_{Rk} (kN.m)	$\frac{M_{u,exp}}{M_{Rk}}$	$M_{r,exp}$ (kN.m)	M_r (kN.m)	$\frac{M_{r,exp}}{M_r}$
L11-20-SC-5_A	135,65	135,60	1,00	95,00	93,89	1,01

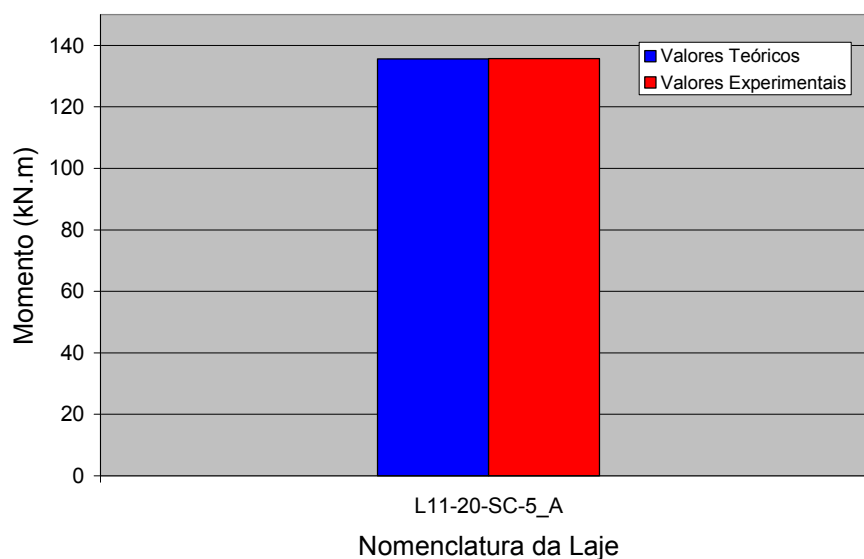


Figura 4.15: Comparação entre os valores de momento fletor obtidos no ensaio e no cálculo teórico, para o Lote A com laje ensaiada com comprimento de 6m.

b) Lote B

São apresentados resultados de ensaios de duas lajes de altura de 20 cm e duas de 15 cm, com os resultados e cálculos apresentados na Tabela 4.6 e nos gráficos da Figura 4.16.

Tabela 4.6: Comparação entre os resultados experimentais e teóricos para as lajes do Lote A, obtidos no ensaio de flexão realizado com peças com 6,0m de comprimento.

Laje	h (cm)	$M_{u,exp}$ (kN.m)	M_{Rk} (kN.m)	$\frac{M_{u,exp}}{M_{Rk}}$	$M_{r,exp}$ (kN.m)	M_r (kN.m)	$\frac{M_{r,exp}}{M_r}$
L11-20-SC-8_B	20	224,19	218,58	1,03	131,82	146,85	0,90
L12-20-SC-8_B	20	245,92	218,62	1,12	142,19	146,68	0,97
L07-15-SC-6_B	15	79,89	65,33	1,22	64,43	56,13	1,15
L09-15-CC-6_B	15	103,94	92,20	1,13	91,50	86,68	1,06

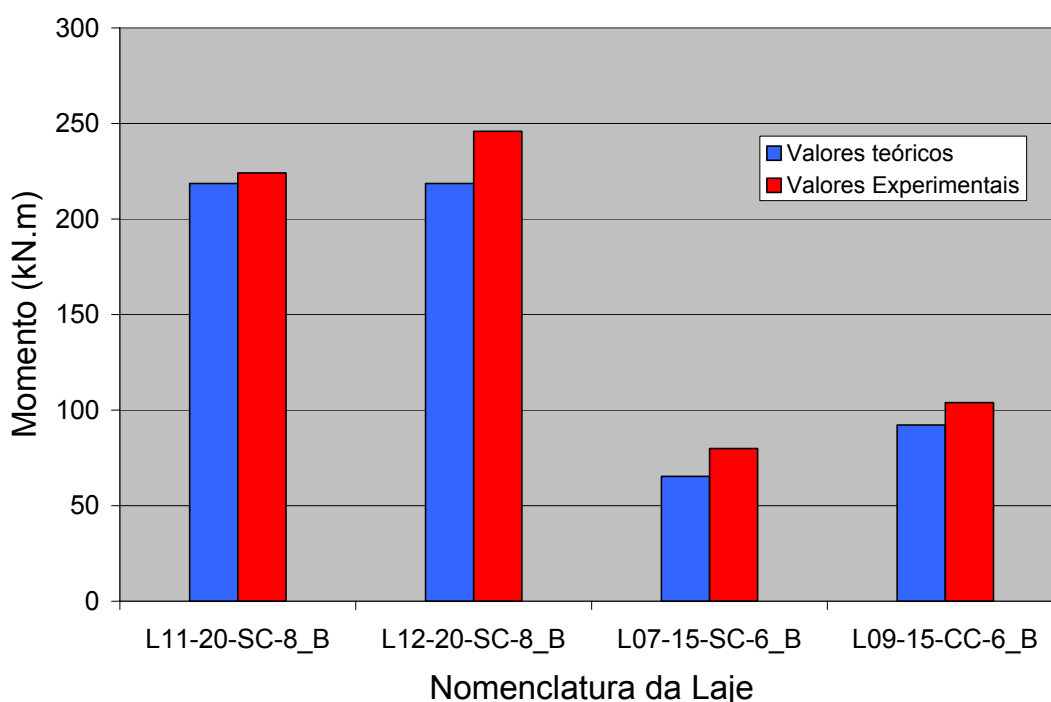


Figura 4.16: Comparação entre os valores de momento fletor obtidos nos ensaios e nos cálculos teóricos para o Lote B, com laje ensaiada com comprimento de 6m, lajes com altura igual a 200 mm e 150 mm.

Cabe frisar que todos os resultados teóricos, como esperado, foram superiores aos obtidos experimentalmente, mostrando que a escolha de um vão de 6m é primordial para a análise da flexão sem interação com cisalhamento.

4.1.3 Ensaios de Interação Flexão-Cisalhamento ($a_v = 5,75 h$)

Nestes dois ensaios o ponto de aplicação da carga concentrada está distante do apoio 5,75 vezes o valor da altura da laje, ou seja $5,75h$. O cálculo do cortante teórico característico foi feito da mesma forma que no item 4.1.1, uma vez que a fórmula usada pela NBR 6118:2003 e do EUROCODE são sempre as mesmas, para qualquer situação.

Aqui todas as peças referem-se ao fabricante C. A Tabela 4.7 ilustra uma comparação entre os resultados experimentais e os teóricos.

Tabela 4.7: Comparação entre os resultados experimentais e os teóricos para as lajes do Lote C, para análise de flexão e cisalhamento (comprimento de 4,65 m).

Laje	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{Rk} (kN)	$\lambda_R = \frac{V_{u,exp}}{V_{Rk}}$	$V_{s,m\acute{a}x}$ (kN)	$\lambda_s = \frac{V_{u,exp}}{V_{s,m\acute{a}x}}$
L14-20-SC-7_C	97,22	94,86	1,02	53,03	1,83
L15-20-SC-7_C	91,48	92,64	0,99	51,77	1,77

Apesar do momento fletor teórico ser inferior ao experimental, pelo menos no Lote B, o cortante experimental é ligeiramente inferior ao teórico, mostrando que esta é uma situação de posicionamento limítrofe da carga, para a interação entre cortante e cisalhamento. Na Figura 4.17 vê-se a característica da fissuração final da laje.

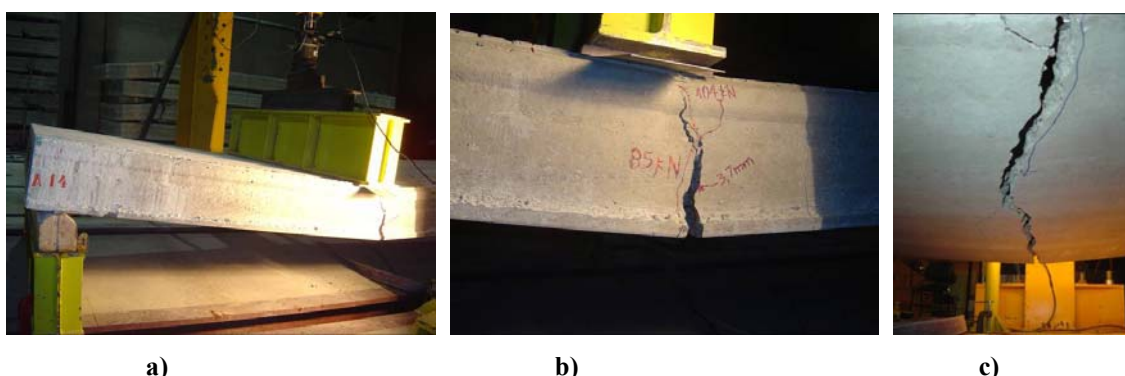


Figura 4.17: Configuração de fissuração da laje L14-20-SC-7_C: a) Aplicação de carga na laje a 5,75.h do apoio; b) Fissuração da parte lateral (lado direito); c) Fissuração da parte inferior da laje.

4.2. Exemplo 2 – Avaliação de desempenho em lajes com capa para flexão e cisalhamento (h=200 mm + 50 mm de capa, onde h é a altura da laje)

Neste exemplo, são apresentadas avaliações de desempenho para a verificação da contribuição da capa estrutural para as resistências ao cisalhamento e à flexão.

4.2.1 Ensaios de Cisalhamento ($a_v = 2,5 h$)

No projeto de lajes alveolares protendidas, a utilização de uma capa de concreto solidarizada sobre a laje pode contribuir para a redução de armadura protendida. Além do aumento da resistência à flexão, o acréscimo do momento de inércia, gerado pela seção composta, traz

dois benefícios principais: aumento da ação de diafragma, com a redução da deslocabilidade lateral do pavimento, e redução da deformabilidade vertical da laje. A fim de se levar em conta no projeto a seção composta, é importante que a solidarização entre a capa e a laje alveolar seja verificada por meio de ensaios experimentais de elementos com e sem capa estrutural, onde esses resultados podem ser comparados com os equacionamentos teóricos.

O Manual de Projeto para Lajes Alveolares da FIB (FIB, 2000) apresenta uma equação para a consideração da contribuição da capa de concreto para o aumento da resistência ao cisalhamento:

$$\overline{V}_{Rdf} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d' \cdot k' \cdot (1,2 + 40\rho'_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cpm} \cdot b_w \cdot d' \quad (4.2)$$

a) Lote A

São apresentados valores de ensaio e de cálculo de cinco lajes de altura de 20 cm, com capa de 5 cm. Os valores experimentais encontrados a partir dos ensaios de cisalhamento, os valores teóricos calculados e o índice de comparação são observados na Tabela 4.8. e na Figura 4.18.

Tabela 4.8: Comparação entre os resultados experimentais e teóricos para as lajes do Lote A, relativos ao ensaio de cisalhamento.

Laje	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{Rk} (kN)	$\lambda_R = \frac{V_{u,exp}}{V_{Rk}}$	$V_{s,m\acute{a}x}$ (kN)	$\lambda_s = \frac{V_{u,exp}}{V_{s,m\acute{a}x}}$
L12-20-CC-5_A	137,67	125,28	1,10	71,69	1,92
L13-20-CC-5_A	129,71	125,28	1,04	71,69	1,81
L14-20-CC-5_A	197,87	125,28	1,58	71,69	2,76
L15-20-CC-5_A	197,61	125,28	1,58	71,69	2,76
L16-20-CC-5_A	158,49	125,28	1,27	71,69	2,21

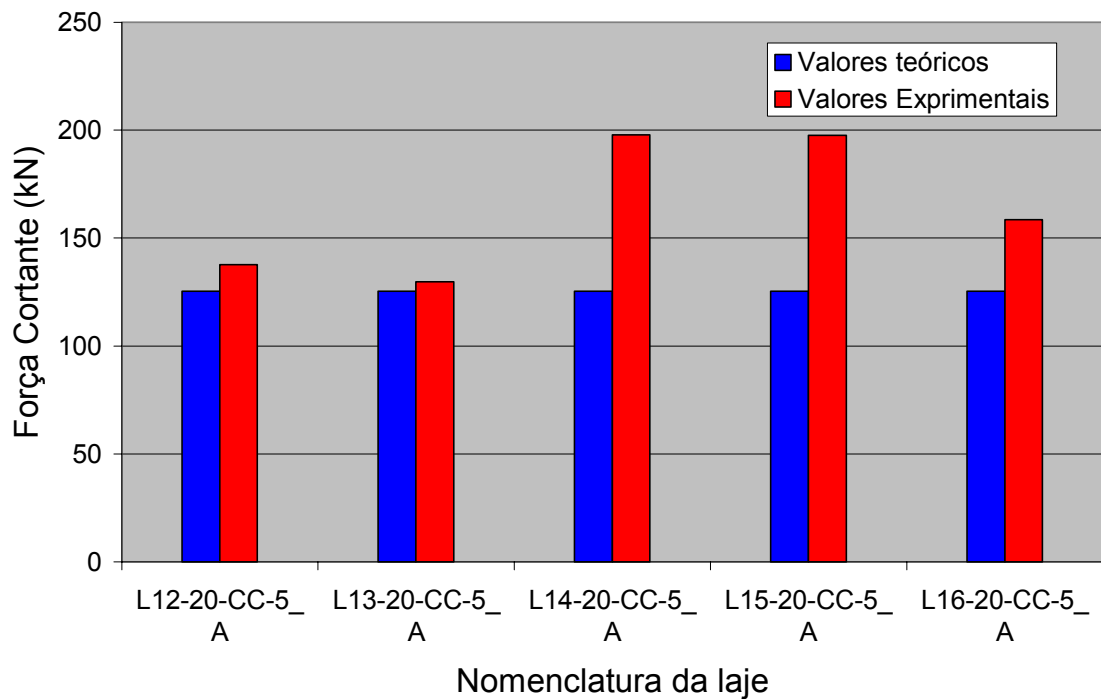


Figura 4.18: Comparação entre os valores do cortante obtidos nos ensaios e no cálculo teórico, para as lajes do Lote A, de altura de 20 cm e capa de 5 cm.

A Figura 4.19 ilustra a configuração da fissura durante o ensaio. É possível observar, na Figura 4.19.a, a interação de cisalhamento com flexão.



Figura 4.19: Abertura de fissura da laje da Lote A: a) Vista lateral; b) Vista inferior.

É importante lembrar que nas lajes da Lote A, a superfície superior foi escarificada, tornando-a rugosa, e depois limpas com aspersão de água, melhorando assim a interface da laje com a capa.

b) Lote B

É apresentado o valor de um ensaio e de cálculo do respectivo valor teórico de uma laje de altura de 20 cm, com capa de 5 cm. Os valores experimentais encontrados a partir dos ensaios de cisalhamento, os valores teóricos calculados e o índice de comparação são observados na Tabela 4.9 e na Figura 4.20.

Tabela 4.9: Comparação entre os resultado experimental e o teórico para a laje do Lote B, relativos ao ensaio de cisalhamento.

Laje	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{Rk} (kN)	$\lambda_R = \frac{V_{u,exp}}{V_{Rk}}$	$V_{s,máx}$ (kN)	$\lambda_s = \frac{V_{u,exp}}{V_{s,máx}}$
L06-20-CC-8_B	215,89	225,56	0,96	131,48	1,64

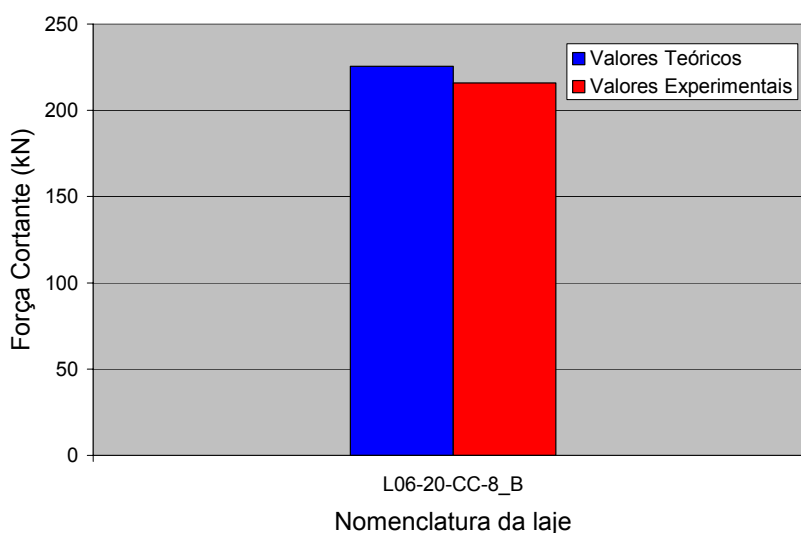


Figura 4.20: Comparação entre os valores do cortante obtido no ensaio e no cálculo teórico, para a laje do Lote B, de altura de 20 cm e capa de 5 cm.

É importante destacar que na confecção da capa não foi realizado a limpeza e nenhum procedimento para tornar a superfície superior da laje rugosa.

Na Figura 4.21 são apresentadas fotografias do aspecto da lateral da laje, ao final do ensaio.



a) Fissuração na parte lateral; b) Fissuração da parte inferior; c) Vista frontal.

c) Lote C

Os valores experimentais encontrados a partir dos ensaios de cisalhamento, os valores teóricos calculados e o índice de comparação são observados na Tabela 4.10 e na Figura 4.22.

Tabela 4.10: Comparação entre os resultados experimentais e os teóricos para as lajes do Lote C, relativos ao ensaio de cisalhamento.

Laje	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{Rk} (kN)	$\lambda_R = \frac{V_{u,exp}}{V_{Rk}}$	$V_{s,m\acute{a}x}$ (kN)	$\lambda_s = \frac{V_{u,exp}}{V_{s,m\acute{a}x}}$
L16-20-CC-7_C	113,45	115,19	0,98	64,75	1,75
L17-20-CC-7_C	125,25	109,15	1,15	61,27	2,04
L18-20-CC-6_C	140,80	138,52	1,02	79,65	1,77
L19-20-CC-7_C	118,35	109,70	1,08	61,53	1,92

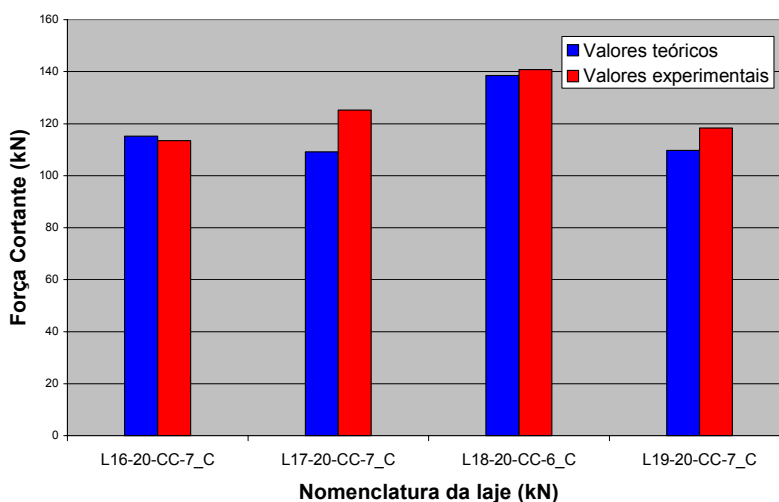


Figura 4.22: Comparação entre os valores de força cortante obtidos nos ensaios e nos cálculos teóricos para o Lote A, com lajes ensaiadas com comprimento de 6m , altura de 20 cm e capa de 5 cm.

Para a confecção da capa não foi realizada a limpeza nem a escarificação da superfície superior da laje, permanecendo esta lisa.

Nas figuras 4.23 e 4.24 são apresentadas fotografias do aspecto da lateral das lajes, ao final do ensaio.

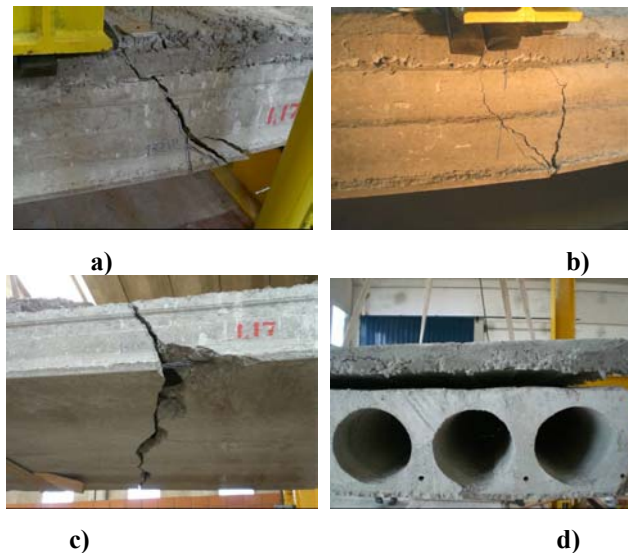


Figura 4.23: Configuração da fissuração da laje L17-CC-7_C: a) Fissuração da lateral da laje (lado esquerdo); c) Fissuração da lateral da laje (lado direito); d) Fissuração da parte inferior da laje; e) Descolamento da capa.



