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

"Cisalhamento em Lajes Alveolares Pré-Fabricadas em Concreto Protendido: Ensaio Padrão de Apoio para Controle de Qualidade"

NEITON SANTOS FERNANDES

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**.

Área de Concentração:
Sistemas Construtivos de Edificações.

Orientador:
Prof. Dr. Marcelo de Araújo Ferreira

São Carlos
2007

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária da UFSCar

F363cl

Fernandes, Neiton Santos.
Cisalhamento em lajes alveolares pré-fabricadas em concreto protendido: ensaio padrão de apoio para controle de qualidade / Neiton Santos Fernandes. -- São Carlos : UFSCar, 2007.
124 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2007.

1. Engenharia de estruturas. 2. Concreto protendido. 3. Concreto pré-moldado. 4. Controle de qualidade. 5. Lajes alveolares. I. Título.

CDD: 624.1 (20ª)

"...Mille te ne caderanno al lato manco,
E diecimila al destro;
E pur quello non ti aggiungerà
Sol riguarderai con gli occhi,
E vedrai la retribuzione degli empi
Perciocchè, o Signore, tu sei il mio ricetto;
Tu hai costituito l´Altissimo per tuo abitacolo.
Male alcuno non ti avverrà,
E piaga alcuna non si accosterà al tuo tabernacolo.
Perciocchè egli comanderà a´suoi Angeli intorno a te,
Che ti guardino in tutte le tue vie...." (Salmos 91:7-11)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, criador maior, por permitir que todos os envolvidos trabalhassem para o desenvolvimento deste trabalho, gerando o produto que temos em nossas mãos agora.

À minha mãe Vera Lucia dos Santos Fernandes e à meu pai Rodinei Roberto Fernandes, pelo incentivo continuo e apoio nas horas difíceis.

Ao Professor Doutor Marcelo de Araújo Ferreira, pelas incansáveis correções e orientações, pela sua iniciativa em buscar a parceria que viabilizou a pesquisa e pela compreensão e apoio as minhas decisões pessoais.

Ao Professor Doutor Roberto Chust de Carvalho pelos esclarecimentos, discussões e atenção oferecida.

À CASSOL pré-fabricados e toda sua equipe, pelo material e pessoal disponibilizado, em especial a Engª. Iria Doniak e ao Sr. Murilo Cassol pelas sugestões e suporte para realização dos ensaios.

À minha esposa Professora Patrícia Ferrari Lopes Athayde, pela compreensão e ajuda na conclusão do texto e organização dos dados experimentais.

Ao grande amigo que conquistei nesta jornada, fruto não menos importante que o próprio trabalho, cujo sem seu incentivo e ajuda, provavelmente não teria alcançado meu objetivo, ao Arquiteto e Mestre em Construção Civil Altibano Ortenzi Junior.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ..... **vii**
LISTA DE TABELAS ..... **xi**
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIAÇÕES ..... **xii**
RESUMO ..... **xiv**
ABSTRACT ..... **xv**

1 INTRODUÇÃO **1**

1.1 HISTÓRICO DO SETOR DE PRÉ-FABRICADOS **1**
1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO **8**
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO **10**
1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO **11**

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **13**

2.1 INSTITUIÇÕES DE NORMALIZAÇÃO OU RECOMENDAÇÃO **15**
2.2 ELEMENTOS DE LAJE PRÉ-FABRICADOS **16**
2.3 PESQUISAS RECENTES **18**
2.4 LAJES ALVEOLARES – COMPOSIÇÃO POR TIPOLOGIA **23**
2.4.1 Geometrias Em Função Do Equipamento De Produção ***25***
2.5 CONTROLE DE QUALIDADE SEGUNDO A FIB (CEB - FIP) **32**
2.6 MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE ELACPS **38**
2.6.1 Agregados ***42***
2.6.2 Aditivos e Adições ao Concreto ***42***
2.6.3 Importância da Cura do Concreto ***45***
2.6.4 Principais Características dos Aços Utilizados ***49***

3 DESCRIÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO NOS ENSAIOS **54**

3.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS EXPLORATÓRIOS **56**
3.1.1 Primeira Etapa ***57***
3.1.2 Segunda Etapa ***60***