Figura 4.24: Fissuração da laje L18-CC-6_C.

4.2.2 Ensaios de flexão para lajes com capa

a) Lote A

São apresentados valores de ensaio e de cálculo de cinco lajes de altura de 20 cm, com capa de 5 cm. Os valores experimentais encontrados nos ensaios de cisalhamento, os valores teóricos calculados e o índice de comparação são observados na Tabela 4.11 e na Figura 4.25.

Tabela 4.11: Comparação entre os resultados experimentais e os teóricos para as lajes do Lote A, relativos ao ensaio de flexão realizado com peças com 3,0m de comprimento.

Laje	$M_{u,exp}$ (kN.m)	M_{Rk} (kN.m)	$\frac{M_{u,exp}}{M_{Rk}}$	$M_{r,exp}$ (kN.m)	M_r (kN.m)	$\frac{M_{r,exp}}{M_r}$
L17-20-CC-5_A	184,73	177,45	1,04	127,81	131,26	0,97
L18-20-CC-5_A	189,23	177,45	1,07	124,13	131,26	0,95
L19-20-CC-5_A	181,96	177,45	1,02	135,68	131,26	1,03
L20-20-CC-5_A	186,76	177,45	1,05	133,43	131,26	1,02
L21-20-CC-5_A	184,73	177,45	1,04	127,80	131,26	0,97
L22-20-CC-5_A	183,48	177,47	1,03	114,03	132,35	0,86

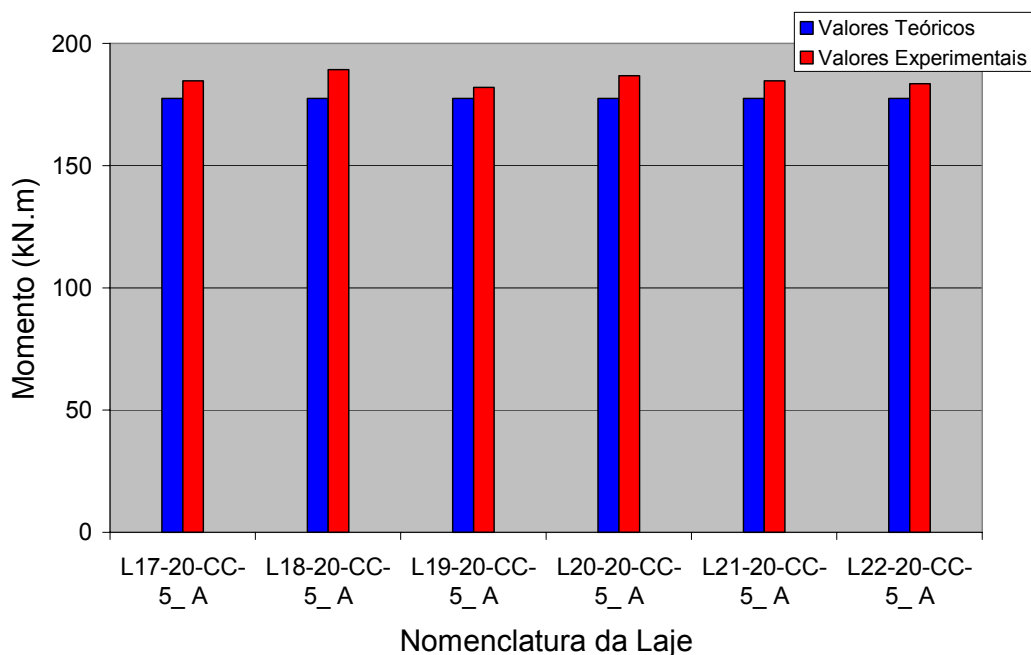


Figura 4.25: Comparação entre os valores de momento fletor obtidos no ensaio e no cálculo teórico para o Lote A, com lajes ensaiadas com comprimento de 3m, altura de 20 cm e capa de 5 cm.

É observado na Figura 4.26 o formato da fissura em uma laje ensaiada à flexão. No item a, encontra-se uma fissura de flexão no lado esquerdo da laje, enquanto o item b indica a ocorrência de fissura de flexão com interação com cisalhamento e fendilhamento na região horizontal junto à armadura.



Figura 4.26: Configuração de fissuração para laje de 3,0m de vão, submetida a ensaio de flexão: a) Fissuração da lateral esquerda; b) Fissuração da lateral direita da laje.

b) Lote B

São apresentados valores de ensaio e de cálculo de duas lajes de altura de 20 cm e capa de 5 cm. Os valores experimentais encontrados nos ensaios de cisalhamento, os valores teóricos calculados e o índice de comparação são observados na Tabela 4.12 e na Figura 4.27.

Tabela 4.12: Comparação entre os resultados experimentais e os teóricos para as lajes do Lote B, relativos ao ensaio de flexão realizado com peças com 3,0m de comprimento.

Laje	$M_{u,exp}$ (kN.m)	M_{Rk} (kN.m)	$\frac{M_{u,exp}}{M_{Rk}}$	$M_{r,exp}$ (kN.m)	M_r (kN.m)	$\frac{M_{r,exp}}{M_r}$
L13-20-CC-8_B	266,21	282,35	0,94	157,66	202,13	0,78
L14-20-CC-8_B	268,39	282,37	0,95	174,66	202,12	0,86

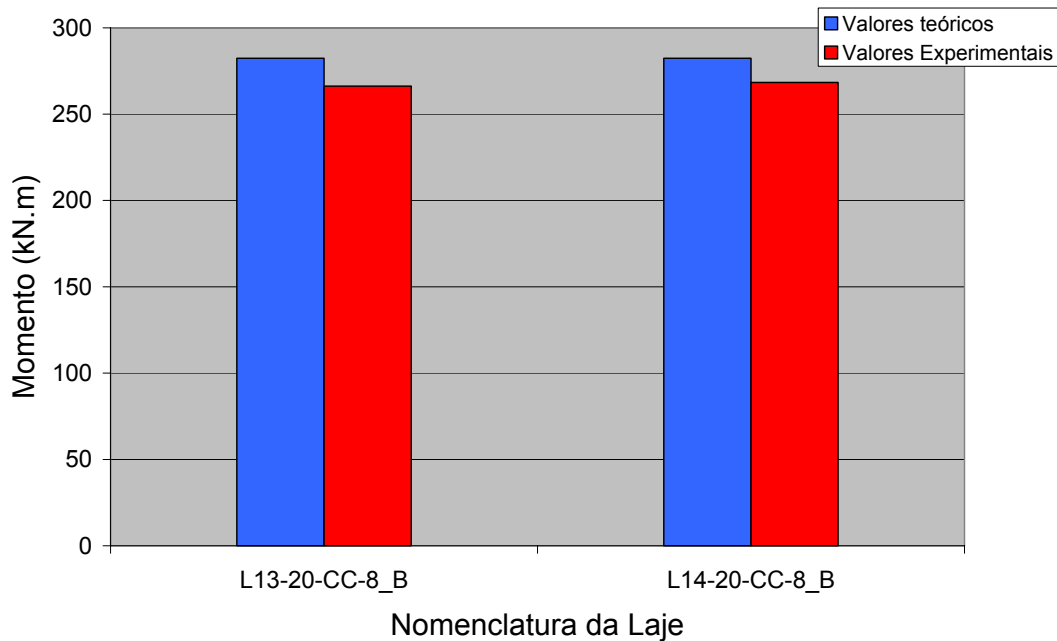


Figura 4.27: Comparação entre os valores de momento fletor obtidos nos ensaios e no cálculo teórico para o Lote A, com lajes ensaiadas com comprimento de 6m.

Na Figura 4.28, é possível observar a fissuração da laje L12-20-SC-8_B, submetida ao ensaio de flexão.



Figura 4.28: Configuração de fissuração da laje L12-20-SC-8_B: a) Vista lateral da região central da laje; b) Vista da superfície inferior da laje.

Na Figura 4.29.a, é observada a fissuração da região ensaiada da laje L14-20-CC-8_B durante o ensaio de flexão. Nas Figuras 4.29 b) e c) a capa que já se encontrava pré-fissurada devido ao transporte, ocorrendo o deslocamento da capa.

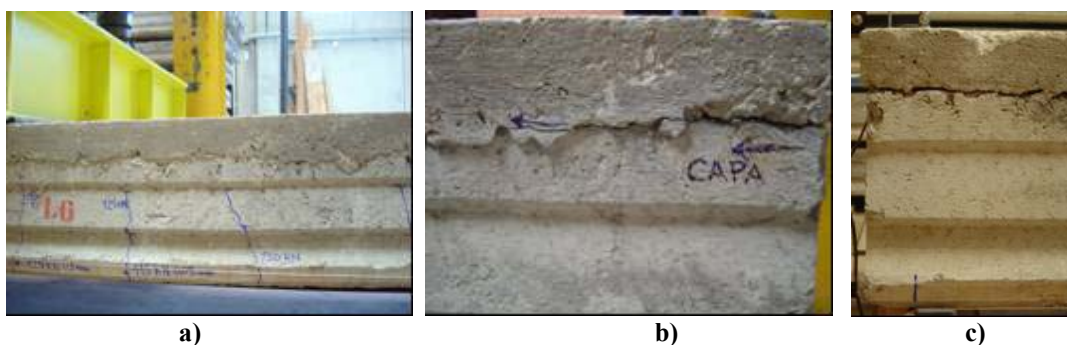


Figura 4.29: Configuração de fissuração da laje L14-20-CC-8_B: a) Vista lateral da laje; b) e c) Descolamento da capa nos apoios.

4.3 Exemplo 3 - Verificação dos Valores Característicos em Lajes sem Capa

Neste exemplo 3, pode-se fazer um procedimento inverso ao que se fez nos exemplos anteriores. Pode-se, a partir do resultado do ensaio, usando as expressões da teoria técnica de estruturas de concreto, obter valores característicos do material do protótipo. Assim, na seqüência, obtém-se o valor da resistência à tração do concreto de duas formas: a primeira (exemplo 3.1) supondo conhecido o momento de fissuração da peça, obtido a partir de gráfico com dados experimentais; a segunda (exemplo 3.2) quando se obtém a mesma resistência de tração do concreto a partir do cortante resistido no ensaio. Por último, no exemplo 3.3,

determina-se o valor do módulo de elasticidade do concreto, a partir do deslocamento máximo (flecha) medido no ensaio.

4.3.1 Determinação de f_{ctm} a partir do momento de fissuração experimental: (h=200 mm)

Neste caso usa-se um ensaio de flexão cujo esquema de carregamento é dado na Figura 4.30. A partir do gráfico do ensaio pode ser obtido o valor do momento de fissuração experimental que corresponde ao ponto do gráfico (carga x deslocamento) em que há alteração da sua tangente. Desta forma, fica determinada a força aplicada no atuador que causa o momento de fissuração.

Com a aplicação dos conceitos da teoria de concreto protendido pode-se, a partir da expressão do momento de fissuração (CARVALHO,2009), obter-se um relação entre a resistência à tração do concreto e o momento de fissuração, dada por 4.1.

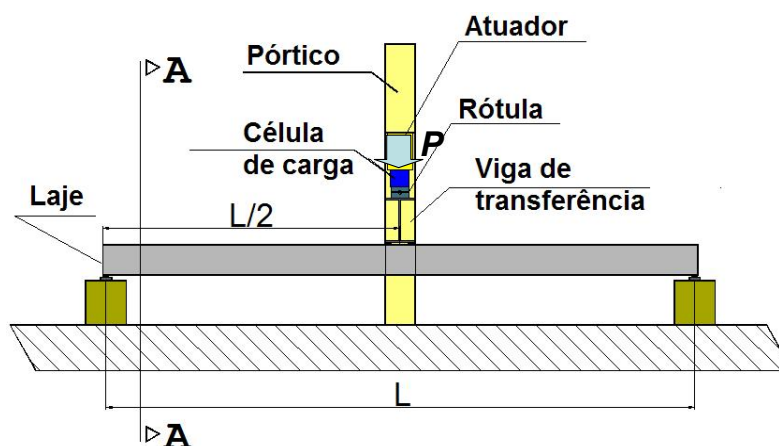


Figura 4.30: Esquema de ensaio à flexão usado para a determinação da resistência característica à tração do concreto de laje ensaiada.

$$f_{ctm} = \left[\frac{N_p}{A_c} + \frac{N_p \times e_p \times y_t}{I} - \frac{M_{r,exp} \times y_t}{I} \right] / \alpha_f \quad (4.3)$$

onde:

$M_{r,exp}$ - momento de fissuração experimental obtido como o indicado anteriormente, a partir da expressão (4.4)

$$M_{r,exp} = \frac{P_{r,exp} \times L}{4} \quad (4.4)$$

N_p - força de protensão atuante na laje alveolar na data do ensaio

A_c - área da seção transversal de concreto da laje alveolar

I - Momento de inércia da seção transversal de concreto da laje alveolar

e_p - excentricidade dos cabos de protensão atuantes na seção

y_t - distância da borda menos comprimida da seção até o centro de gravidade

α_f - Coeficiente de forma igual a 1,5 para as lajes

Substituindo os valores encontrados à partir dos ensaios nas expressões 4.3 e 4.4 tem-se:

$$M_{r,exp} = 98,00 \text{ kNm}$$

$$N_p = 501,60 \text{ kN} \text{ (considerou-se 12 \% de perda de protensão)}$$

$$A_c = 0,137795 \text{ m}^2$$

$$I = 0,0006712 \text{ m}^4$$

$$e_p = 0,065 \text{ m}$$

$$y_t = 0,10 \text{ m}$$

$$\alpha_f = 1,5$$

Finalmente, substituindo os valores na expressão 4.3 chega-se a

$$f_{ctm} = \left[\frac{501,6}{0,137795} + \frac{501,6 \times 0,065 \times 0,10}{0,0006712} - \frac{98 \times 0,10}{0,0006712} \right] / 1,5 = 4068,64 \text{ kN/m}^2$$

Desta forma chega-se ao valor de

$$f_{ctm} = 4,07 \text{ MPa}$$

Para esta laje o valor obtido em um ensaio de corpo-de-prova, por compressão diametral, resultou em 4,07 MPa, chegando portanto a resultados próximos.

4.3.2 Exemplo 3.2 - Determinação de f_{ctk} a partir da resistência experimental ao cisalhamento: (h=200 mm)

Neste exemplo busca-se obter o valor da resistência à tração do concreto a partir dos resultados de um ensaio de cisalhamento (Figura 4.31).

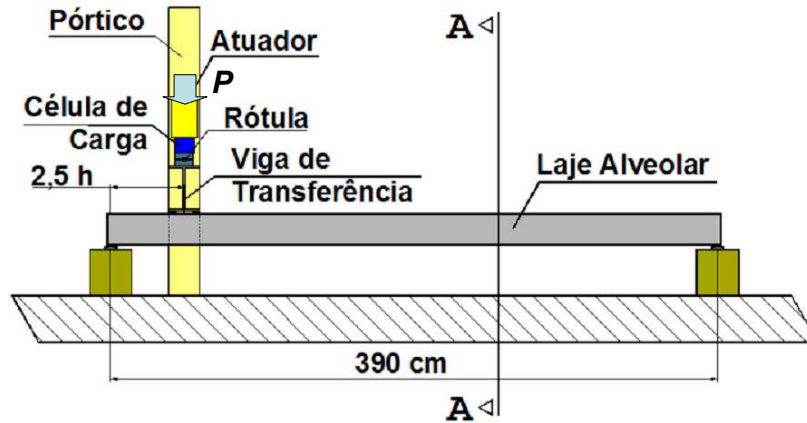


Figura 4.31: Esquema de ensaio a flexão usado para a determinação da resistência característica à tração do concreto de laje ensaiada.

Isolando na expressão do cortante resistido pelo protótipo o valor da resistência à tração, chega-se à expressão:

$$f_{ctm} = \left[\frac{(V_{R,exp} - 0,15 \times \sigma_{cp} \times d \times \sum b_w)}{(0,25 \times d \times \kappa \times \sum b_w \cdot (1,2 + 40 \times \rho))} \right] / 0,70 \quad (4.5)$$

onde:

$$V_{R,exp} = P \cdot \left(\frac{L - 2,5 \times h}{L} \right)$$

$$V_{R,exp} = 115,29 \text{ kNm}$$

$$N_p = 501,60 \text{ kN} \quad (12 \% \text{ de perda})$$

$$A_c = 0,137795 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{cp} = N_p / A_c = 3635,84 \text{ kN/m}^2$$

$$d = 0,165 \text{ m}$$

$$\sum b_w = 0,32 \text{ m}$$

$$\kappa = 1,6 - d = 1,6 - 0,165 = 1,435$$

$$\rho = \frac{A_s}{d \times \sum b_w} = \frac{0,0005}{0,165 \times 0,320} = 0,00947$$

Substituindo os valores para a laje do Lote C L04-SC-5_C (de 20 cm de altura)

$$f_{ctm} = \left[\frac{(115,29 - 0,15 \times 3635,84 \times 0,165 \times 0,32)}{(0,25 \times 0,165 \times 1,435 \times 0,32 \cdot (1,2 + 40 \times 0,00947))} \right] / 0,70 = 4117,95 \text{ kN/m}^2$$

Obtendo-se: $f_{ctm} = 4,12 \text{ MPa}$

Comparando este valor de 4,12 MPa com o valor fornecido pela empresa de 4,20 MPa, nota-se que resultam em valores próximos.

4.3.3 Estimativa do E_c a partir das medidas de flecha em ensaio de flexão

Neste exemplo, mostra-se como é possível estimar o valor do módulo de elasticidade do protótipo a partir dos valores das flechas de um ensaio de flexão. Pode-se usar a expressão do módulo de elasticidade dada em 4.6 e através da substituição dos valores encontrados de carga no atuador e da flecha observada e além do valor do momento de inércia da seção transversal para obter o valor de E considerado aqui igual à E_c .

$$E_c = \left[\frac{F_{\text{exp}} \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot a_{\text{exp}}} \right] \quad (4.6)$$

Onde

F_{exp} – força aplicada no ensaio

L - valor do vão

I - momento de inércia da seção transversal

a_{exp} - flecha experimental

O valor do módulo de elasticidade do concreto (e considerado o do protótipo), quando não se tem nenhum valor experimental, é calculado por meio da expressão normativa que fornece este valor a partir da resistência à compressão de um corpo-de-prova de concreto. Os dois valores obtidos como descrito podem então ser comparados.

Inicialmente usa-se a fórmula 4.6 para calcular o valor experimental e substituindo os valores por (o ensaio utilizado é o referente a uma laje de 150 mm de altura do fabricante B e ensaiada a flexão cujos resultados estão indicados na Figura 4.32):

F_{exp} – 25,23 kN

L - 6400 mm

I - 339167806 mm⁴

a_{exp} - 11,57 mm

$$\left(\frac{F}{a_{\text{exp}}} \right)_{\text{med}} = 2,18 \text{ kN/mm} \quad F < 25 \text{ kN}$$

$$E_c = \left[\frac{25,23 \cdot 6400^3}{48 \cdot 339167806 \cdot 11,57} \right]$$

$$E_c = 35,03 \text{ kN/mm}^2$$

Com o valor de $f_{ck} = 54 \text{ MPa}$ obtém-se para o módulo de elasticidade do concreto o valor de

$$E_c = 0,85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} = 4760 \cdot \sqrt{54} = 34,9 \text{ MPa}.$$

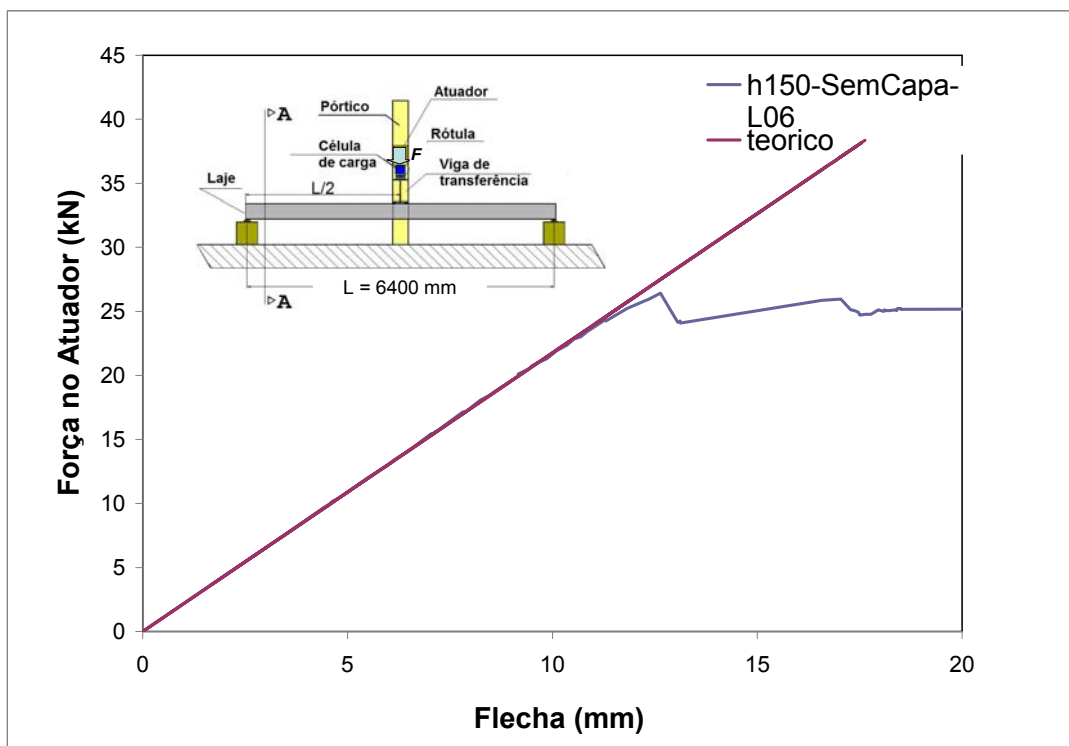


Figura 4.32: Gráfico de Força no Atuador versus Flecha - Esquema de ensaio.

4.4 Exemplo 4 – Avaliação de Desempenho em Lajes com preenchimento de 2 alvéolos

Neste item é apresentada avaliações de desempenho para a verificação da contribuição do preenchimento de alvéolos para o aumento da resistência ao cisalhamento. Para o cálculo da cortante, foi utilizado a equação indicada em FIB(2000) para elemento de laje alveolar com capa estrutural:

$$\overline{V'_{Rdf}} = 0,25 \cdot f_{ctd} \cdot b'_w \cdot d' \cdot k' \cdot (1,2 + 40\rho_Q) + 0,15 \cdot \sigma_{cpm} \cdot b_w \cdot d' \leq V'_{Rd2} \quad (4.7)$$

4.4.1 Preenchimento de alvéolos com concreto simples

Os protótipos possuíam comprimento igual a 4,15 m e preenchimento dos alvéolos com concreto simples. Os valores experimentais encontrados nos ensaios de cisalhamento, os

valores teóricos calculados e o índice de comparação são observados na Tabela 4.13 e na Figura 4.33.

Tabela 4.13: Resultados experimentais e teóricos para as lajes do lote C ensaiadas ao cisalhamento.

Laje	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{Rk} (kN)	$\lambda_R = \frac{V_{u,exp}}{V_{Rk}}$	$V_{s,máx}$ (kN)	$\lambda_s = \frac{V_{u,exp}}{V_{s,máx}}$
L01-SC-AP-6_C	142,67	178,35	0,80	98,25	1,45
L05-SC-AP-6_C	122,86	176,94	0,69	97,43	1,26
L06-SC-AP-6_C	128,01	176,78	0,72	97,32	1,32
L07-SC-AP-7_C	110,78	154,28	0,72	83,20	1,33
L08-SC-AP-7_C	111,92	157,58	0,71	85,04	1,32
L20-CC-AP-6_C	140,67	218,92	0,64	120,76	1,16
L21-CC-AP-6_C	132,53	203,61	0,65	109,19	1,21

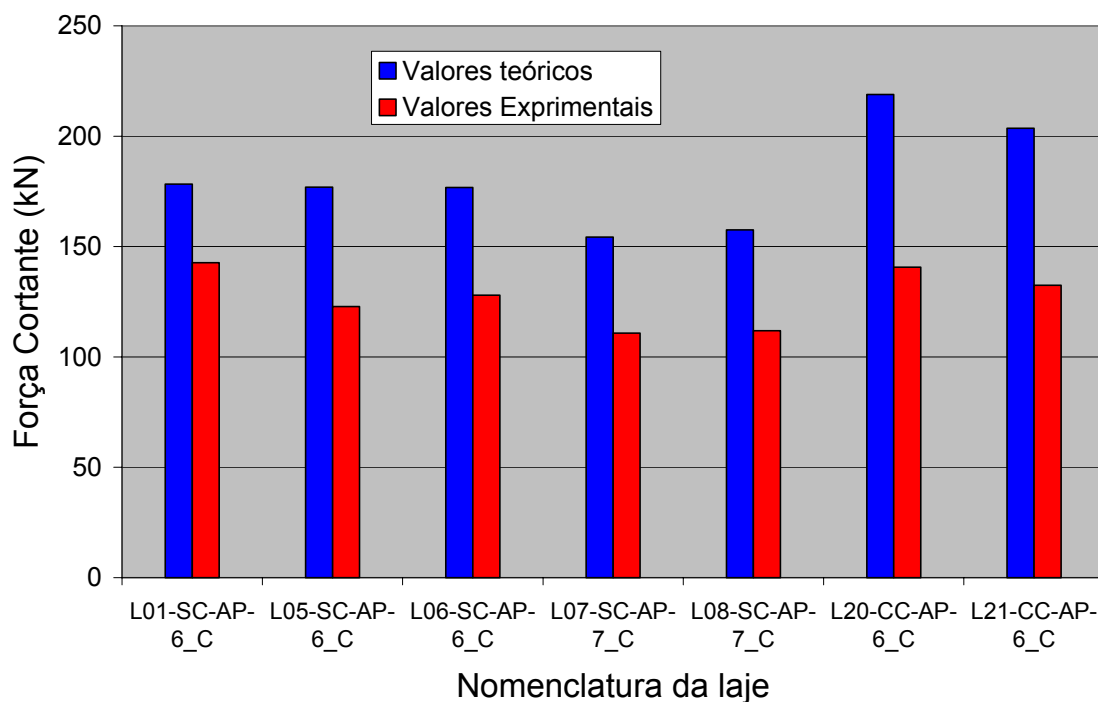
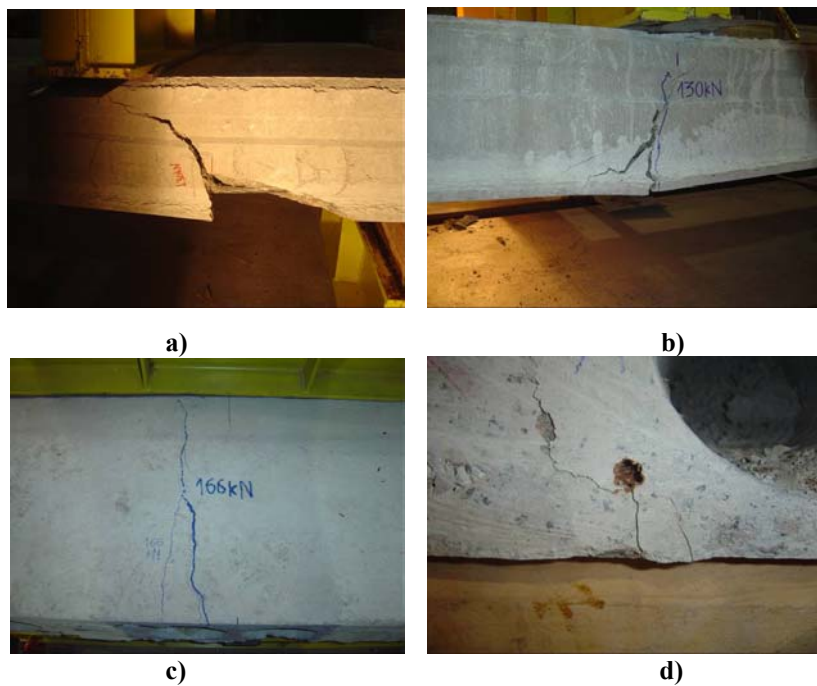


Figura 4.33: Comparação entre os resultados experimentais e os teóricos para as lajes do Lote C, relativos ao ensaio de cisalhamento.

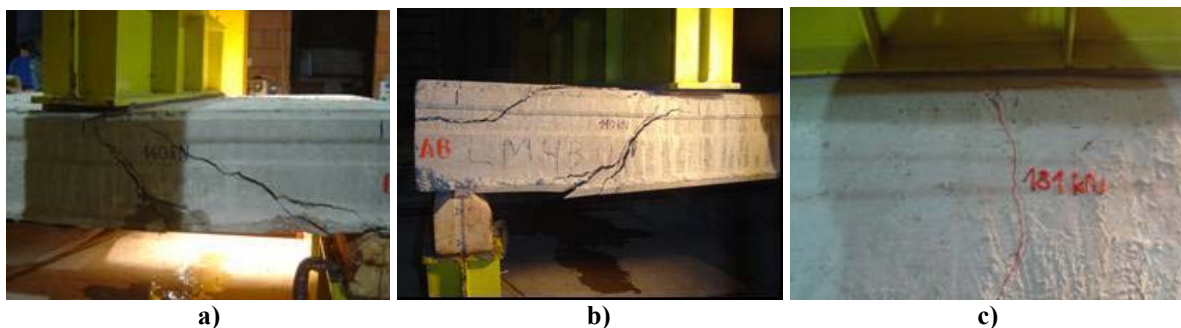
Nas figuras 4.34 a 4.38 são indicadas as configurações de fissuras que surgiram durante o ensaio. Observam-se fissuras com efeito combinado entre cisalhamento e flexão e fendilhamento do concreto com falha de ancoragem.



a) b) c)
 Figura 4.34: Configuração de fissuração da laje L01-SC-AP-6_C: a) e b) Fissuração da parte lateral (lado esquerdo); c) Fissuração da parte inferior da laje.



a) b) c) d)
 Figura 4.35 : Configuração de fissuração da laje L05-SC-AP-6_C: a) Fissuração da parte lateral (lado esquerdo); b) Fissuração da parte lateral (lado direito); c) Fissuração da parte superior da laje; d) Fissuração próxima a cordoalha de protensão.



a) b) c)
 Figura 4.36: Configuração de fissuração da laje L06-SC-AP-6_C: a) Fissuração da parte lateral (lado esquerdo); b) Fissuração da parte lateral (lado direito); c) Fissuração da parte superior da laje.

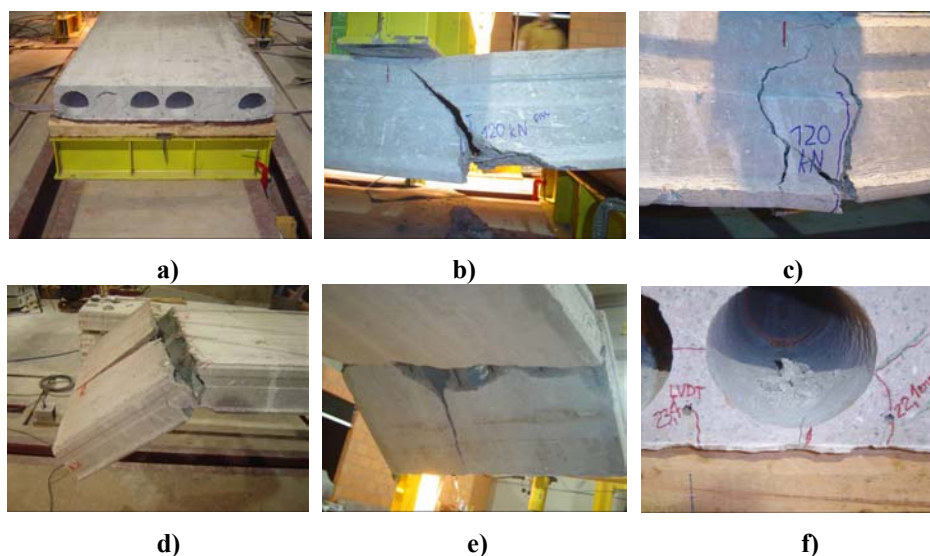


Figura 4.37: Configuração de fissuração da laje L08-SC-AP-7_C: a) Laje com dois alvéolos preenchidos; b) Fissuração da lateral da laje (lado esquerdo); c) Fissuração da lateral da laje (lado direito); d) e e) Laje após sua ruptura; f) Detalhe da fissuração ao redor das cordoalhas de protensão.

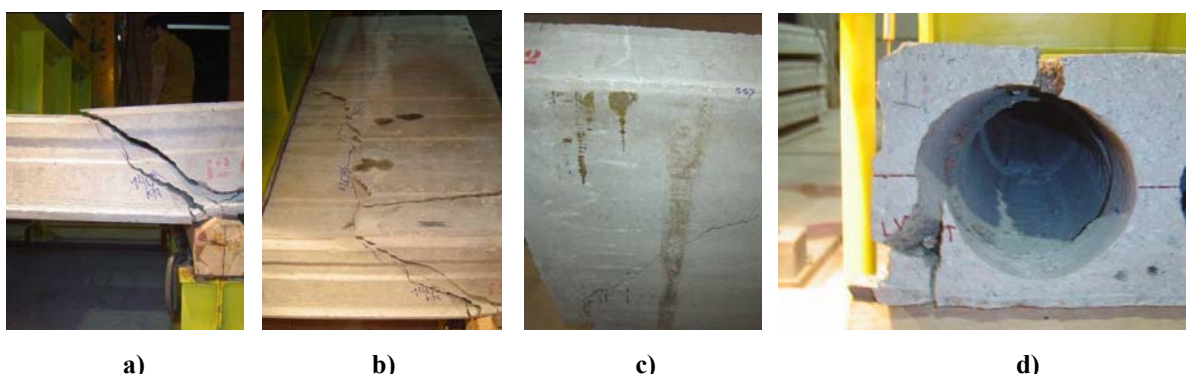


Figura 4.38: Configuração da fissuração da laje L12-SC-AP-7_C: a) Fissuração da lateral da laje (lado esquerdo); b) Fissuração da parte superior da laje; c) Fissuração da parte inferior da laje; d) Rompimento da parte superior da laje, junto ao alvéolo de extremidade.

4.4.2 Preenchimento de alvéolos com concreto reforçado com fibras metálicas

No caso da resistência ao cisalhamento, um procedimento que tem sido utilizado para aumentar a capacidade das lajes é o preenchimento dos alvéolos com concreto não-retrátil. Da mesma forma, é importante verificar experimentalmente a parcela da contribuição do preenchimento dos alvéolos.

Os valores experimentais encontrados nos ensaios de cisalhamento, os valores teóricos calculados e o índice de comparação são observados na Tabela 4.14 e na Figura 4.39.

Tabela 4.14: Resultados experimentais e teóricos para as lajes do Lote A ensaiadas ao cisalhamento.

Laje	$V_{u,exp}$ (kN)	V_{Rk} (kN)	$\lambda_R = \frac{V_{u,exp}}{V_{Rk}}$	$V_{s,máx}$ (kN)	$\lambda_s = \frac{V_{u,exp}}{V_{s,máx}}$
L33-SC-2AP-5_A	150,63	157,27	0,96	86,31	1,75
L34-SC-2AP-5_A	193,59	157,27	1,23	86,31	2,24
L35-SC-2AP-5_A	171,98	157,27	1,09	86,31	1,99
L36-SC-2AP-5_A	160,17	157,27	1,02	86,31	1,86
L37-SC-2AP-5_A	167,43	157,27	1,06	86,31	1,94
L38-SC-2AP-5_A	177,49	157,27	1,13	86,31	2,06

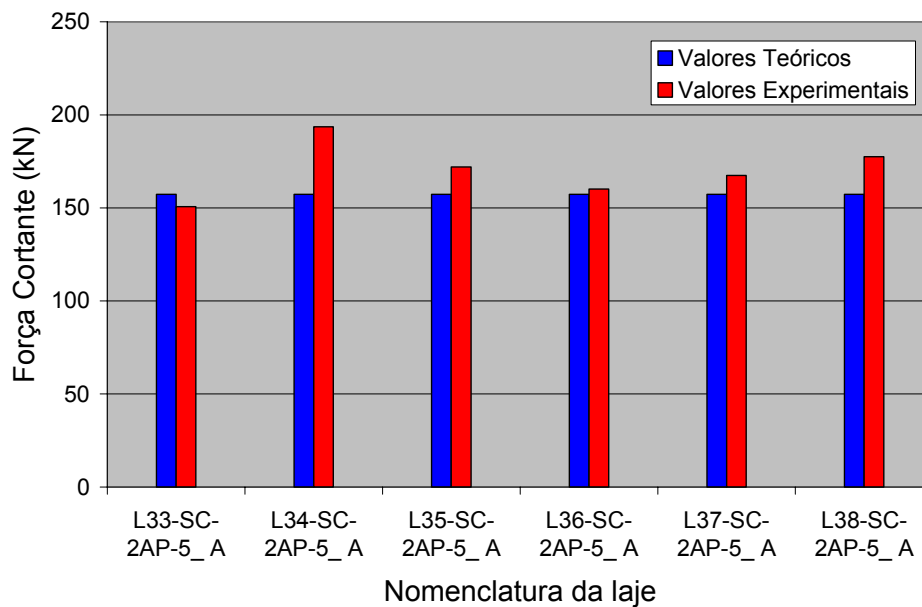


Figura 4.39: Comparação entre os resultados experimentais e teóricos para as lajes do Lote A, relativos ao ensaio de cisalhamento.

Na Figura 4.40 mostra-se uma falha por torção na mesa superior em laje com dois alvéolos preenchidos.



Figura 4.40: Falha por torção em nervura da extremidade (dois alvéolos preenchidos).

Capítulo 5

5 CONCLUSÕES

Embora a aplicação das lajes alveolares protendidas pré-fabricadas tenha aumentado de forma significativa nos últimos 20 anos, ainda não existe uma normalização específica que responda às todas as especificidades do projeto destes elementos, mas também não existe uma referência técnica que permita fazer a avaliação de desempenho deste tipo de produto no Brasil.

Nos últimos anos no Brasil, o setor de pré-moldados tem se organizado através da Associação Brasileira de Construção Industrializada de Concreto – ABCIC, onde tem havido um esforço concentrado para a melhoria da qualidade das estruturas pré-moldadas no Brasil. Neste contexto, a partir da implantação do Selo de Qualidade para estruturas pré-moldadas de concreto, identificou-se que um dos maiores impedimentos para a certificação de produto ou mesmo o controle de qualidade de elementos pré-fabricados de laje alveolar estavam relacionados com a falta de uma normalização específica e também com a falta de um procedimento padronizado de ensaios que permitisse a validação experimental. Em outras palavras, existe uma grande necessidade de uma normalização técnica no Brasil que defina os parâmetros que permitam o desenvolvimento de um programa de certificação das lajes alveolares no Brasil.

A NBR-9062:2006 permite que o procedimento de projeto seja executado com base em verificações experimentais, onde os ensaios podem ser realizados com os seguintes propósitos: a) estabelecer diretamente a resistência última ou o comportamento em serviço de elementos estruturais; b) obter propriedades específicas de materiais; para teste de novos materiais ou produtos; c) reduzir incertezas de parâmetros de carga ou de modelos de resistência. Todavia, a NBR-9062:2006 não apresenta nenhuma recomendação ou referência

técnica que seja específica para lajes alveolares. A NBR-14861:2002 é específica para lajes alveolares pré-fabricadas, mas aborda apenas aspectos gerais de produto. No ano de 2008 foi constituída a CE-18:600.19 – Comissão de Estudos de Lajes e Painéis Alveolares de Estruturas de Concreto Pré-fabricadas (CB-18/ABNT), com a missão de fazer a revisão da NBR-14861, onde se pretende que a nova versão desta norma deverá fornecer tanto critérios de projeto, quanto procedimentos para avaliação de desempenho e controle de qualidade para produto.

Através de sua parceria de cooperação tecnológica com a ABCIC desde 2004, o Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto – NETPRE vem desenvolvendo um programa de pesquisa sobre o comportamento das lajes alveolares protendidas pré-fabricadas desde 2006, o qual envolve desde os critérios de projeto quanto à parte experimental. Ainda dentro da parceria tecnológica, o NETPRE passou a integrar a comissão C6 – Commission on Prefabrication (FIB), com participação na subcomissão TG-6.2 – Hollow Core Slabs. Além disso, no ano de 2008 o NETPRE foi convidado para coordenar a comissão de estudo para a revisão da NBR-14861:2002. Assim, a motivação e interesse de estudo desta pesquisa de mestrado surgiu naquele momento, onde além da pesquisa acadêmica houve a oportunidade para acompanhar todo o processo de revisão da NBR-14861, bem como de interagir tanto com empresas do setor quanto com profissionais de projeto de lajes alveolares que integram a comissão.