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 61

4.1 DESCRIÇÃO DOS MODELOS ENSAIADOS 61
4.1.1 Amostragem Segundo a FIB e a EN 1168:2005 62
4.3 PROCEDIMENTOS PRELIMINARES 66
4.3.1 Listagem do Material Utilizado 66
4.3.2 Esquema de Apoio e Aplicação de Carga 67
4.3.3 Preparação das Peças Para o Ensaio 68
4.3.4 Posicionamento, Nivelamento e Ajuste dos ELACPs 70
4.3.5 Forma de Documentação dos Ensaios 78
4.4 ENSAIOS DE CISALHAMENTO 79
4.4.1 Modelo Teórico de Cálculo 79
4.4.2 Composição dos Elementos Ensaiados 83

5 RESULTADOS DOS ENSAIOS 85

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS 85
5.2 COMPARAÇÕES 94

6 CONCLUSÕES 97

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 97
6.2 CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS 97
6.3 AVANÇOS EM RELAÇÃO A TRABALHOS ANTERIORES 98
6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 98
6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 100

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Edifício Aspen Park, Maringá-PR. Brasil, concluído em 1995. 4

Fonte: (http://www.comunidadedaconstrucao.com.br/comunidade/, acesso 06/2007) 4

Figura 2 – Uso de ELACPs para fechamento vertical. Fonte: FERREIRA (2007)....5

Figura 3 "a", "b", "c" e "d" - Uso de ELACPs em diversos sistemas construtivos. Fonte: FERREIRA (2007) 6

Figura 4 – Abertura de fissura para ensaio de cisalhamento em ELAPCs....19

Fonte: TKALCIC et al. (2007)....19

Figura 5 – Esquema de ensaio de elemento de laje em 6 pontos.

Fonte: AJDUKIEWICZ et al. (2007)....20

Figura 6 – Gráfico de momento por deflexão máxima para os modelos ensaiados

Fonte: AJDUKIEWICZ et al. (2007)....20

Figura 7 – Efeito de engrenamento dos elementos de laje ao formar pavimentos

Compilado de ELLIOTT (2002)....21

Figura 8 – Esquema de montagem de pavimento de ELACPs para ensaio de avaliação do cisalhamento entre a interface dos elementos. Fonte: FERREIRA (2007) 22

Figura 9 – Esquema de falhas possíveis em ELACPs sob ações e carregamentos

Compilado de ÅKESSON (1993)....23

Figura 10 – Fluxograma do processo de produção de ELAPCs....24

Figura 11 - Etapas do processo produtivo de ELACPs. Fonte: FERREIRA (2007)....25

Figura 12 "a" e "b" – Equipamentos de fabricação das lajes alveolare em pistas de protensão Fontes: (ECHO – Engineering NV, 2006; ELEMATIC Spy, 2006) 26

Figura 13 – Sistema de forma tipo carrossel. Fonte: FERREIRA (2007)....27

Figura 14 - Seções transversais típicas dos elementos de laje alveolar protendida (adaptado de FERREIRA, 2003) 28

Figura 15 "a" e "b" – Tipos usuais de ligações para elementos de lajes alveolares....29

Figura 16 “a” e “b”– Diferença entre os concretos usados em ELACPs.

Fonte: FERREIRA (2007).....*41*

Figura 17 – Seqüência de pistas submetidas à cura com vapor.

Fonte: FERREIRA (2007).....*46*

Figura 18– Ciclo típico de cura a vapor (EL DEBS, 2000).....*49*

Figura 19 – Protensão simultânea do feixe de fios, Inglaterra.

Fonte: FERREIRA (2007).....*50*

Figura 20 – Embalagem de fornecimento dos fios para protensão

Fonte: ARCELOR-MITTAL (2007) *51*

Figura 21 – Cordoalhas de 3 e 7 fios para protensão

Fonte: ARCELOR-MITTAL (2007) *51*

Figura 22 – arranjos de apoios para ensaios de elementos de laje alveolares

Fonte: FIB (CEB-FIP, 1992).....*54*

Figura 23 – Dimensão da amostra para extração dos corpos de prova e

localização dos pontos de extração. Fonte: FIB (CEB-FIP, 1992).....*54*

Figura 24 - Ruptura indesejada devido a desnível transversal na rótula.