Dentro deste contexto, a relevância da presente pesquisa se coloca dentro do contexto do momento da revisão da NBR-14861, onde a principal contribuição desta pesquisa será a apresentação de uma proposta com as principais recomendações para procedimentos de ensaios para avaliação desempenho e validação de produto de lajes alveolares, a qual deverá ser adaptada junta a comissão da norma. Dentro deste escopo, o objetivo específico desta pesquisa foi investigar a padronização de procedimentos de ensaios para a avaliação de desempenho de lajes alveolares, onde a investigação envolveu tanto o estudo da literatura relacionada com a pesquisa acadêmica experimental realizada em universidades européias, mas principalmente envolveu a revisão dos manuais técnicos e normalização internacional sobre lajes alveolares.

As principais referências técnicas sobre a avaliação de desempenho de lajes alveolares na literatura e normalização internacional foram encontradas nos boletins técnicos da FIB (FIP-CEB) e na norma européia EN-1168:2005. O interesse de estudo nestes documentos deve-se principalmente pela sua proximidade dos critérios de cálculo adotados pela NBR-6118 e pelo

Euro Code EC-2 e o Model Code (CEB-FIB). Dado ao fato de que tanto o manual para lajes alveolares da FIB quando a EN-1168 encontram-se em revisão, cabe ressaltar que as recomendações para procedimentos para avaliação de desempenho de lajes alveolares na presente pesquisa já contemplam as últimas revisões e modificações destes dois documentos, inclusive no que se refere na proposta para modificação feita em 2009 para o texto do anexo que trata dos procedimentos de ensaios de lajes alveolares na EN-1168. Embora o Precast Concrete Institute – PCI (EUA) seja uma referência de grande importância para as estruturas pré-moldadas de concreto, possuindo um manual específico para lajes alveolares com critérios específicos de projeto segundo o ACI-318:2008, tal publicação não apresenta nenhum procedimento para ensaio destas lajes. Sendo assim, fica-se claro que a opção pelos procedimentos de ensaio para lajes alveolares recomendados pela FIB (FIP-CEB) e EN-1168 deve-se principalmente por serem estes as únicas referências encontradas para este fim.

A partir da revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2 foi possível identificar os principais mecanismos que devem ser observados durante os ensaios de lajes alveolares. De forma geral, as lajes alveolares podem apresentar diferentes mecanismos de ruptura, podendo ocorrer mais do que um dos mecanismos próximo ao colapso da peça, como ocorre em geral, por exemplo, nos ensaios de cisalhamento. Entre os diversos mecanismos de ruptura podem ser citados os seguintes: a) falha por perda da ancoragem (escorregamento da armadura); b) falha por cisalhamento (tensão no ponto crítico da nervura superior à resistência de tração do concreto); c) falha por cisalhamento em região fissurada (com efeito combinado de cisalhamento, flexão e escorregamento); d) falha por cisalhamento combinado com torção (em peças que não são planas); e) falha por flexão (ELU), com grande possibilidade de escorregamento da armadura ativa junto ao apoio (na situação próxima à ruptura); f) falha por interação dos mecanismos de flexão e cisalhamento, que pode ocorrer em peças com vãos pequenos e/ou com carregamentos mais elevados; g) falha por combinação de flexão e escorregamento da armadura ativa, h) separação da capa de concreto com o elemento pré-fabricado. Cabe notar que a falha de ancoragem em peças pré-tracionadas é mais corriqueira do que as de peças com pós-tração, pois estas últimas possuem dispositivos mecânicos para introdução do esforço de protensão. Nas peças pré-tracionadas a introdução da protensão causa tensões normais de tração ao longo de um trecho da cordoalha, piorando as condições de ancoragem. Na laje alveolar, como as superfícies de concreto (faces do alvéolo) estão sempre próximas da armadura, este efeito é mais influente.

Os mecanismos de funcionamento que atuam nas lajes alveolares são bastante influenciados por: a) geometria da seção transversal (altura efetiva da laje, espessura das nervuras, formato dos alvéolos); b) pelo nível de protensão (considerando as perdas de protensão desde a fase inicial até as perdas ao longo do tempo); c) pelas resistências à compressão e à tração do concreto, pela qualidade da aderência entre o concreto e armadura ativa. Além de todas estas variáveis, há de se destacar que a laje alveolar na prática é dimensionada para funcionar junto com uma capa de concreto que será acrescida posteriormente. Desta forma, somam-se às condições anteriores as questões de aderência entre o elemento pré-fabricado e a capa. Neste contexto, embora os ensaios padronizados para as lajes alveolares tenham sido desenvolvidos para o estudo dos elementos isolados de laje sem a capa, os mesmos podem ser adaptados para a avaliação de elementos de laje com a capa ou com preenchimento de alvéolos.

Das situações listadas em seguida à ancoragem, percebe-se que há diversos mecanismos que dependem da flexão, do cisalhamento devido ao cortante ou de ambos combinados. Isto fica mais claro quando se analisa um elemento biapoiado (no caso de concreto armado) submetido a esforços de flexão e cortante. Próximo ao apoio, onde o cisalhamento é maior e o momento é quase nulo, as fissuras inclinadas de cisalhamento aparecerão na nervura quando a tensão de tração principal alcançar a resistência à tração do concreto no ponto crítico. No caso de carregamento distribuído, onde as regiões centrais da laje possuem momentos mais elevados e cisalhamento reduzido, é mais comum a incidência de fissuras de flexão. Entretanto, nas regiões intermediárias, as fissuras de flexão podem se propagar em fissuras inclinadas de cisalhamento onde a tensão de cisalhamento é mais elevada. Em geral, estas fissuras são denominadas fissuras de cisalhamento e flexão, pois de fato tem-se uma interação dos mecanismos de flexão e de cisalhamento, sendo que o mecanismo de ruptura nem sempre é bem definido, mas sim é o resultado da interação ou da combinação de mecanismos.

Em virtude do desempenho da laje alveolar ser influenciado pela interação de vários parâmetros de projeto (tais como geometria dos alvéolos, nível de protensão, resistência à tração do concreto e qualidade da ancoragem), mas também ser influenciado pelo tipo de fabricação (envolvendo tipo de equipamento e processo de extrusão ou forma deslizante), tem-se o reconhecimento de que a única forma efetiva de se avaliar o desempenho ou para validar este tipo de produto seja por meio de ensaios mecânicos de elementos de lajes. Ainda, dada a complexidade e possível interação entre os mecanismos de ruptura presentes em um elemento sem armadura transversal, é necessário que esta avaliação seja feita tanto para os esforços críticos de flexão quanto para o esforço cortante,

No Capítulo 3 estão apresentadas as principais recomendações para procedimentos de projeto, onde foram consideradas variações nas metodologias experimentais segundo três finalidades distintas: a) Ensaios para pesquisa; b) Ensaios para avaliação do desempenho de produto; c) Ensaios para controle de qualidade de elementos de laje. Além da sistematização do conhecimento sobre o assunto, a principal contribuição neste capítulo pode ser resumida pela mensagem de que somente a realização de ensaios nos materiais utilizados na produção da laje não é suficiente para avaliar o desempenho ou controlar a qualidade do produto, sendo necessária a realização ensaios que atestem o funcionamento das lajes alveolares. A periodicidade destes ensaios está relacionada com seus propósitos estarem associados à pesquisa, à validação de produto ou ao controle de qualidade.

A partir dos exemplos de aplicação apresentados no Capítulo 4, verificou-se que o desempenho das lajes estudadas pode ser validado a partir dos ensaios realizados tanto em laboratório na fábrica quanto em laboratório na universidade, demonstrando que as lajes analisadas funcionaram de acordo com os modelos de cálculo previstos para o projeto. Esta conclusão, sem dúvida, permite dizer que os processos de fabricação empregados conseguiram reproduzir o desempenho esperado para este tipo de produto. Além da qualidade dos próprios elementos, no caso de ensaios de flexão de lajes com capa estrutural in loco (que já não é mais só dependente do processo fabril), pode-se constatar o funcionamento de seção composta, havendo solidariedade entre as lajes pré-fabricadas com a capa de concreto (para o caso do momento positivo). Dos ensaios analisados, as lajes com os alvéolos preenchidos não alcançaram os resultados esperados. Assim, enquanto não for estudado um processo mais adequado, que permita a aderência do concreto introduzido no alvéolo ao já existente, recomenda-se que este procedimento não seja empregado para se aumentar a resistência ao cisalhamento. Além de permitir avaliar a qualidade estrutural dos elementos, os ensaios realizados também permitiram a obtenção de forma indireta às características de rigidez ou das propriedades mecânicas do concreto dos elementos de lajes ensaiados, tais como módulo de elasticidade e resistência à tração, como demonstrado nos exemplos do item 4.3. Aliás, essas características podem ser obtidas em ensaios não destrutivos, e que podem assim também avaliar o comportamento do produto. Finalmente, a experimentação e sua análise revelam-se como ferramentas importantes no controle da qualidade do produto, e demonstram que três empresas de regiões distintas e com alguns procedimentos fabris diferenciados conseguiram resultados bastante satisfatórios.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A partir dos ensaios realizados com as peças das três empresas, pode-se notar a importância de se estudar a aderência entre a capa e a laje, já que ambas possuem concretos de diferentes resistências. Além disso, as lajes estão protendidas, enquanto o concreto da capa não está. É importante realizar estudos da interface entre a capa e a laje, e ensaios para definir o que deve ser realizado na superfície.

Relacionada à questão da interface da capa com a laje, junto aos apoios, tem-se também o estudo da continuidade dos pavimentos compostos por lajes alveolares com capa estrutural. Isto influencia tanto o comportamento mecânico frente às ações gravitacionais como também confere outras características ao sistema estrutural, como a robustez do pavimento frente ao colapso progressivo ou em situações de incêndio. Ainda não existem informações suficientes na literatura e normalização técnica nacional a esse respeito.

Ainda seria interessante a realização de ensaios de efeito diafragma, para definir a consolidação entre as lajes, definindo assim o comportamento da laje em um piso.

Finalmente, ainda não existe uma fórmula para definir a interação de cisalhamento e flexão, tanto nos ensaios de cisalhamento como nos de flexão, com forças concentradas e vãos pequenos.

5.2 Considerações Finais

Acredita-se que a principal contribuição da presente pesquisa foi a revisão e a sistematização dos procedimentos de ensaios de lajes alveolares, onde inclusive foi possível dividir as diferenças de requisitos e de condução de ensaios segundo diferentes propósitos de avaliações experimentais, como ensaios propriamente de pesquisa, ensaios de validação de produto e ensaios para controle da qualidade, de forma que o conteúdo desta dissertação poderá auxiliar a todos, pesquisadores ou profissionais, que pretendam trabalhar com a avaliação de desempenho de lajes alveolares por meio de avaliação experimental.

Por outro lado, a partir da reflexão sobre a pesquisa e normalização a internacional, ficou claro que a validação das lajes alveolares enquanto produto somente pode ser feita com base em ensaios experimentais, pois são muitos os fatores que influenciam no comportamento da laje. Somente os ensaios de corpo-de-prova de amostras do concreto da laje não são suficientes para isto, nem apenas a demonstração teórica do cálculo. Sendo assim, seria muito importante que toda nova produção de lajes alveolares que ainda não tenha sido testada, que o

seja, a fim de que possa haver a comprovação técnica de que o desempenho do produto atende aos requisitos de projeto, tanto para o ELU quanto para o ELS.

A partir deste estudo, espera-se ter contribuído para a definição de um padrão para a realização de ensaios em lajes alveolares no Brasil. Com base no presente texto, pretende-se produzir um documento resumido, com as principais recomendações de procedimentos desses tipos de ensaios, os quais poderão ser colocados em forma de anexo junto ao texto base do Projeto NBR-14861:2009 *Lajes alveolares protendidas de estruturas de concreto pré-fabricadas – Requisitos e procedimentos*.

REFERÊNCIAS

- ÅKESSON, M. (1993). **Parameters influencing the shear tension failure of prestressed hollow core slabs**. Department of Structural Engineering and Mechanics Concrete Structures. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2003). **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto** - Procedimento. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9062 (2005). **Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-moldado**. Rio de Janeiro - RJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14861 (2002). **Laje pré-fabricada – Painel alveolar de concreto protendido - Requisitos**. Rio de Janeiro - RJ.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 8110-1:1997. Structural use of concrete**. Code of practice for design and construction.
- BROO, H.; LUNDGREN, K. (2002). **Finite element analyses of hollow core units subjected to shear and torsion**. Technical Report 1. Chalmers University, Sweden
- CARVALHO, R, C. (2009). Concreto Protendido. Notas de aula. Universidade Federal de São Carlos-UFSCar
- 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 1168:2005 – Precast concrete products – Hollow core slabs: Proposal for Amendment 3**. (English version). Brussels: CEN, 2009, Draft Version.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – CEN. **EN 1168:2005+A2 – Precast concrete products - Hollow core slabs: Proposal for Amendment 3**. (English version). Brussels: CEN, 2009, Draft Version.
- ECHO. **www.echo-engineering.net**. Acessado em 15 julho de 2008.
- FEDERATION INTERNATIONALE DE LA PRECONTRAINTE. (FIP) (1982). **Guide to good practice - shear at the interface of precast and in-situ concrete**. Wrexham Springs.
- FEDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAINTE, FIP (1992). **Guide to good practice: quality assurance of hollow core slab**. London, England.

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON, FIB (CEB-FIB) (2000). **Guide to good practice: special design considerations for precast prestressed hollow core floors.** Lausanne.

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON, FIB (CEB-FIB) (2007). **Treatment of imperfections in precast structural elements.** Lausanne.

FERNANDES, N.S.(2007).**Cisalhamento em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido: ensaio padrão de apoio para controle de qualidade.** 124f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Carlos.

FERREIRA, M.A.; FERNANDES, N.S.; CARVALHO, R.C.; ORTENZI, A. (2007). Avaliação de desempenho da resistência ao cisalhamento em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido. **Revista Concreto e Construções**, São Paulo, n.48, p.46-51, out./dez.

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

IBRAHIM, I .S., ELLIOTT, K. S., COPELAND, S. Bending Capacity of Precast Prestressed Hollow Core Slabs with Concrete Toppings. **Malaysian Journal of Civil Engineering**. 20(2) : 260 – 283, 2008.

INVELOP OY. www.invelopoy.com. Acessado em 01 maio de 2009.

KONG, F.K.; EVANS, R.H. (2001). **Reinforced and Prestressed Concrete.** Spon Press, UK.

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

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

NATIONAL PRECAST CONCRETE ASSOCIATION AUSTRALIA, NPCAA (2003). **Hollow core flooring technical manual.** Melbourne.

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

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

PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE (PCI) (1983) **Fabrication and shipment cracks in prestressed hollow-core slabs and double tees**, PCI.

PAJARI, M.; YANG, L. (1994). **Shear capacity of hollow core slabs on flexible supports**. VTT Technical Research Centre of Finland. Research Notes 1587.

RETTNE, L.; EDEKLING, K. (2006). **Improved design method for web shear tension failure in hollow core units**. 153f. Master's Thesis - Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2006.

TKALČIĆ, D.; BANIC D.; ZUPČIĆ M.; PERIĆ, Z. (2007). Prestressed hollow core slabs - shear resistance test according to HRN EN 1168:2005. In: FIB SYMPOSIUM, 2007, Dubrovnik. **Proceedings...** Dubrovnik, Croacia: FIB.

TELFORD, T. (1988). **Precast prestressed hollow core floors**. FIP Recommendation. London, England.

VASCONCELOS, A.C. (1980) **Manual pratico para a correta utilização dos aços no concreto protendido em obediência as normas atualizadas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos,. 64 p.

YANG, L. (1994). Design of prestressed hollow core slabs with reference to web shear failure. **ASCE Journal of Structural Engineering**. v. 120, n. 9, September, pp. 2675-2696.

ANEXO A

A.1 Identificação da peça

Código da Laje:

Número peça:

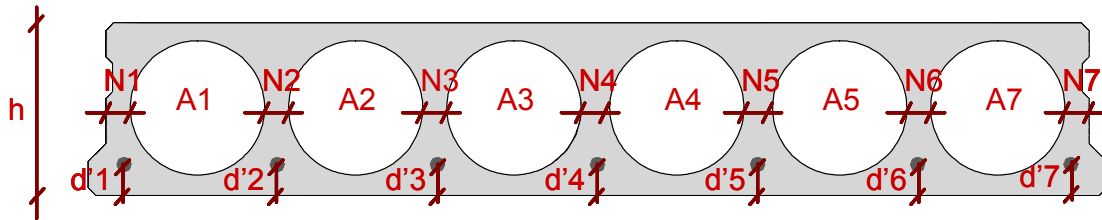
Lote:

Data de fabricação:

Modo Produtivo:

Peso da laje:

A.2 Medidas antes do ensaio



Altura média da Laje

h_{dir}	h_c	h_{esq}

Diâmetro dos Alvéolos

	Lado A						Lado B					
Diâmetro dos alvéolos horizontal	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Vertical												

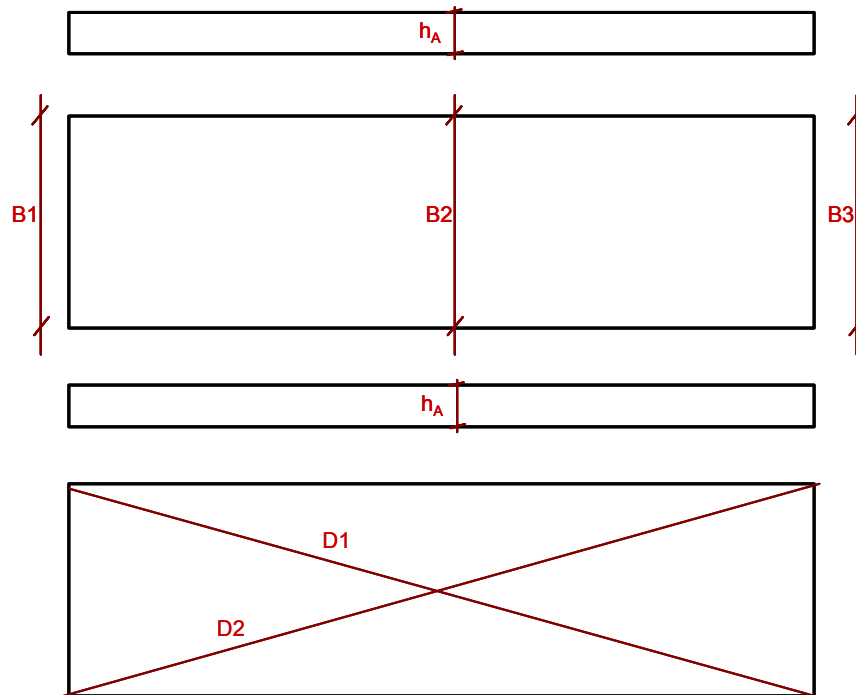
Distância entre a borda inferior e o centro da cordoalha

Lado A						Lado B					
d'1	d'2	d'3	d'4	d'5	d'6	d'1	d'2	d'3	d'4	d'5	d'6

Código da Laje:

Largura da nervura

Lado A						Lado B					
N'1	N'2	N'3	N'4	N'5	N'6	N'1	N'2	N'3	N'4	N'5	N'6



Comprimento da Laje

L1:

Largura da Laje

B1	B2	B3

Código da Laje:

A.3 Propriedades do concreto

f_{ck} :

Data:

Testemunhos da laje:

f_{ck} :

Data

A.4 Cordoalhas

Quantidade:

Diâmetro

Força de Protensão:

A.5 Observações: (altura da capa, f_{ck} capa, alvéolos preenchidos, existência de pré-fissuras, etc):

Código da Laje:

A.6 Dados de ensaio

Data do Ensaio:

Horário do início do ensaio:

Local do ensaio:

Temperatura ambiente:

Tipo de ensaio(flexão, cisalhamento, etc):

Taxa de carregamento (KN/min):

Carga de abertura de fissura:

Peso da viga de transferência:

A.7 Observações durante ensaio

A.8 Representação da fissuração pós-ensaio

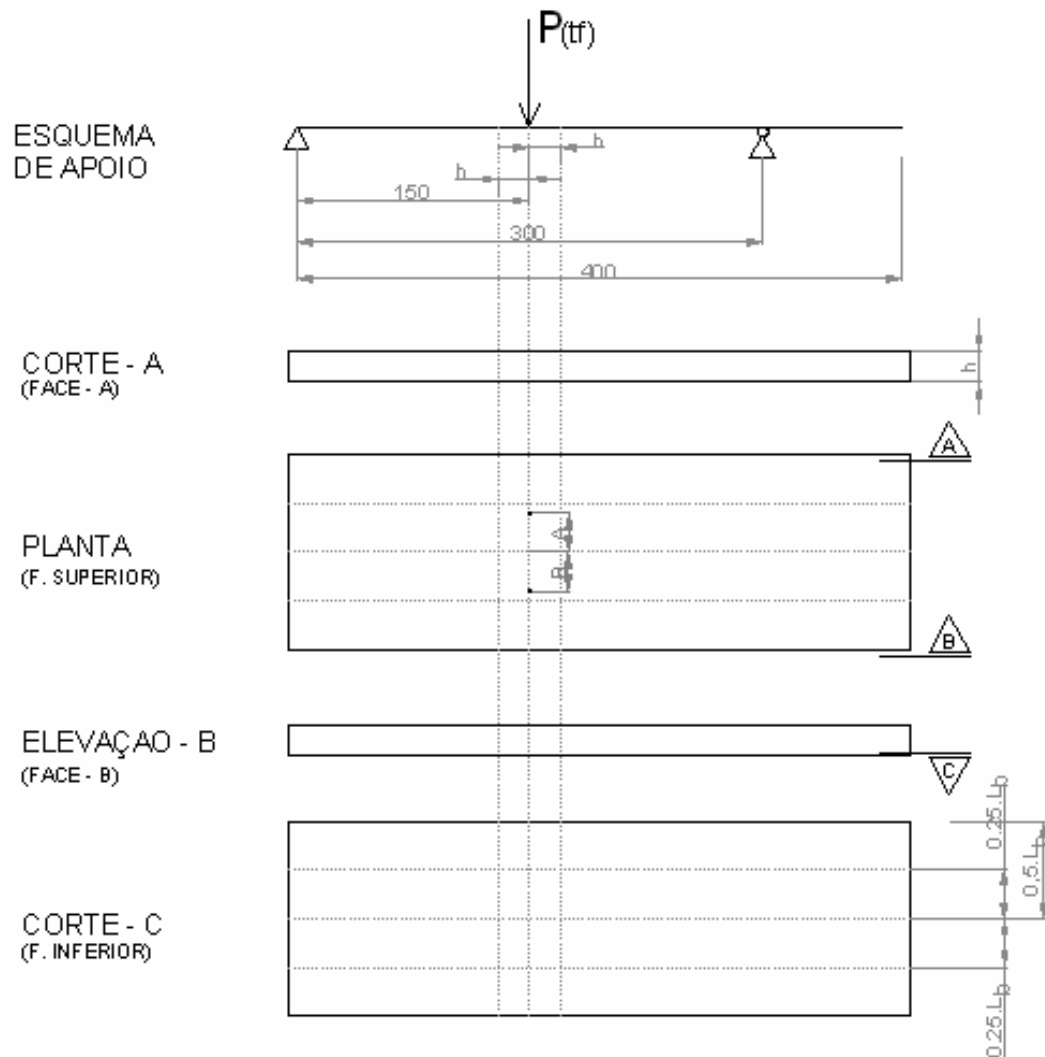


Figura A.1 - Indicação de fissuras (Fernandes, 2007)

A.9 Observações

A.10 Anexar fotos do ensaio

ANEXO B

Resistência à Flexão em Lajes Alveolares

B.1 Considerações Gerais

Em relação a sua geometria destaca-se a sua inércia com pequeno gasto de material em função da presença de vazios, chegando a uma participação destes de 50% na área da seção transversal tornando a peça extremamente eficiente tanto na capacidade de resistir esforços de flexão com evitar deformações excessivas.

Em relação ao processo de confecção do painel pode-se dizer que é singular e determina entre outras coisas as características principais deste tipo de peça. Descreve-se resumidamente a seguir o procedimento de confecção. A protensão é feita através da pré-tração conforme o esquema da Figura B.1 de CARVALHO (2009).

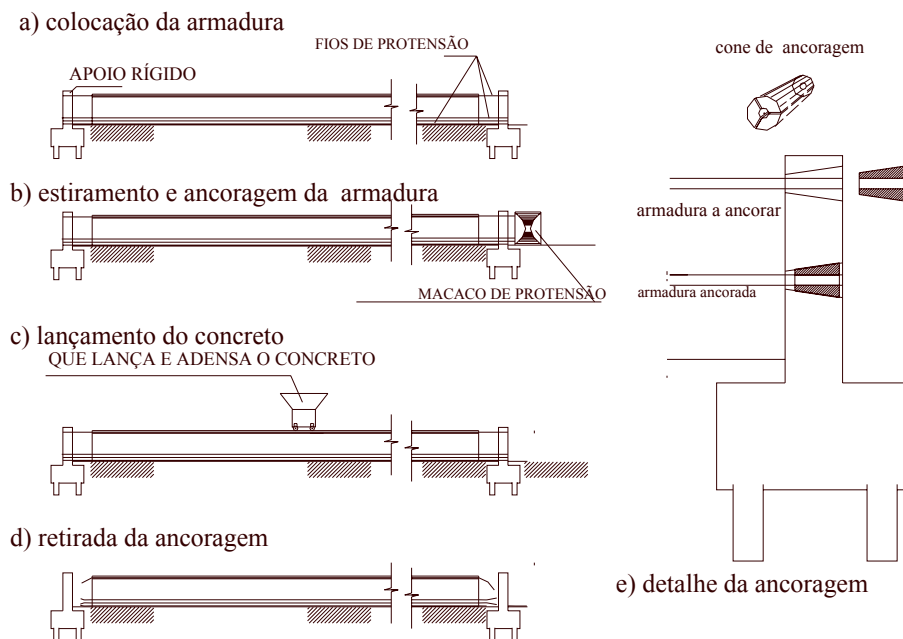


Figura B.1: Etapas da execução de uma laje alveolar e detalhe da ancoragem da armadura [CARVALHO (2007)].

Resumidamente tem-se:

Etapa 1: inicialmente posicionam-se os fios de protensão ancorados (extremidade afixada) em um dos apoios rígidos, por exemplo, o do lado esquerdo;

Etapa 2: através de um macaco que reage contra o apoio da direita estira-se a armadura de protensão geralmente compostas por cordoalhas. Após alcançar o estiramento necessário as

extremidades são ancoradas no apoio da direita. No Brasil a protensão é feita em cada cordoalha por vez, quando o ideal seria fazer a protensão de todos os cabos de uma só vez para se evitar possíveis excentricidades devido a eventuais diferenças de protensão (mesmo que mínimas) em cada cabo.

Etapa 3: A máquina indicada na Figura B.1 lança o concreto, vibrando-o e promovendo, além da forma dos vazios da seção, o acabamento da superfície superior. A partir deste instante, o concreto entra em contato com a armadura iniciando o processo de aderência. Daí o nome de aderência inicial ou pré-tensão, pois a armadura já estava tensionada quando do lançamento do concreto e a aderência se inicia com o começo da concretagem.

Etapa 4: Após a concretagem usa-se, em geral, de meios para se obter a aceleração da cura. Normalmente isto é feito através insuflamento de vapor com temperatura controlada e por um período previsto medido pela propriedade da maturação do concreto (produto de tempo por temperatura). Transcorrido o tempo suficiente para que o concreto curado tenha resistência adequada, promove-se a retirada da ancoragem de um dos apoios. A armadura tenta retornar ao comprimento que tinha antes da distensão provocando compressão no concreto em virtude de estar aderente ao mesmo.

Da descrição anterior verifica-se que a tensão nos cabos pode variar neste período devido às perdas iniciais que dão:

- a) Perda de protensão por deformação da ancoragem;
- b) Perda de protensão por relaxação da armadura
- c) Perda de protensão por deformação imediata do concreto

Após um certo período de tempo existirão ainda:

- d) Perda de protensão por retração do concreto;
- e) Perda de protensão por fluência do concreto;
- f) Perda de protensão por relaxação da armadura

A geometria da seção transversal de um painel alveolar é característica do equipamento empregado e sua forma. No caso do painel estudado a seção transversal tem esquematicamente a geometria dada na Figura B.2.

Na Figura B.2 são mostradas as possibilidades de colocação de armadura. Assim, embora o desenho represente sete cordoalhas próximas a face inferior e cinco próximas a face superior é possível, por exemplo, usar apenas cinco cordoalhas junto a face inferior.

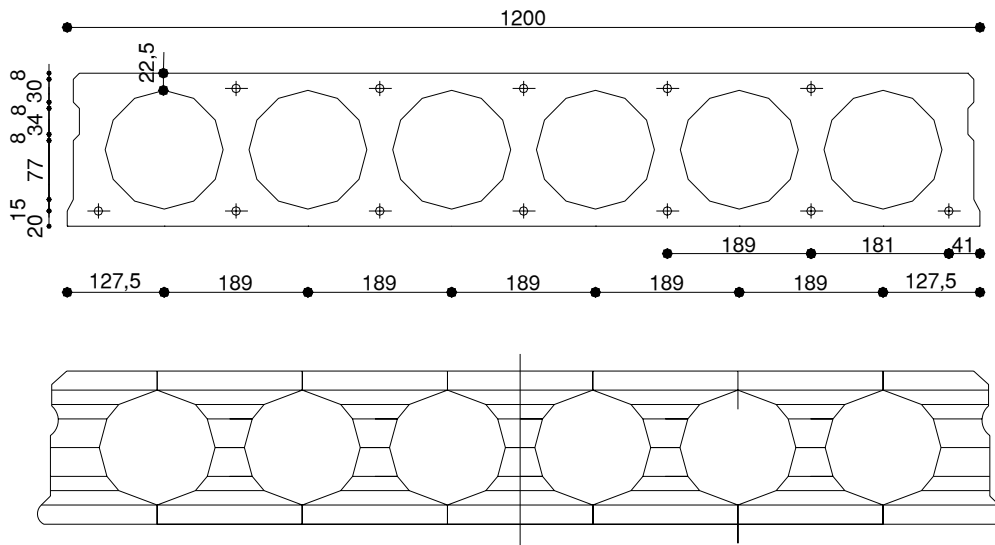


Figura B.2: Seção típica de lajes alveolares de 20 cm, com a marcação das possíveis posições de cordoalhas e com uma discretização em segmentos de retas. (cotas em mm).

B.2 Modelo Teórico para Resistência à Flexão

O modelo normalmente aceito, por todas as normas, para o comportamento da flexão é aquele, de maneira similar ao das vigas, em que se considera a seção transversal plana após a deformação, que a seção possa funcionar nos estádios I, II e chega ao colapso no estágio III. da maneira esquemática apresentada na Figura B.3.

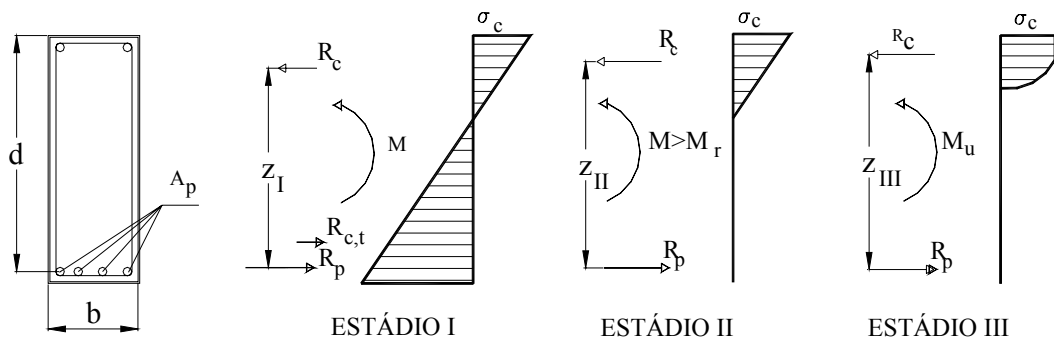


Figura B.3: Comportamento das tensões no concreto e as resultantes na da seção transversal deformada de uma viga de concreto protendido na flexão normal simples.

B.3 Momento de Fissuração

Admite-se que no limite da passagem do estágio I para o II se tenha o momento de fissuração que para peças de concreto armado é dado pela NBR6118:2003:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct,m} \cdot I_c}{y_t} \quad (1)$$

sendo:

$\alpha =$ 1,2 para seções em forma de "T" ou duplo "T" e 1,5 para seções retangulares;

I_c – momento de inércia da seção bruta de concreto;

$f_{ct,inf}$ – resistência à tração direta do concreto, conforme item 8.2.5 da norma, dada por: $f_{ct,m} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3}$;

y_t – distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada.

Para as peças em concreto protendido não há nenhuma expressão recomendada, mas pode-se dizer que o momento de fissuração é bastante afetado pelo efeito da protensão., inicialmente pela parcela de protensão dada pelo esforço Normal de protensão (N_p) e outra pelo momento (total) de protensão M_p que no caso por se tratar de peça isostática passa a ser apenas o momento isostático de protensão dado pelo produto de força de protensão multiplicado pela excentricidade.

Considerando :

$$\alpha_f \times f_{ctm} = \frac{N}{A} + \frac{M_p \times y_t}{I} - \frac{M_R \times y_t}{I}$$

e isolando o valor do momento de fissuração (M_R) chega-se a:

$$M_r = \left(\alpha_f f_{ctm} + \frac{N_p}{A} \right) \times \frac{I}{y_t} + M_p \quad (2)$$

Com

N_p – Força normal de protensão

A – Área de concreto da seção transversal

M_p – Momento de protensão, em peças isostáticas igual ao normal vezes a excentricidade em peças hiperestáticas ao momento final (isostático mais o hiperestático).

$$M_r = \left(\alpha_t f_{tcm} + \frac{N_p}{A} \right) \times \frac{I}{y_t} + N_p \times e \quad (3)$$

Com a expressão 3 conhecendo-se as características geométricas da laje, a resistência à tração do concreto e obtendo o valor de M_R do ensaio pode-se calcular o valor da força de protensão no instante do ensaio, ou seja, avaliar-se as perdas decorridas desde a protensão até a data de ensaio.

B.4. Momento Resistido

O momento resistido por uma seção é obtido a partir das hipóteses da norma NBR6118:2003 e de forma similar às peças de concreto armado, ver CARVALHO & FIGUEIREDO FILHO (2007) com as principais hipóteses resumidas a seguir e sem a aplicação dos coeficientes de segurança:

- a) As seções transversais permanecem planas**
- b) Solidariedade dos materiais:**
- c) As tensões de tração no concreto**, normais à seção transversal, podem ser desprezadas.
- d) A ruína da seção transversal** (como se deseja obter o momento de ensaio não serão consideradas as ações majoradas e nem os materiais com resistências minoradas f_{cd} e f_{yd}) para qualquer tipo de flexão no estado limite último fica caracterizada pelas deformações específicas de cálculo do concreto (ϵ_c) e do aço (ϵ_s), que atingem (uma delas ou ambas) os valores últimos (máximos) das deformações específicas desses materiais; os diversos casos possíveis de distribuição das deformações do concreto e do aço na seção transversal definem os domínios de deformação, que no caso de flexão simples são os domínios 2, 3 e 4 indicados na Figura B.4 (e indicados na Figura B.8).

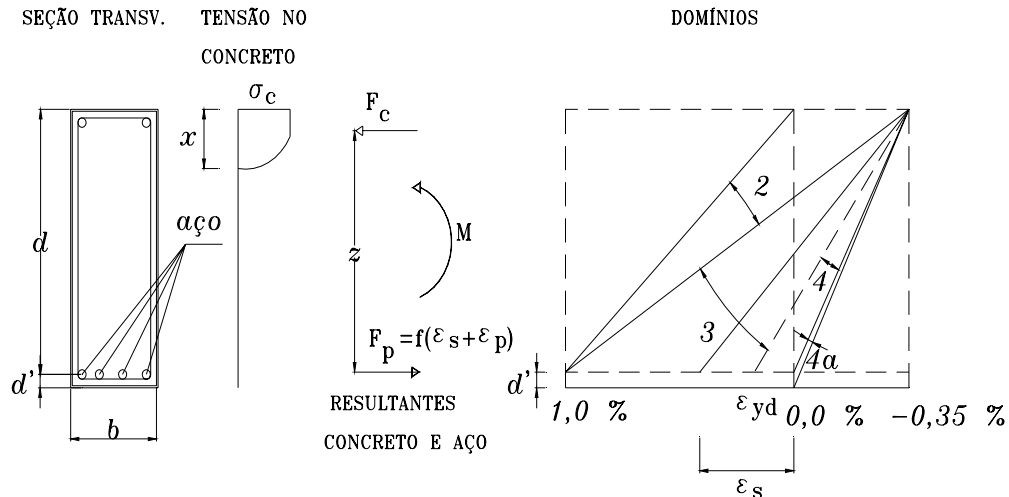


Figura B.4: Domínios de deformação no estado limite último em uma seção transversal para o caso da flexão simples.

e) **Encurtamentos últimos (máximos) do concreto:** no estado limite último, o encurtamento específico de ruptura do concreto vale:

- $\epsilon_{cu} = 3,5 \cdot 10^{-3}$ (3,5‰) nas seções não inteiramente comprimidas (flexão);
- $\epsilon_{cu} = 2,0 \cdot 10^{-3}$ (2,0‰) a $3,5 \cdot 10^{-3}$ (3,5‰) nas seções inteiramente comprimidas.

f) **Alongamento último das armaduras:** o alongamento máximo permitido ao longo da armadura tracionada é:

$$\epsilon_{su} = 10,0 \cdot 10^{-3} \text{ (10,0‰) para prevenir deformação plástica excessiva.}$$

g) **A tensão nas armaduras.** Admite-se que para a tensão na armadura de protensão com pré-tração seja preciso verificar o quanto a cordoalha de protensão já está previamente esticada (pré-tração) e também o quanto será preciso para que chegue a descompressão da seção. Tal raciocínio pode ser entendido analisando o esquema da Figura B.5. Assim de uma maneira geral a deformação específica na armadura de protensão (em módulo) é dada por:

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{pt=\infty} + \epsilon_7 + \epsilon_s \quad (3)$$

Com

ϵ_{total} - Deformação específica da armadura de protensão no instante do colapso

$\epsilon_{pt=\infty}$ - Deformação específica da armadura de protensão devido apenas a protensão após todas as perdas (neste caso até o dia de ensaio).

ϵ_7 - Deformação específica da armadura de protensão devido a descompressão.

ϵ_s – deformação específica na armadura de protensão para que o equilíbrio à flexão seja obtido.

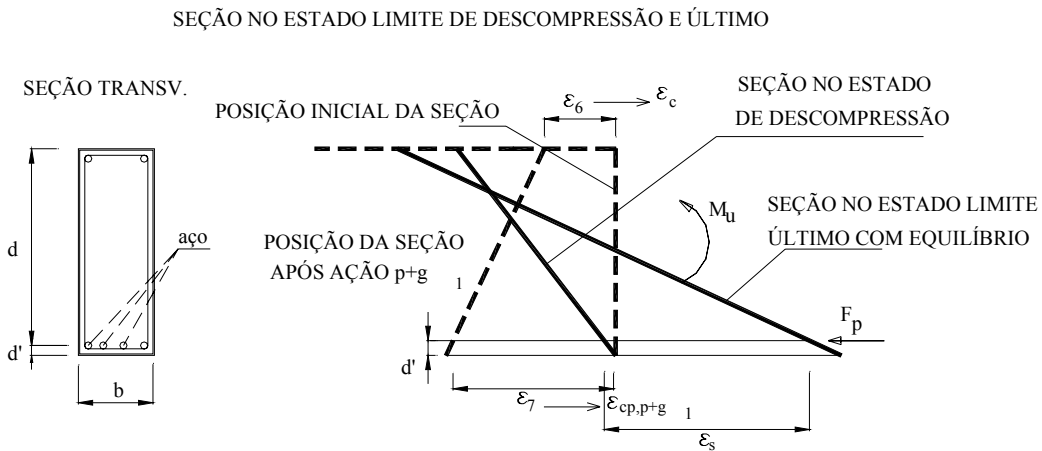


Figura B.5: Seção transversal nos estados limites de descompressão e limite último.

Para cálculo no estado-limite de serviço e último pode-se utilizar o diagrama de cálculo da tensão-deformação do aço é dado pelo gráfico esquemático da Figura B.6 (Figura 8.5 da NBR 6118:2003). Assim, com o valor de ϵ_{total} e o gráfico da Figura B.6 é possível conhecer a tensão final na armadura de protensão no colapso no caso em questão como se deseja comparar com o ensaio sem os coeficientes de ponderação.