Fonte: FERNANDES e MONTEDOR (2006) *59*

Figura 25 – Características geométricas principais dos

ELACPs ensaiados - seções típicas *65*

Figura 26 - Esquema de carregamento para o ensaio padrão de apoio.....*67*

Figura 27 - Faixas de argamassa de regularização em

ELACPs, helacp = 25 cm, sem capa.....*69*

Figura 28 – Medidas para efetuar as marcações nas peças de ensaio.....*69*

Figura 29 “a” e “b” – Medição e marcação com esquadro nas 2 faces

da peça a ser ensaiada *70*

Figura 30 - Posicionamento do apoio de reação *70*

Figura 31 – Verificação de nível transversal do apoio.....*71*

Figura 32 “a” e “b” – Medida da distância entre apoios pelo lado esquerdo e direito.....71

Figura 33 – Verificação do nivelamento longitudinal com nível de mangueira.....72

Figura 34 “a” e “b” – Verificação das diagonais nas duas direções.....72

Figura 35 “a” e “b” - Posicionamento da barra de centralização da peça 73

Figura 36 “a”, “b” e “c”– Configuração final do elemento sobre o sistema de reação.....73

Figura 37 – Colocação e alinhamento da viga de distribuição transversal do carregamento.....74

Figura 38 “a” e “b” - Posicionamento do pórtico em relação a viga de transferência.....74

Figura 39 “a” e “b” - Posicionamento dos transdutores.....75

Figura 40 – Sistema de aquisição de dados 75

Figura 41 “a” e “b” – Posicionamento da base niveladora e da viga de distribuição 77

transversal do carregamento sobre o elemento de laje.....77

Figura 42 “a”, “b”, “c” e “d” – Seqüência de posicionamento da célula de carga, do atuador, do transdutor e visão geral do conjunto pronto.....78

Figura 43 - Gráfico dos resultados dos ensaios para lajes sem capa,.....86

dado pela reação no apoio versus o deslocamento médio. 86

Figura 44 “a” e “b” – Exemplo da trajetória da fissura em ELACP sem capa.....86

Figura 45 - Gráfico dos resultados dos ensaios para lajes com capa,.....87

dado pela reação no apoio versus o deslocamento médio. 87

Figura 46 “a” e “b” - Exemplo de fissura ocorrida em ensaio de cisalhamento de ELACPs 87

Figura 47 - Gráfico dos resultados dos ensaios para lajes com capa e fibras, dado pela reação no apoio versus o deslocamento médio. 88

Figura 48 “a” e “b” – exemplo de ruptura por cisalhamento em ELACPS com capeamento de concreto reforçado com fibra 88

Figura 49 – resultados dos ensaios de cisalhamento em lajes com preenchimento de 2 alvéolos 89

Figura 50 “a”, “b”, “c” e “d” – Modelo de ruptura para um dos ELACPs preenchidos com 2 alvéolos *89*

Figura 51 – resultados dos ensaios de cisalhamento em lajes preenchidas com 4 alvéolos *90*

Figura 52 “a”, “b”, “c” e “d” – Emsaios em ELACPs com 4 alvéolos preenchidos *91*

Figura 53 – Fissuras na parte inferior de um dos 6 ELACPs preenchidos com 4 alvéolos *91*

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos principais elementos de laje (adaptado de FERREIRA, 2003) *18*

Tabela 2 – Aspectos a serem considerados no controle de qualidade. *33*

Fonte: FIB (CEB-FIP, 1992) *33*

Tabela 3 – Requisitos de projeto para fabricação de ELAPCs *36*

(Compilado de FIB, 1992). *36*

Tabela 4 – Aditivos para concretos e suas funções *44*

Tabela 5 – Fios para protensão produzidos no Brasil Fonte: ARCELOR-MITTAL (2007) ... *52*

Tabela 6 – Cordoalhas de 3 e 7 fios para protensão. Fonte: ARCELOR-MITTAL (2007) *52*

Tabela 7 - Características geométricas dos elementos de laje alveolares *65*

Tabela 8 - Características comparadas dos elementos de laje alveolar *81*

Tabela 9 – Propriedades características dos elementos de laje alveolar *82*

com preenchimento de 2 e 4 alvéolos *82*

Tabela 10 -Resistência do concreto e protensão do aço nas peças ensaiadas *84*

Tabela 11 – Média das resistências ao cisalhamento dos elementos de lajes ensaiados *85*

Tabela 12 - Comparativo entre valores teóricos de projeto e obtidos nos ensaios (fctm = 3,5 MPa) *92*

Tabela 13 - Comparativo entre valores teóricos experimentais e de ensaios (fctm, exp = 4,0 MPa) *93*

Tabela 14 – Comparativo de ganho percentual entre 3 tipologias de ELACPs, relativo à resistência e construtibilidade *95*