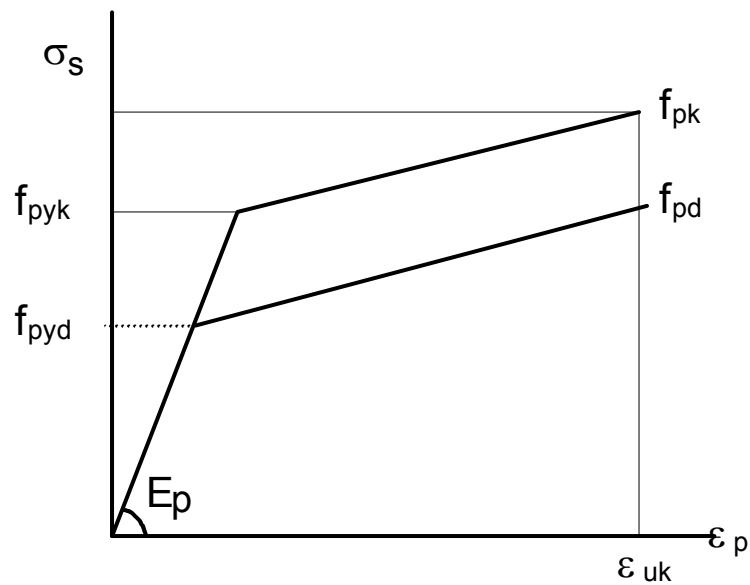


Figura B.6: Diagrama tensão-deformação de aços de protensão (figura 8.5 da NBR 6118:2003).

Outra maneira de se obter a tensão na armadura é através do uso da publicação de VASCONCELOS (1980) com os valores indicado na Tabela B.1 e que foram obtidas através de gráficos com ensaios do fabricante do aço.

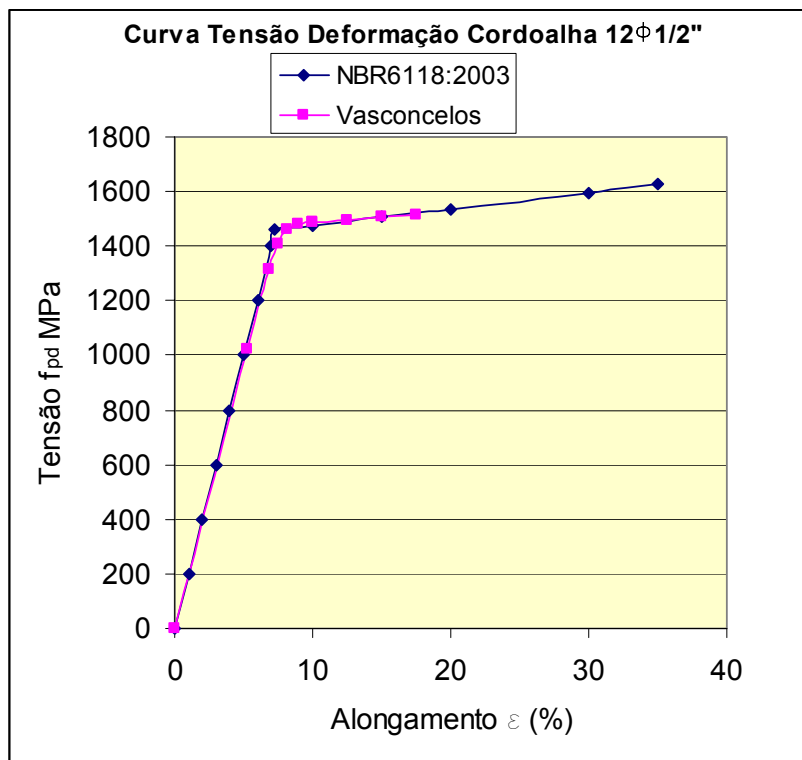


Figura B.7: Diagrama tensão-deformação da cordoalha CP190RB 12,5 na versão da NBR6118:2003 e de VASCONCELOS (1980).

Tabela B.1 - Tensão no aço σ_{sd} (MPa) [VASCONCELOS(1980)].

ε (‰)	5,25	6,794	7,438	8,167	9,000	9,962	10,00	12,50	15,00	17,5
CP175	1025	1264	1316	1344	1365	1368	1368	1378	1388	1397
CP190	1025	1314	1411	1459	1482	1486	1486	1496	1507	1517

ε (‰)	20,00	22,50	25,00	27,5	30,00	32,50	35,00	37,50	40,00
CP175	1407	1416	1426	1436	1445	1455	1464	1474	1484
CP190	1527	1538	1548	1559	1569	1579	1590	1600	1611

Na Figura B.7 vê-se a grande concordância entre o expressão da norma e os valores fornecidos por VASCONCELOS (1980).

h) Admite-se que a distribuição de tensões no concreto seja feita de acordo com o diagrama parábola-retângulo da Figura B.7, e com tensão de pico igual a f_{ck} ; o diagrama parábola-retângulo é composto por uma parábola do 2^o grau, com vértice na fibra correspondente à deformação de compressão de 2,0‰ e um trecho reto entre as deformações 2,0‰ e 3,5‰; Para análises no estado limite último, pode ser empregado o diagrama tensão-deformação idealizado mostrado na Figura B.6, em que se supõe que a variação de tensões no concreto se faz de acordo com o diagrama parábola-retângulo,

definido com tensão de pico igual a $0,85 \cdot f_{cd}$, com f_{cd} determinado conforme item 12.3.3 da NB1:2003 (item 1.8.1.2.4).

equações das curvas de tensão do concreto

$$\sigma_c = f_{ck} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{0,2\%} \right)^2 \right] \quad (4) \quad \text{e} \quad \sigma_c = 0,85 f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{0,2\%} \right)^2 \right] \quad (5)$$

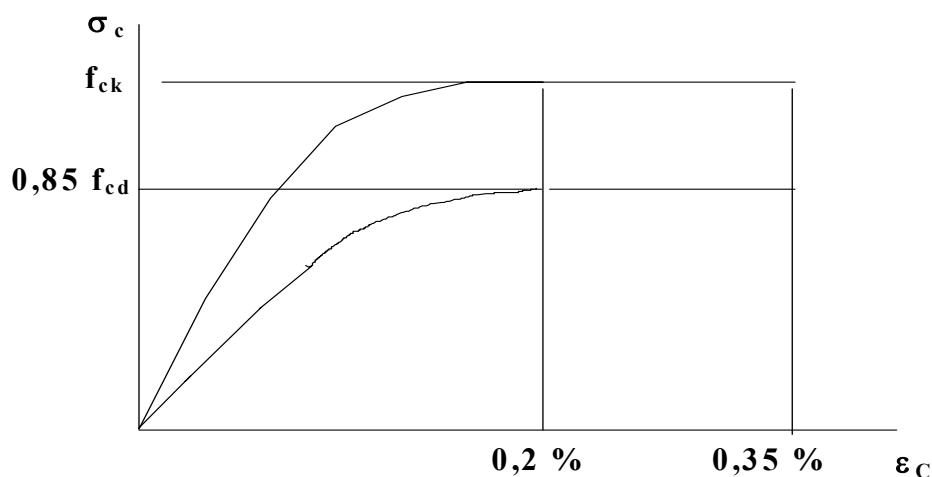


Figura B.7: Diagrama tensão-deformação do concreto (figura 8.2, NB6118:2003).

No caso em questão usa-se apenas a equação 4 que não está afetada pelo coeficiente de segurança. O diagrama parábola-retângulo pode ser substituído por um retângulo de altura $0,8 \cdot x$, onde x é a profundidade da linha neutra, com a seguinte tensão:

Desta forma, uma seção transversal de elemento protendido tem no estado limite último o esquema de tensões e ações mostrado na Figura B.4 e com os domínios considerados. No problema em questão em que se deseja verificar se o momento último de cálculo concorda com o valor de ensaio é na verdade um problema de verificação, pois são conhecidas a área da armadura de protensão e a geometria a resistência à compressão do concreto, desejando apenas verificar se o momento último de cálculo decorrente destas condições é superior ou inferior ao momento de ensaio.

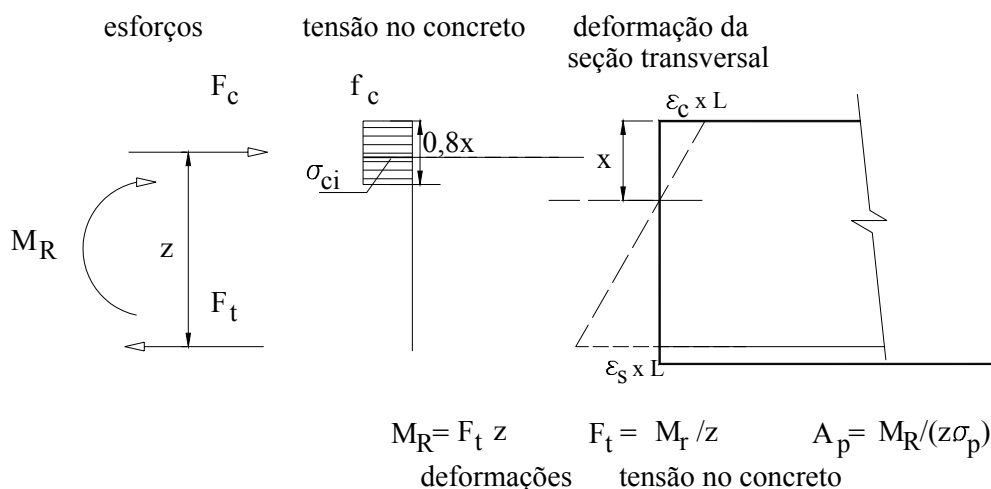


Figura B.8: Esquema Para o cálculo do momento resistente da seção transversal.

Para o cálculo do momento resistido deve-se partir de uma posição de linha neutra (contida nos domínios 2, 3 ou 4) e para este valor determinar as intensidades de F_c e F_t (ver Figura B.8). Se os valores destas forças forem iguais tem-se a solução do problema bastando calcular o momento resistido (M_R) que é comparado com o momento último (M_u) obtido no ensaio. Para a seção transversal da laje alveolar de altura de 20 cm, funcionando com ou sem capa, através de diversas tentativas constata-se que o o colapso ocorre junto ao domínio 2 sendo os valores de $\epsilon_c = 0,35\%$ $\epsilon_s = 1,0\%$. Conhecido os valores de ϵ_p (pré alongamento) de ϵ_7 valor de descompressão chega-se ao valor de $\epsilon_{total} = \epsilon_p + \epsilon_7 + \epsilon_s$ e portanto ao valor de σ_p e como $F_t = A_p \cdot \sigma_p$ e igualando as expressões da força de tração e compressão determina-se o valor da linha neutra x dada por:

$$x = \frac{F_t}{0,8 \cdot b \cdot f_{ck}}$$

Finalmente:

$$M_R = F_t \cdot (d - 0,4x).$$

Para a seção transversal com capa o raciocínio é o mesmo levando em conta que a peça trabalhará como uma seção composta, ou seja, considera-se como se a capa fosse moldada junto com a laje. Notar que em todos os esquemas anteriores os coeficientes de ações e de materiais não foram aplicados.

B.5 Análise Teórica

Para analisar os resultados dos ensaios é preciso inicialmente fazer uma análise calculando os valores teóricos esperados para o momento de fissuração e o momento resistente da seção transversal. Para tanto são considerados os seguintes valores como dados básicos:

- CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DA SEÇÃO (seção sem capa)

$A = 1377 \text{ cm}^2$ – área geométrica da seção

$I = 67120 \text{ cm}^4$ – inércia da seção geométrica

$h = 20 \text{ cm}$ – altura da seção

$I_I = 68026 \text{ cm}^4$ – inércia da seção homogeneizada (5 cm² de área de aço)

$I_{II} = 5095 \text{ cm}^4$ – inércia da seção no estágio II puro (5 cm² de área de aço)

$d = 16,5 \text{ cm}$ - altura útil da seção (distância do cg da armadura a fibra mais comprimida)

- CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO CONCRETO

$f_{cj} = 30 \text{ MPa}$ resistência à compressão do concreto na data da efetivação da protensão.

$f_{cj} = 41,3 \text{ MPa}$ resistência à compressão do concreto na data do ensaio obtido através de corpo de prova normalizado.

$f_{cj} = 43,3 \text{ MPa}$ resistência à compressão do concreto na data do ensaio obtido através de testemunho extraído de trecho de laje não ensaio mas feito na mesma pista e com condições iguais as dos elementos.

$f_{cj} = 33,2 \text{ MPa}$ resistência à compressão do concreto na data do ensaio obtido de corpo de prova da capa.

$f_{ct} = 4,093 \text{ MPa}$ resistência à tração diametral do concreto na data do ensaio obtido através de corpo de prova normalizado.

- DADOS RELATIVOS AO AÇO DE PROTENSÃO

Aço categoria CP190RB

Unidade: cordoalha de $\phi = 1/2''$ com área de 1 cm^2

Armadura total na laje = 5 cordoalhas

$\sigma_{pi} = 1140 \text{ MPa}$ tensão inicial de protensão aplicada às cordoalhas (valor abaixo do Máximo permitido pela NBR6118:2003).

- DADOS COMPLEMENTARES CONSIDERADOS

Temperatura média de 20°C

t=10 dias idade do concreto quando executado o ensaio

$U_r = 70\%$ umidade relativa do ambiente

Cimento Ari

Abatimento do concreto menor que 4 cm

B.6 Cálculo das perdas

B.6.1 Iniciais

a) Deformação por ancoragem

Considerando $\Delta \ell = 0,6$ cm e pista de 100m

$$\Delta \sigma = 0,6 \times 1,9 \times 10^5 = 11,4 \text{ MPa}$$

b) Relaxação

Considerando $\sigma_i = 1140 - 11,4 = 1128,6$

$$r = \frac{1128,6}{1900} = 0,594 \text{ que corresponde a um valor de } \psi_{100} \text{ de } 1,22\% \text{ e para um dia}$$

$$\psi_{1\text{dia}} = 1,22 \left(\frac{1}{41,67} \right)^{0,15} = 0,684\%$$

$$\Delta \sigma_r = \frac{0,684}{100} \times 1128,6 = 7,71 \text{ MPa}$$

c) Deformação imediata do concreto

Como são 5 cabos (5 cm²) $N_p = 5 \times (114 - 1,14 - 0,771) = 560,4$ kN (força total de protensão)

Com os dados da geometria tem-se $e_p = 0,065$ m excentricidade da força de protensão e para valor de $E_c = 5600 \sqrt{f_{cj}} = 5600 \sqrt{30} = 30672$ MPa

$$\sigma_{\text{cg,cabos}} = \frac{N_p}{A} + \frac{N_p \times e_p^2}{I} - \frac{M_{g1} \times e_p}{I} = \frac{560,4}{0,1377} + \frac{560,4 \times 0,065^2}{6,71 \times 10^{-4}} - \frac{6,88 \times 0,065}{6,71 \times 10^{-4}} = 6930 \text{ kN/m}^2$$

M_{g1} = momento de peso próprio para a peça na sua retirada da pista

A, I – área e momento de inércia da seção transversal da peça

ε_i = valor correspondente à descompressão

$$\varepsilon_7 = \varepsilon_{\text{concreto}} = \frac{\sigma_{\text{cg,cabos}}}{E_c} = \frac{6930}{30672000} = 2,25 \times 10^{-4}$$

$$\Delta \sigma_{pd} = \varepsilon_7 \times E_p = 2,25 \times 10^{-4} \times 1,9 \times 10^5 = 42,75 \text{ MPa}$$

Assim logo após a retirada da pista a armadura de protensão está submetida a

$$\sigma_p (t=1 \text{ dia}) = 1140 - 11,40 \cdot 7,71 - 42,92 = 1078 \text{ MPa}$$

B.6.2 Perdas diferidas

a) Retração do concreto

A expressão da perda devido a retração do concreto é dada por:

$$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) = \varepsilon_{cs}(t, t_0) \cdot E_p$$

$$\text{Com } \varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs00} [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)]$$

Sendo: $\varepsilon_{cs00} = \varepsilon_{1s} \cdot \varepsilon_{2s}$ = valor final da retração

ε_{1s} = coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente e da consistência do concreto (Tabela 5.2)

ε_{2s} = coeficiente dependente da espessura fictícia da peça

$$\varepsilon_{2s} = \frac{33 + 2h_{fic}}{20,8 + 3h_{fic}}$$

em que h_{fic} é a espessura fictícia definida adiante e empregada nesta fórmula em centímetros

$$h_{fic} = \gamma \frac{2A_c}{u_{ar}}$$

γ = coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente U% (Tabela 5.2)

sendo $\gamma = 1 + \exp(-7,8 + 0,1U)$

A_c = área da seção transversal da peça

u_{ar} = parte do perímetro externo da seção transversal da peça em contato com o ar

$\beta_s(t)$ ou $\beta_s(t_0)$ = coeficiente relativo á retração, no instante t ou t_0 (Fig. 5.1)

t = idade fictícia do concreto no instante considerado, em dias (a idade fictícia será definida também).

Aplicando os valores da laje em questão tem-se

$$h_{fic} = \gamma \frac{2A_c}{u_{ar}} = 1,5 \times \frac{2 \times 1377}{2 \times (1,35 + 0,20)} = 9,5 \text{ cm}$$

$$\varepsilon_{2s} = \frac{33 + 2h_{fic}}{20,8 + 3h_{fic}} = \frac{33 + 2 \times 9,5}{20,8 + 3 \times 9,50} = 1,175$$

$\varepsilon_{1s} = -2,5 \times 10^{-4}$ (tabela da norma com 70% umidade e abatimento menor que 4 cm)

$$\varepsilon_{cs00} = \varepsilon_{1s} \cdot \varepsilon_{2s} = 1,175 \times 2,5 \times 10^{-4} = 2,93 \times 10^{-4}$$

$t = 10$ dias e $t_0 = 1$ dia resulta $\beta_s(10 \text{ dias}) = 0,22$ e $\beta_s(1 \text{ dia}) = 0,12$

Assim,

$$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) = \varepsilon_{cs}(t, t_0) \cdot E_p = 2,93 \times 10^{-4} \times (0,22 - 0,12) \times 1,9 \times 10^5 =$$

$$\Delta\sigma_{p,s}(10, 1) = 5,58 \text{ MPa}$$

Para $t = \infty$ $\beta_s(\infty) = 1,0$

$$\Delta\sigma_{p,s}(\infty, t_0) = \varepsilon_{cs}(\infty, t_0) \cdot E_p = 2,93 \times 10^{-4} \times (1 - 0,12) \times 1,9 \times 10^5 = 49 \text{ MPa}$$

b) Fluência

A perda por fluência pode ser obtida usando:

$$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) = \varepsilon_{c,0} \phi(t, t_0) \cdot E_p$$

ou ainda
$$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) = \frac{\sigma_{cgp}}{E_c} \phi(t, t_0) \cdot E_p$$

com finalmente
$$\Delta\sigma_{p,s}(t, t_0) = \sigma_{cgp} \cdot \phi(t, t_0) \cdot \alpha_p$$

Sendo

$$\phi(t, t_0) = \phi_a + \phi_{foo} [\beta_f(t) - [\beta_f(t_0)]] + \phi_{doo} \beta_d$$

Onde:

t = idade fictícia do concreto no instante considerado, em dias

t_0 = idade fictícia do concreto ao ser feito o carregamento, em dias

ϕ_a = coeficiente de fluência rápida, determinado pela expressão

$$\phi_a = 0,8 \left[1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)} \right]$$

$\frac{f_c(t_0)}{f_c(t_{\infty})}$ = função de crescimento da resistência do concreto com a idade,

$$\frac{f_c(t_0)}{f_c(t_{\infty})} = \frac{9t \cdot (t + 42)}{(9t + 40) \cdot (t + 61)}$$

$\varphi_{f\infty}$ = $\varphi_{1c} \cdot \varphi_{2c}$ = valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível

φ_{1c} = coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente U% e da consistência do concreto dado pela tabela 5.2.

φ_{2c} = coeficiente dependente da espessura fictícia h_{fic} da peça, definida por

$$\varphi_{2c} = \frac{42 + h_{fic}}{20 + h_{fic}}$$

com h_{fic} em centímetros

$\beta_f(t)$ ou $\beta_f(t_0)$ = coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto (tabela na Norma)

$\varphi_{d\infty}$ = valor final do coeficiente de deformação lenta reversível que é considerado igual a 0,4

β_d = coeficiente relativo à deformação lenta reversível função do tempo (t - t_0) decorrido após o carregamento

Aplicando os valores numéricos, é necessário inicialmente considerar a idade fictícia em dias dada por:

$$t = \alpha \sum_i \frac{T_i + 10}{30} \cdot \Delta t_{ef, i}$$

com $\alpha=3$ (cimento ARI) $T_i = 20^{\circ}\text{C}$,

Assim para $t_0 = 1 \times 3 = 3$ dia e para $t = 10 \times 3 = 30$ dias.

A perda é calculada da mesma forma mudando-se apenas o valor do coeficiente de fluência dado agora por:

$$\phi_a = 0,8 \left[1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_{\infty})} \right] = 0,8 \left[1 - \frac{20}{40} \right] = 0,4$$

$\varphi_{1c} = 1,5$ (tabela Norma)

$$\varphi_{2c} = \frac{42 + h_{fic}}{20 + h_{fic}} = \frac{42 + 9,5}{20 + 9,5} = 1,746$$

$$\varphi_{foo} = \varphi_{1c} \cdot \varphi_{2c} = 1,5 \times 1,746 = 2,619$$

$$\beta_f(30) = 0,42 \quad \beta_f(3) = 0,13$$

$$\varphi_{doo} = 0,4$$

$$\beta_d = \frac{t - t_o + 20}{t - t_o + 70} = \frac{30 - 3 + 20}{30 - 3 + 70} = 0,5$$

$$\varphi(30,3) = \varphi_a + \varphi_{foo} [\beta_f(t) - [\beta_f(t_o)]] + \varphi_{doo} \beta_d = 0,4 + 2,619 \times (0,42 - 0,13) + 0,4 \times 0,5 =$$

$$\varphi(30,3) = 1,359$$

$$\Delta\sigma_{p,s}(30,3) = \frac{6,93}{30672} \cdot 1,359 \cdot 1,95 \times 10^5 = 58,36 \text{ MPa}$$

Para $t = \infty$

$$\beta_f(\infty) = 0,98, \quad \beta_d = 1$$

$$\varphi(\infty,3) = \varphi_a + \varphi_{foo} [\beta_f(t) - [\beta_f(t_o)]] + \varphi_{doo} \beta_d = 0,4 + 2,619 \times (0,98 - 0,13) + 0,4 \times 1,0 = 3,0$$

$$\Delta\sigma_{p,s}(\infty,3) = \frac{6,93}{30672} \cdot 3,0 \cdot 1,90 \times 10^5 = 129 \text{ MPa}$$

c) Relaxação

O cálculo da perda por relaxação da armadura pode ser feito através da expressão

$$\psi(t, t_o) = \frac{\Delta\sigma_{pr}(t, t_o)}{\sigma_{pi}}$$

onde:

$\Delta\sigma_{pr}(t, t_o)$ = perda de tensão por relaxação pura (com comprimento constante) desde o instante t_o do estiramento da armadura até o instante t considerado

σ_{pi} = tensão da armadura de protensão no instante de seu estiramento

A relaxação de fios e cordoalhas, após 1000h a 20°C (Ψ_{1000}) e para tensões variando de 0,5 a 0,8 f_{ptk} , obtida em ensaios descritos na NBR 7484, não deve ultrapassar os valores dados na NBR 7482 e na NBR 7483, respectivamente.

Para efeito de projeto, os valores de Ψ_{1000} da Tabela B.2 podem ser adotados.

Tabela B.2 : Valores de Ψ_{1000} , em %

Tensão inicial	Cordoalhas		Fios		Barras
	RN	RB	RN	RB	
0,5 f _{ptk}	0	0	0	0	0
0,6 f _{ptk}	3,5	1,3	2,5	1,0	1,5
0,7 f _{ptk}	7	2,5	5	2	4
0,8 f _{ptk}	12	3,5	8,5	3	7

Os valores correspondentes a tempos diferentes de 1.000 horas, sempre a 20⁰C, podem ser determinados a partir da seguinte expressão:

$$\psi(t, t_0) = \psi_{1000} \cdot \text{para } (t, t_0) \text{ em dias}$$

- para tensões inferiores a 0,5 f_{ptk} admite-se que não haja perda de protensão por relaxação;
- Para valores intermediários dados na tabela 5.4 pode ser feita uma interpolação linear;
- Para tempo infinito pode-se considerar $\psi(\infty, t_0) = 2,5 \cdot \psi_{1000}$

Considerando os valores numéricos em questão tem-se:

$$\sigma_{pi} = 1140 - 11,40 - 7,71 - 42,92 = 1078$$

$$R = \frac{1078}{1900} = 0,567$$

Consultando a Tabela B.2 tem-se a situação indicada e o valor desejado é k

0,5 f _{ptk}	0
0,567 f _{ptk}	K
0,6 f _{ptk}	1,3

$$\frac{k - 0}{1,3 - 0} = \frac{0,567 - 0,5}{0,60 - 0,50} \quad \Psi_{1000} = k = 0,871\%$$

$$\psi_{10dias} = 0,871 \times \left(\frac{10 - 1}{41,67} \right)^{0,15} = 0,692\%$$

$$\text{Como } \psi(t, t_0) = \frac{\Delta\sigma_{pr}(t, t_0)}{\sigma_{pi}} \text{ então}$$

$$\Delta\sigma_{pr} = 0,00692 \times 1078 = 7,48 \text{ MPa}$$

para tempo $t = \infty$

$$\psi_{\infty} = 2,5 \times \psi_{1000} = 2,5 \times 0,871 = 2,1775$$

$$\Delta\sigma_{pr}(t=\infty)=0,02175 \times 1078= 23,44 \text{ MPa}$$

Assim, após dez dias a tensão na armadura vale;

$$\sigma_p(t=10 \text{ dias})= 1078-5,58-58,36-7,46=1006 \text{ MPa} \quad (12\% \text{ menos em relação a inicial})$$

$$\sigma_p(t=\infty)= 1078-49-129-23,4=876 \text{ MPa} \quad (23\% \text{ menos em relação a inicial})$$

B.7 Momento de Fissuração

B.7.1 Seção sem capa

O mando a expressão 3 que define o momento de fissuração percebe-se que o mesmo é função basicamente da resistência à tração do concreto (f_{ctm}), forma da seção (α) e efeito da protensão (N_p e e).

$$M_r = \left(\alpha \cdot f_{ctm} + \frac{N_p}{A} \right) \times \frac{I}{y_t} + N_p \times e \quad (3)$$

Imaginando inicialmente um valor de resistência à tração que seria usado pelo projetista, ou seja, segundo a NBR6118:2003 assim o valor da resistência à tração é dada por $f_{ct} = 0,3 \times \sqrt[3]{f_{cj}^2} = 0,3 \times \sqrt[3]{40^2} = 3,508 \text{ MPa}$.

$$\text{Assim, } M_r = \left(1,5 \times 3508 + \frac{503,3}{0,1377} \right) \times \frac{6,71 \times 10^{-4} I}{0,10} + 503,3 \times 0,065 = 92,55 \text{ kN.m}$$

Usando agora o valor obtido pela compressão diametral que é de $f_{ct}=4,5 \text{ MPa}$ e segundo a norma deve ser usando com 0,9 de seu valor assim $f_{ct} = 4,09 \text{ MPa}$

$$M_r = \left(4090 + \frac{503,3}{0,1377} \right) \times \frac{6,71 \times 10^{-4} I}{0,10} + 503,3 \times 0,065 = 84,6 \text{ kN.m}$$

Finalmente usando o valor de f_{xt} sem o coeficiente 1,5

$$M_r = \left(3600 + \frac{503,3}{0,1377} \right) \times \frac{6,71 \times 10^{-4} I}{0,10} + 503,3 \times 0,065 = 81,3 \text{ kN.m}$$

B.7.2 Seção com capa

Para a seção com capa é preciso inicialmente definir as características geométricas da seção.

Inicialmente com se trata de elemento com concreto diferenciado faz-se uma redução na largura na relação das resistências de compressão

$$b_{\text{capa}} = 1,2 \times \frac{33,2}{43,3} = 0,92 \text{ m}$$

$$y_{\text{cg}} = \frac{b_{\text{capa}} \times h_{\text{capa}} \times \frac{h_{\text{capa}}}{2} + A \cdot (h/2 + h_{\text{capa}})}{b_{\text{capa}} \times h_{\text{capa}} + A} = \frac{0,92 \times 0,05 + 0,1377 \times (0,10 + 0,05)}{0,046 + 0,1377} =$$

$$y_{\text{cg}} = 0,1189 \text{ m}$$

Assim, o momento de inércia fica igual a

$$I_f = 0,046 \times (0,1189 - 0,025)^2 + (0,05^3 \times 0,92 / 12) + 0,1377 \times (0,15 - 0,1189)^2 + 6,71 \times 10^{-4} =$$

$$I_f = 1,221 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$y_i = 0,25 - 0,1189 = 0,1311 \text{ m (distância da fibra mais tracionada ao centro de rotação)}$$

$$W_i = (I_f / y_i) = (1,221 \times 10^{-3}) / 0,1311 = 9,298 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ (módulo de resistência em relação ao bordo tracionado)}$$

Finalmente tem-se

$$M_r = \left(\alpha \cdot f_{\text{ctm}} + \frac{N_p}{A} \right) \times \frac{I}{y_t} + N_p \times e = \left(1,5 \times 3508 + \frac{503,3}{0,2002} \right) \times 9,298 \times 10^{-3} + 503,3 \times 0,065 =$$

$M_r = 105,0 \text{ kN.m}$ para a demais situações consideradas para a seção sem capa tem-se para este caso:

$$f_{\text{ct}} = 4090 \text{ kN/m}^2 \rightarrow M_r = 103,4 \text{ kN.m}$$

$$f_{\text{ct}} = 3600 \text{ kN/m}^2 \rightarrow M_r = 89,5 \text{ kN.m}$$

Apenas para se ter uma idéia calcula-se agora os momentos para três situações de resistência à tração para a seção com capa em concreto armado:

$$\begin{aligned} M_r &= (\alpha \cdot f_{\text{ctm}}) \times \frac{I}{y_t} = 1,5 \times 3508 \times 9,298 \times 10^{-3} = 48,9 \text{ kN.m} \\ &= 4090 \times 9,298 \times 10^{-3} = 38,0 \text{ kN.m} \\ &= 360 \times 9,298 \times 10^{-3} = 33,5 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Para se ter uma idéia do funcionamento das seções de laje alveolar com e sem protensão e com variação do momento de fissuração constitui-se o gráfico da Figura B.7 .

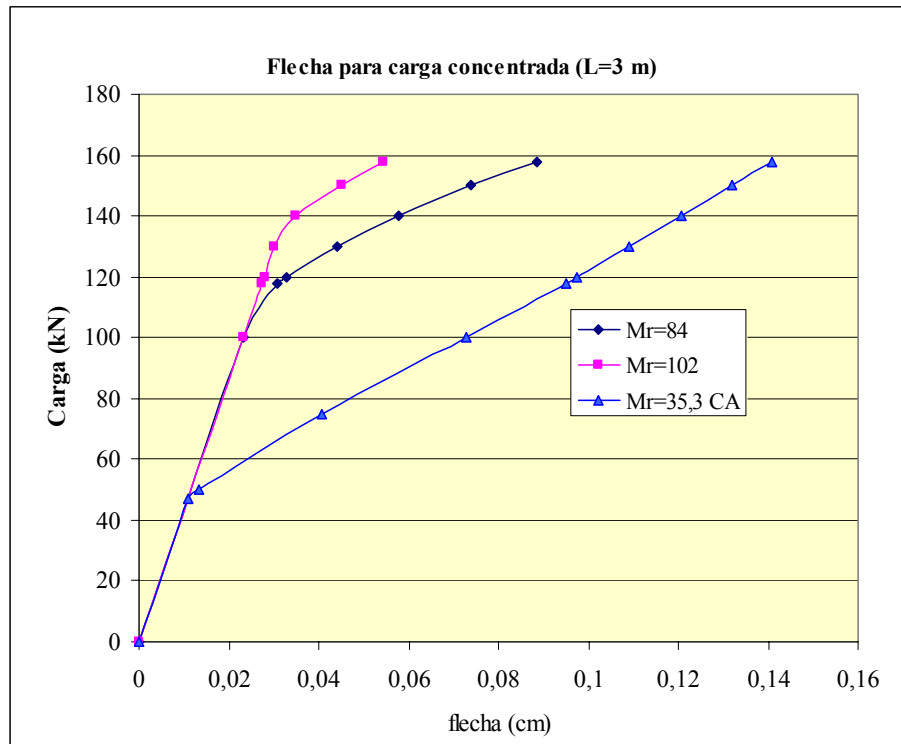


Figura B.9: Força no atuador (vão de 3m) e variação da flecha com variação do momento fletor e momento de seção sem capa.

B.8 Momento resistente da seção

B.8.1 Seção sem capa

O cálculo do momento resistente da seção (sem coeficientes de majoração de ações e minoração dos materiais) é cálculo através das expressões contida na Figura B.10.

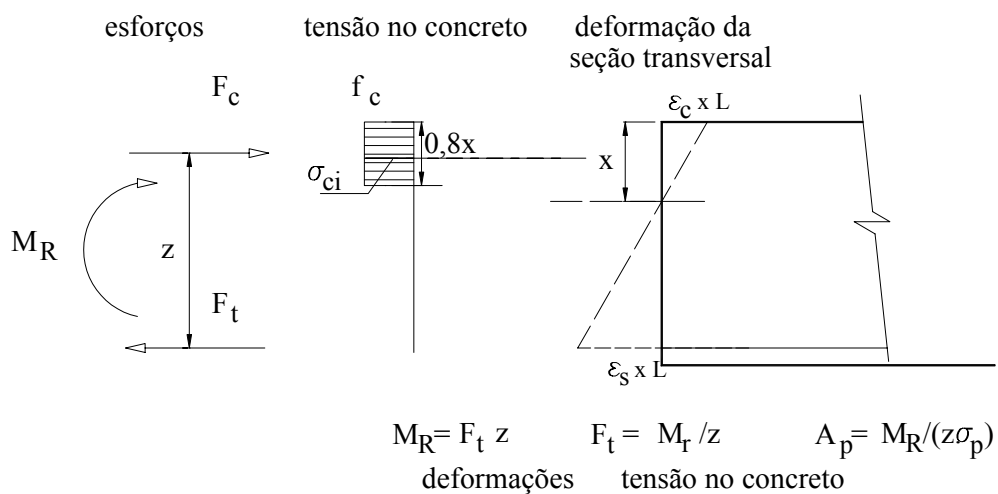


Figura B.10 - Esquema Para o cálculo do momento resistente da seção transversal.

Para várias tentativas percebe-se que a taxa de armadura, altura de seção que o problema está no domínio dois assim $\varepsilon_s=1\%$. O valor do pré-alongamento (ε_p) fica definido a partir da tensão na armadura de protensão aos 10 dias $\sigma_p=1006$ MPa que a partir da lei de HOOKE conduz a $\varepsilon_p=1006/(1,9 \times 10^5)=0,529\%$. O valor da deformação correspondente a descompressão já calculada nas perdas iniciais é de $\varepsilon_7=0,0225\%$

Desta maneira tem-se:

$\varepsilon_{total} = \varepsilon_p + \varepsilon_7 + \varepsilon_s = 0,529 + 1,0 + 0,0225 = 1,552\%$ que consultando a tabela 1 (VASCONCELOS) resulta em $\sigma_{pd}=1500$ MPa ou $\sigma_{pk}=1500 \times 1,15 = 1725$ MPa ou $\sigma_{pk}=172,5$ kN/cm².

Assim a força na armadura é dada por:

$$F_t = A_p \cdot \sigma_p = 5 \times 172,5 = 862,5 \text{ kN}$$

Igualando as expressões da força de tração e compressão, considerando o diagrama parábola retângulo, determina-se o valor da linha neutra x dada por:

$$x = \frac{F_t}{0,8 \times b \times f_{ck}} = \frac{862,5}{0,8 \times 1,25 \times 43300} = 1,991 \times 10^{-2} \text{ m}$$

e finalmente $M_R = F_t \cdot (d - 0,4x) = 862,5 \times (0,165 - 0,4 \times 0,0199) = 135$ kN.m

B.8.2 Seção com capa

Para a seção transversal com capa o raciocínio é o mesmo levando em conta que a peça trabalhará como uma seção composta, ou seja, considera-se como se a capa fosse moldada junto com a laje. Notar que em todos os esquemas anteriores os coeficientes de ações e de materiais não foram aplicados.

Igualando as expressões da força de tração e compressão, considerando o diagrama parábola retângulo, determina-se o valor da linha neutra x dada por:

$$x = \frac{F_t}{0,8 \times b \times f_{ck}} = \frac{862,5}{0,8 \times 1,25 \times 33200} = 2,597 \times 10^{-2} \text{ m}$$

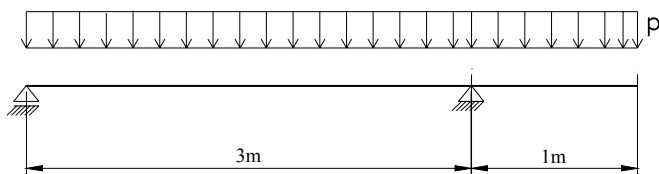
Finalmente:

$$M_R = F_t \cdot (d - 0,4x) = 862,5 \times (0,215 - 0,4 \times 0,02597) = 176 \text{ kN.m}$$

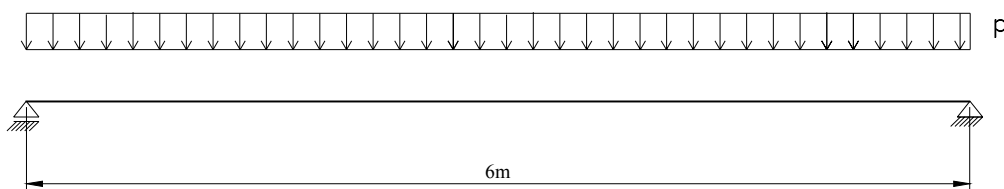
B.8.3 *Peso próprio*

Para poder fazer a comparação do momento resistente teórico com o momento último obtido do ensaio é preciso agora calcular o peso próprio da laje que esta sempre presente nas situações de ensaio.

ESQUEMA ESTRUTURAL (ensaio com peças de 4 m)



ESQUEMA ESTRUTURAL (ensaio com peças de 6m)



No primeiro caso o momento pode ser obtido por

Peças de 4m

$$M_{1/2 \text{ do vão}} = 0,875p = 0,875 \times 0,1377 \times 25 = 3,0 \text{ kN.m (seção sem capa)}$$

$$M_{1/2 \text{ do vão}} = 0,875p = 0,875 \times 0,2002 \times 25 = 3,83 \text{ kN.m (seção com capa)}$$

Peças de 6m

$$M_{1/2 \text{ do vão}} = 4,5p = 4,5 \times 0,1377 \times 25 = 15,5 \text{ kN.m (seção sem capa)}$$

$$M_{1/2 \text{ do vão}} = 4,5p = 4,5 \times 0,2002 \times 25 = 22,5 \text{ kN.m (seção com capa)}$$

B.9 RESUMO FINAL

B.9.1 MOMENTOS RESISTENTES

Sem capa $M_R = 135$

Com capa $M_R = 176$

para ensaios com peça de 4 m

Sem capa $M_R = 135 - 3,0 = 132 \text{ kN.m}$ $M_u = 100 \text{ kNm no máximo 130}$

Com capa $M_R = 176 - 3,83 = 172,2 \text{ kN.m}$ $M_u = 180 \text{ kNm}$

para ensaios com peça de 6m

Sem capa $M_R = 135 - 15,5 = 119,5 \text{ kN.m}$ $M_u = 120 \text{ kNm}$

Com capa $M_R = 176 - 22,5 = 153,5 \text{ kN.m}$ $M_u = 155 \text{ kNm}$

B.9.2 MOMENTO DE FISSURAÇÃO

Sem capa $M_r = 92,55 \text{ kN.m}$

Com capa $M_r = 105,0 \text{ kN.m}$

Para ensaios com peça de 4 m

Sem capa $M_r = 92,5 - 3,0 = 89,5 \text{ kN.m}$ $M_{\text{ensaio}} = 98 \text{ kN.m}$

Com capa $M_r = 105 - 3,83 = 101,2 \text{ kN.m}$ $M_{\text{ensaio}} = 119 \text{ kN.m}$

Para ensaios com peça de 6m

Sem capa $M_r = 92,5 - 15,5 = 77 \text{ kN.m}$ $M_{\text{ensaio}} = 78 \text{ kN.m}$

Com capa $M_r = 105 - 22,5 = 82,5 \text{ kN.m}$ $M_{\text{ensaio}} = 86 \text{ kN.m}$

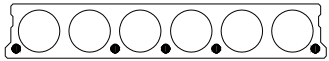
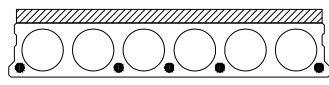
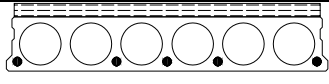
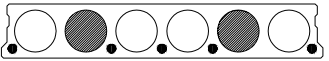
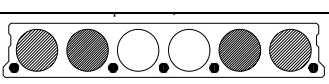
ANEXO C

Aqui são apresentados os valores e as características das peças ensaiadas tanto ao cisalhamento quanto à flexão, tais como: dados geométricos, propriedades de materiais, força de protensão aplicada, etc.