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIAÇÕES

f_{cj} = tensão de compressão resistente do concreto a "j" dias, em MPa

f_{ctm} = tensão de tração resistente média do concreto, em MPa

$\tau_{Rd} = 0{,}25\, f_{ctd}$ = tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento, em MPa

$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c$ = resistência à tração de cálculo do concreto, aqui considerada sem coeficientes de segurança (com γ_c=1,0)

$\rho = A_{s1} / bw * d$ = taxa de armadura longitudinal,

$\sigma_{cp} = N_{sd}/A_{c,\,calc}$ = tensão devida à protensão no concreto

k = coeficiente com os seguintes valores:

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

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

A_{s1} =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_{lacp} – número de alvéolos x diâmetro dos alvéolos).

d = altura útil ($h_{lacp} - d'$).

N_{sd} = Força longitudinal na seção devida a protensão.

γ_c = Fator de majoração das ações, não considerado no cálculo, nesse caso.

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

$V_{rup,méd}$ = Carga de ruptura obtida experimentalmente, pela média interna, em kN;

V_{max} = carga máxima admitida na aprovação de controle de qualidade, em kN;

V_{Ru} = resistência última, calculada sem considerar coeficientes de majoração, em kN.

V_{Rd} = resistência de cálculo, com coeficiente de segurança devidamente aplicados na equação (1), em kN.

I = Momento de Inércia principal da laje, relativo ao eixo de menor inércia;

$Y_{cg,\,p}$ = distância do CG da laje até sua face inferior, em milímetros;

$Y_{cg,\,c}$ = distância do CG da armadura até sua face inferior, em milímetros;

F_p = força aplicada no cabo de protensão, em kN.

L = deslocamento vertical

f_{ctm} = tensão de tração resistente média do concreto, teórico de cálculo, em MPa

$f_{ctm,exp}$ = tensão de tração resistente experimental do concreto, valor médio dos CPs nos ensaios a tração por compressão diametral do concreto nas datas de ensaio, em MPa.

h_{elacp} = espessura do elemento de laje alveolar de concreto protendido.

RESUMO

FERNANDES, N. S. (2007). Cisalhamento em Lajes Alveolares Pré-Fabricadas de Concreto Protendido: Ensaio de Apoio Padrão para Controle de Qualidade. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2007

O presente trabalho descreve os procedimentos para o ensaio padrão de apoio para avaliar a resistência ao cisalhamento de elementos de laje alveolar pré-fabricados em concreto protendido, seguindo as recomendações da '*Fedération Internationale du Béton*' - FIB. Neste texto, apresenta-se uma discussão de como estes ensaios podem ser empregados no ambiente fabril em uma empresa de pré-fabricados, a fim de garantir a qualidade do produto. A partir desta analise, são feitas sugestões para a padronização destes ensaios no Brasil. Através de um estudo de caso das aplicações deste método em uma empresa nacional, foram realizados ensaios de cisalhamento com quatro tipologias de painéis de lajes alveolares, dos quais foram ensaiados 5 painéis por grupo. Em seguida os resultados foram analisados e comparados com os modelos de cálculo teóricos. Os resultados obtidos foram comparados com os equacionamentos contidos na NBR 6118:2004, e EN 1168:2005, para o Estado Limite Último e Estado Limite de Serviço. Finalmente, foram discutidos os valores e fornecidas conclusões e recomendações para ensaios futuros.

Palavras-Chave: Laje alveolar, pré-fabricados, concreto protendido, métodos de ensaio.

ABSTRACT

FERNANDES, N. S. (2007). Cisalhamento em Lajes Alveolares Pré-Fabricadas de Concreto Protendido: Ensaio de Apoio Padrão para Controle de Qualidade. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2007.

This work describes the flexural shear capacity testing procedures of the hollow core slabs of prestressed concrete mainly used as floor members following the recommendations of the FIB (CEB-FIP, 1992). In this text were tested precast prestressed hollow core slabs and done recommendations for standardization of these tests in Brazil. Also were indicated minimum criteria of acceptability in relation to the quality of these structural elements. The gotten results are compared with the rules contained in NBR 6118:2004 and EN 1169:2005, for Ultimate Tension Strength and Serviceability Limit Strength. The flexural shear tests were divided in four groups of hollow core slabs and had been carried through. Five panels for each of the four groups had been tested. After that the results were analyzed and compared with the theoretical models of normalization. Finally the values and the conclusions were presented and the recommendation for future tests had been provided.