C.1 Valores para o Lote A

As tipologias das lajes referentes ao Lote A podem ser observadas na Tabela C.1. Todas as lajes ensaiadas deste lote possuíam a mesma geometria, variando apenas no uso de capa estrutural ou o preenchimento de alvéolos. Para garantir aderência entre a capa e a laje, a superfície da laje foi escarificada e limpas com aspersão de água.

Tabela C.1: Descrição das tipologias: Lajes utilizadas no ensaio

Altura da Laje (cm)	Tipologia	Descrição da laje	Armadura ativa
20		Laje sem capa estrutural	5 ϕ 12,5mm
20+5		Laje com capa estrutural, com altura de 5 cm e tela soldada	5 ϕ 12,5mm
20+5		Laje com capa estrutural, com altura de 5 cm e fibra metálica	5 ϕ 12,5mm
20		Laje sem capa e com dois alvéolos preenchidos	5 ϕ 12,5mm
20		Laje sem capa e com quatro alvéolos preenchidos	5 ϕ 12,5mm

As características geométricas das lajes do Lote A podem ser observadas na Tabela C.2.

Tabela C.2: Características geométricas referentes ao lote A

Laje	H _{LA} (cm)	H _{TOT} (cm)	L (cm)	b (cm)	φ _{alv} (cm)	A _{TOT} (cm ²)	I _{TOT} (cm ⁴)	Σb _w (mm)	d' (cm)	d (cm)
L01-SC-5_A a L10-SC-5_A	20	20	3,10	125	15,5	1377,95	6,6712.10 ⁴	320	3,50	16,5
L11-SC-5_A	20	20	6,10	125	15,5	1377,95	6,6712.10 ⁴	320	3,50	16,5
L12-CC-5_A a L21-CC-5_A	20	25	3,10	125	15,5	2002,95	12,6822.10 ⁴	320	3,50	21,5
L22-CC-5_A	20	25	6,10	125	15,5	2002,95	12,6822.10 ⁴	320	3,50	21,5
L23-CCF-5_A a L32-CCF-5_A	20	25	3,10	125	15,5	2002,95	12,6822.10 ⁴	320	3,50	21,5
L33-SC-2AP-5_A a L41-SC-2AP-5_A	20	20	3,10	125	15,5	1755,33	7,27867. 10 ⁴	320	3,5	16,5
L42-SC-4AP-5_A a L50-SC-4AP-5_A	20	20	3,10	125	15,5	2132,72	7,84533.10 ⁴	320	3,5	16,5

Onde:

H_{LA}: altura da laje;

H_{TOT}: altura total considerando laje e capa, quando houver;

L: comprimento da laje;

b: largura da laje;

φ_{alv}: diâmetro dos alvéolos;

A_{TOT}: área total da laje considerando capa e alvéolos preenchidos, quando houver;

I_{TOT}: momento de inércia total, considerando capa e alvéolos preenchidos, quando houver;

Σb_w: soma das larguras das nervuras da laje;

d: altura efetiva da seção transversal da laje;

d': distância entre o centro das cordoalhas e a face inferior da laje.

As características do concreto das lajes referentes ao lote A podem ser observadas na Tabela C.3.

Tabela C.3: Características do concreto das lajes referentes ao lote A

Laje	f_{ck} laje (28 dias) (MPa)	f_{cj} laje (liberação protensão) (MPa)	f_{cj} laje (ensaio) (MPa)	f_{cj} capa (MPa)	E_c (10 dias) (GPa)	E_c (28 dias) (GPa)	f_{tk} (28 dias) (MPa)	f_{tj} (MPa)
L01-SC-5_ A a L10-SC-5_ A	50,4	30	40	-----	28,5	29,2	5,6	4,09
L11-SC-5_ A	50,4	30	40	-----	28,5	29,2	5,6	4,09
L12-CC-5_ A a L21-CC-5_ A	50,4	30	40	33	28,5	29,2	5,6	4,09
L22-CC-5_ A	50,4	30	40	33	28,5	29,2	5,6	4,09
L23-CCF-5_ A a L32-CCF-5_ A	50,4	30	40	33	28,5	29,2	5,6	4,09
L33-SC-2AP-5_ A a L41-SC-2AP-5_ A	50,4	30	40	-----	28,5	29,2	5,6	4,09
L42-SC-4AP-5_ A a L50-SC-4AP-5_ A	50,4	30	40	-----	28,5	29,2	5,6	4,09

As características das armaduras de protensão do Lote A estão na Tabela C.4.


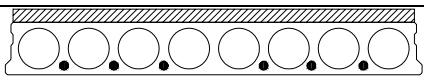
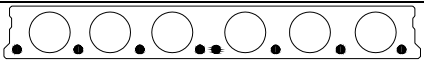
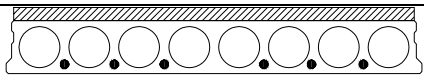
Tabela C.4: Características das armaduras utilizadas nas peças do Lote A

Laje	Nº de cordoalhas	ϕ cordoalhas (mm)	F_p por cabo (kN)	F_p total (kN)	A_p (mm ²)	σ_p (MPa)
L01-SC-5_ A a L10-SC-5_ A	5	12,5	114	570	500	1140
L11-SC-5_ A	5	12,5	114	570	500	1140
L12-CC-5_ A a L21-CC-5_ A	5	12,5	114	570	500	1140
L22-CC-5_ A	5	12,5	114	570	500	1140
L23-CCF-5_ A a L32-CCF-5_ A	5	12,5	114	570	500	1140
L33-SC-2AP-5_ A a L41-SC-2AP-5_ A	5	12,5	114	570	500	1140
L42-SC-4AP-5_ A a L50-SC-4AP-5_ A	5	12,5	114	570	500	1140

C.2.Valores para o Lote B

As tipologias das lajes referentes ao Lote B podem ser observadas na Tabela C.5. As lajes ensaiadas possuíam duas tipologias, com alturas de 15 cm e de 20 cm, e uso ou não de capa estrutural. Para a realização da capa, as superfícies da laje permaneceram lisas e não foram lavadas, estando empoeiradas.

Tabela C.5: Descrição das tipologias Lajes utilizadas no ensaio

Altura da Laje (cm)	Tipologia	Descrição da laje	Armadura ativa
15		Laje sem capa estrutural	6 ϕ 12,5mm
15+5		Laje com capa estrutural. com altura de 5 cm e tela soldada	6 ϕ 12,5mm
20		Laje sem capa estrutural	8 ϕ 12,5mm
20+5		Laje com capa estrutural. com altura de 5 cm e tela soldada	8 ϕ 12,5mm

As características geométricas das lajes do Lote B encontram-se na Tabela C.6.

Tabela C.6: Características geométricas das lajes referentes ao Lote B

Laje	h_{LA}	h_{TOT}	L	b	ϕ_{alv}	A_{TOT}	I_{TOT}	Σb_w	d'	d
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm²)	(cm⁴)	(mm)	(cm)	(cm)
L01-15-CC-6_B	15	20	650	120	9,19	1869,16	5,706.10 ⁴	380,9	3,06	16,94
L02-15-CC-6_B	15	20	650	120	9,19	1869,16	5,706.10 ⁴	400,1	3,06	16,94
L03-15-CC-6_B	15	20	650	120	9,19	1869,16	5,706.10 ⁴	424,1	3,38	16,62
L04-15-SC-6_B	15	15	650	120	8,81	1312,360	3,138.10 ⁴	463,5	3,38	11,52
L05-20-SC-8_B	20	20	650	120	12,14	1705,032	7,359.10 ⁴	411,5	3,29	16,71
L06-20-CC-8_B	20	25	650	120	12,04	2317,21	12,333.10 ⁴	453,9	3,29	21,71
L07-15-SC-6_B	15	15	650	120	8,81	1312,360	3,138.10 ⁴	399,2	3,23	11,77
L08-15-CC-6_B	15	20	650	120	9,19	1587,61	5,706.10 ⁴	400,1	3,06	16,94
L09-15-CC-6_B	15	20	650	120	9,19	1587,61	5,706.10 ⁴	424,1	3,38	16,62
L10-15-SC-6_B	15	15	650	120	8,81	1312,360	3,138.10 ⁴	408,3	3,78	11,22
L11-20-SC-8_B	20	20	650	120	12,14	1705,032	7,359.10 ⁴	411,5	3,29	16,71
L12-20-SC-8_B	20	20	650	120	12,14	1705,032	7,359.10 ⁴	411,5	3,29	16,71
L13-20-CC-8_B	20	25	650	120	12,04	2098,21	12,333.10 ⁴	453,9	3,29	21,71
L14-20-CC-8_B	20	25	650	120	12,04	2098,21	12,333.10 ⁴	453,9	3,29	21,71

As características do concreto das lajes do Lote B podem ser observadas na Tabela C.7.

Tabela C.7: Características do concreto das lajes referentes ao Lote B

Laje	f_{ck} laje (28 dias) (MPa)	f_{ck} capa (28 dias) (MPa)	f_{cj} laje (liberação protensão) (MPa)	f_{cj} laje (ensaio) (MPa)	f_{cj} capa (MPa)
L01-15-CC-6_B	52,63	33,67	31,58	55,87	28,74
L02-15-CC-6_B	52,63	33,67	31,58	55,73	33,05
L03-15-CC-6_B	52,63	33,67	31,58	55,84	33,67
L04-15-SC-6_B	52,63	-----	31,58	55,94	-----
L05-20-SC-8_B	45,65	-----	27,40	48,40	-----
L06-20-CC-8_B	45,65	33,67	27,40	48,36	34,63
L07-15-SC-6_B	52,63	-----	31,58	56,02	-----
L08-15-CC-6_B	52,63	33,67	31,58	55,75	33,16
L09-15-CC-6_B	52,63	33,67	31,58	55,86	33,74
L10-15-SC-6_B	52,63	-----	31,58	55,97	-----
L11-20-SC-8_B	45,65	-----	27,40	48,27	-----
L12-20-SC-8_B	45,65	-----	27,40	48,40	-----
L13-20-CC-8_B	45,65	33,67	27,40	48,39	34,69
L14-20-CC-8_B	45,65	33,67	27,40	48,40	34,72

As características das armaduras de protensão do Lote B estão na Tabela C.8.


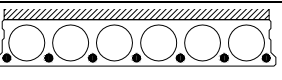

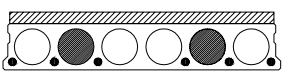

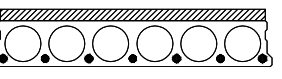
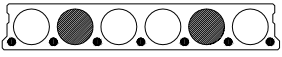
Tabela C.8: Características das armaduras utilizadas nas peças do Lote B

Laje	Nº de cordoalhas	ϕ cordoalhas (mm)	F _p por cabo (kN)	F _p total (kN)	A _p (mm ²)	σ_p (MPa)
L01-15-CC-6_B	6	9,5	79	474	333	1423,42
L02-15-CC-6_B	6	9,5	79	474	333	1423,42
L03-15-CC-6_B	6	9,5	79	474	333	1423,42
L04-15-SC-6_B	6	9,5	79	474	333	1423,42
L05-20-SC-8_B	8	12,5	144,5	1156	811,2	1425,05
L06-20-CC-8_B	8	12,5	144,5	1156	811,2	1425,05
L07-15-SC-6_B	6	9,5	79	474	333	1423,42
L08-15-CC-6_B	6	9,5	79	474	333	1423,42
L09-15-CC-6_B	6	9,5	79	474	333	1423,42
L10-15-SC-6_B	6	9,5	79	474	333	1423,42
L11-20-SC-8_B	8	12,5	144,5	1156	811,2	1425,05
L12-20-SC-8_B	8	12,5	144,5	1156	811,2	1425,05
L13-20-CC-8_B	8	12,5	144,5	1156	811,2	1425,05
L14-20-CC-8_B	8	12,5	144,5	1156	811,2	1425,05

C.3 Valores para a Empresa C

As tipologias das lajes referentes ao Lote C podem ser observadas na Tabela C.9. As lajes ensaiadas possuíam apenas uma tipologia, com altura de 20 cm, e variando no uso ou não de capa estrutural e na quantidade de cordoalhas. Para a realização da capa, as superfícies da laje permaneceram lisas e não foram lavadas, estando empoeiradas.

Tabela C.9 Descrição das tipologias das lajes utilizadas no ensaio

Altura da Laje (cm)	Tipologia	Descrição da laje	Armadura ativa
20		Laje sem capa estrutural	6 ϕ 12,5mm
20+5		Laje com capa estrutural com altura de 5 cm e tela soldada	6 ϕ 12,5mm
20		Laje sem capa estrutural e dois alvéolos preenchidos	6 ϕ 12,5mm
20		Laje com capa estrutural com altura de 5 cm e tela soldada e dois alvéolos preenchidos	6 ϕ 12,5mm
20		Laje sem capa estrutural	7 ϕ 9,5mm
20+5		Laje com capa estrutural com altura de 5 cm e tela soldada	7 ϕ 9,5mm
20		Laje sem capa e com dois alvéolos preenchidos	7 ϕ 9,5mm

As características geométricas das lajes referentes ao Lote C podem ser observadas na Tabela C.10.

Tabela C.10: Características geométricas referentes ao Lote C.

Laje	H_{LA} (cm)	H_{TOT} (cm)	L (cm)	b (cm)	φ_{alv} (cm)	A_{TOT} (cm²)	I_{TOT} (cm⁴)	Σb_w (mm)	d' (cm)	d (cm)
L01-SC-AP-6_C	20,06	20,06	415	115	14,42	1653,57	6,8889.10 ⁴	261,25	3,41	16,65
L02-SC-6_C	20,30	20,30	400	116	14,49	1356,85	6,7584.10 ⁴	250,15	3,35	16,95
L03-SC-6_C	19,99	19,99	400	115	14,43	1324,00	6,3977.10 ⁴	269,3	2,51	17,48
L04-SC-6_C	19,80	19,80	401	116	14,28	1326,10	6,2456.10 ⁴	268,95	2,96	16,84
L05-SC-AP-6_C	20,02	20,02	415	115	14,34	1331,16	6,4344.10 ⁴	262,25	3,49	16,52
L06-SC-AP-6_C	19,94	19,94	415	115	14,52	1640,31	6,7608.10 ⁴	257,75	3,51	16,44
L07-SC-AP-7_C	19,87	19,87	415	116	14,48	1639,02	6,7003.10 ⁴	252,00	3,21	16,66
L08-SC-AP-7_C	19,91	19,91	415	115	14,47	1637,02	6,7216.10 ⁴	257,75	3,03	16,88
L09-SC-7_C	19,97	19,97	414	115	14,54	1305,53	6,3347.10 ⁴	262,35	3,41	16,56
L10-SC-7_C	20,19	20,19	415	116	14,37	1365,72	6,6903.10 ⁴	268,7	3,72	16,47
L11-SC-7_C	20,24	20,24	415	115	14,52	1340,24	6,6592.10 ⁴	263,85	3,50	16,75
L12-SC-AP-7_C	19,94	19,94	414	115	14,96	1227,82	6,0841.10 ⁴	253,55	3,43	16,50
L13-SC-7_C	20,43	20,43	465	115	14,52	1356,66	6,8676.10 ⁴	267,9	3,52	16,92
L14-SC-7_C	19,75	19,75	465	115	14,52	1279,65	6,0826.10 ⁴	265,95	3,54	16,21
L15-SC-7_C	19,75	19,75	464	115	14,56	1277,61	6,0734.10 ⁴	258,45	3,54	16,20
L16-CC-7_C	19,6	25,37	415	115	14,67	1909,56	10,25166.10 ⁴	254,50	3,53	21,84
L17-CC-7_C	19,78	25,68	415	115	14,61	1944,99	10,72258.10 ⁴	239,00	3,77	21,92
L18-CC-6_C	19,87	25,34	415	115	14,61	1911,64	10,4607.10 ⁴	253,5	3,41	21,93
L19-CC-7_C	19,93	25,35	415	116	14,74	1907,85	10,50126.10 ⁴	243,5	3,67	21,68
L20-CC-AP-6_C	20,05	25,20	415	116	14,65	2242,54	11,13895.10 ⁴	253,5	3,45	21,75
L21-CC-AP-6_C	19,84	25,75	415	116	14,60	2311,17	11,65335.10 ⁴	256,5	3,53	22,22

As características do concreto das lajes referentes ao Lote C estão na Tabela C.11.

Tabela C.11: Características do concreto das lajes referentes ao Lote C

Laje	f_{ck} laje (28 dias) (Mpa)	f_{cj} laje (liberação protensão) (MPa)	f_{cj} laje (ensaio) (MPa)	f_{cj} capa (MPa)	E_c (14 dias) (GPa)	E_c (28 dias) (GPa)	f_{tk} (28 dias) (Mpa)
L01-SC-AP-6_C	50,2	27,80	53,19	-----	32,1	36,6	4,2
L02-SC-6_C	50,2	27,80	53,28	-----	32,1	36,6	4,2
L03-SC-6_C	50,2	27,80	53,45	-----	32,1	36,6	4,2
L04-SC-6_C	50,2	27,80	53,45	-----	32,1	36,6	4,2
L05-SC-AP-6_C	50,2	27,80	53,47	-----	32,1	36,6	4,2
L06-SC-AP-6_C	50,2	27,80	53,54	-----	32,1	36,6	4,2
L07-SC-AP-7_C	50,2	29,87	53,53	-----	32,1	36,6	4,2
L08-SC-AP-7_C	50,2	29,87	53,53	-----	32,1	36,6	4,2
L09-SC-7_C	50,2	29,87	53,53	-----	32,1	36,6	4,2
L10-SC-7_C	50,2	29,87	53,53	-----	32,1	36,6	4,2
L11-SC-7_C	50,2	29,87	53,54	-----	32,1	36,6	4,2
L12-SC-AP-7_C	50,2	29,87	53,52	-----	32,1	36,6	4,2
L13-SC-7_C	50,2	29,87	53,54	-----	32,1	36,6	4,2
L14-SC-7_C	50,2	29,87	53,58	-----	32,1	36,6	4,2
L15-SC-7_C	50,2	29,87	53,59	-----	32,1	36,6	4,2
L16-CC-7_C	50,2	29,87	54,61	27,87	32,1	36,6	4,2
L17-CC-7_C	50,2	29,87	54,61	28,41	32,1	36,6	4,2
L18-CC-6_C	50,2	27,80	54,61	28,41	32,1	36,6	4,2
L19-CC-7_C	50,2	29,87	54,61	28,41	32,1	36,6	4,2
L20-CC-AP-6_C	50,2	27,80	54,62	28,85	32,1	36,6	4,2
L21-CC-AP-6_C	50,2	27,80	54,61	28,85	32,1	36,6	4,2

As características das armaduras de protensão utilizadas nas peças do Lote B podem ser observadas na Tabela C.12.

Tabela C.12: Características das armaduras empregadas nas peças do Lote B

Laje	Nº de cordoalhas	ϕ cordoalhas (mm)	F _p por cabo (kN)	F _p total (kN)	A _p (mm ²)	σ_p (MPa)
L01-SC-AP-6_C	6	12,5	145	870	608,4	1429,98
L02-SC-6_C	6	12,5	145	870	608,4	1429,98
L03-SC-6_C	6	12,5	145	870	608,4	1429,98
L04-SC-6_C	6	12,5	145	870	608,4	1429,98
L05-SC-AP-6_C	6	12,5	145	870	608,4	1429,98
L06-SC-AP-6_C	6	12,5	145	870	608,4	1429,98
L07-SC-AP-7_C	7	9,5	75	525	388,5	1351,35
L08-SC-AP-7_C	7	9,5	75	525	388,5	1351,35
L09-SC-7_C	7	9,5	75	525	388,5	1351,35
L10-SC-7_C	7	9,5	75	525	388,5	1351,35
L11-SC-7_C	7	9,5	75	525	388,5	1351,35
L12-SC-AP-7_C	7	9,5	75	525	388,5	1351,35
L13-SC-7_C	7	9,5	75	525	388,5	1351,35
L14-SC-7_C	7	9,5	75	525	388,5	1351,35
L15-SC-7_C	7	9,5	75	525	388,5	1351,35
L16-CC-7_C	7	9,5	75	525	388,5	1351,35
L17-CC-7_C	7	9,5	75	525	388,5	1351,35
L18-CC-6_C	6	12,5	145	870	608,4	1429,98
L19-CC-7_C	7	9,5	75	525	388,5	1351,35
L20-CC-AP-6_C	6	12,5	145	870	608,4	1429,98
L21-CC-AP-6_C	6	12,5	145	870	608,4	1429,98