Keywords: Hollow Core Slab; Precast; Prestressed Concret

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o método de construção com elementos de concreto pré-fabricados tem sido cada vez mais aplicado. As vantagens oferecidas pelo emprego de elementos fabricados fora do canteiro de obra fazem com que esse modo de edificar ganhe cada vez mais espaço dentro do setor da construção civil. Dentre as inúmeras vantagens se destacam a redução do tempo de execução “in loco” da obra, a possibilidade do emprego de equipamentos mais sofisticados para fabricação das peças e principalmente um maior controle de qualidade durante a execução de determinado projeto.

O uso de concreto pré-moldado em edificações está amplamente relacionado à uma forma de construir econômica, durável, estruturalmente segura e com versatilidade arquitetônica. A indústria de pré-fabricados está continuamente fazendo esforços para atender as demandas da sociedade, buscando oferecer através de seus produtos: economia, eficiência, desempenho técnico, segurança e condições favoráveis de trabalho aos operários envolvidos.

O campo de aplicação de pré-fabricados é bastante amplo, sendo empregados nos mais variados setores da construção civil, como: edificações industriais e comerciais, edificações residenciais, construção pesada, infra-estrutura urbana, estradas, etc.

Em geral os elementos pré-fabricados em concreto são encaixados ou apoiados uns nos outros, ocorrendo um encaixe mecânico entre os segmentos com atuação de esforços de cisalhamento entre eles. Sendo assim, é necessário que se garanta a eficiência desses elementos com relação a sua resistência a esforços de cisalhamento.

1.1 HISTÓRICO DO SETOR DE PRÉ-FABRICADOS

Em 1945, a partir da Segunda Guerra Mundial, a utilização de elementos pré-fabricados nas construções começou a ter importância efetiva, tanto econômica quanto tecnológica. Presente há aproximadamente sessenta anos no mercado da construção civil

nacional e internacional, ainda não foi totalmente consolidada em alguns países como o Brasil; sendo aplicada basicamente em edificações de uso industrial e comercial, com deficiências de normas e procedimentos nacionais.

Segundo ORDONÉZ (1974), foi no período pós 2º Guerra Mundial, principalmente na Europa, que começou a história da pré-fabricação como "manifestação mais significativa da industrialização na construção". Como conseqüência, a utilização intensiva do pré-fabricado em concreto surgiu em função da necessidade de se construir em grande escala.

Desta forma, é importante compreender a evolução histórica da pré-fabricação, a fim de contextualizar o presente trabalho e contribuir para a evolução da construção pré-fabricada no país.

Pode-se dizer que as primeiras construções que utilizaram grandes elementos pré-fabricados de concreto armado surgiram na Europa e que tanto os EUA quanto o Canadá e o Brasil foram influenciados pela cultura da pré-fabricação européia.

Segundo SALAS (1988), pode-se dividir o emprego da pré-fabricação na Europa em três etapas:

- Décadas de 1950 e 1960: etapa em que houve a necessidade de se construir muitos edifícios, tanto habitacionais quanto escolas, hospitais e indústrias, devido à destruição das edificações ocasionada pela guerra. Os edifícios construídos nessa época eram compostos de elementos pré-fabricados de alta modulação procedentes do mesmo fornecedor, caracterizando um ciclo fechado de produção[1].
- Década de 1970: Alguns acidentes ocorridos na Europa, em edifícios construídos pelo sistema pré-fabricado provocaram rejeição social a esse tipo de sistema construtivo. Com isso, houve uma revisão do conceito dos processos construtivos com grandes elementos pré-fabricados. Assim teve início o declínio dos sistemas pré-fabricado de

[1] Ciclo fechado de produção ocorre quando um determinado sistema construtivo não permite a intercambialidade de elementos, não sendo possível utilizar outros elementos além daqueles do sistema construtivo (EL DEBS, 2000).

ciclo fechado;

- Década de 1980: Esta fase caracterizou-se,pelo início e consolidação da pré-fabricação de ciclo aberto[2], à base de componentes compatíveis produzidos por diferentes empresas. Nesta segunda geração tecnológica houve a necessidade de desenvolver um sistema de coordenação modular que possibilitasse que as peças, mesmo de diferentes produtores, apresentassem dimensões padronizadas, a fim de atenderem a vários projetos e, ainda, de um sistema de normas técnicas que garantissem a qualidade das edificações destinadas a qualquer uso.

Atualmente, na Europa, a construção de edifícios à base de lajes pré-fabricadas de concreto tem como principais referências, normas descritas pelo '*British Standards Institution*' (BSI) – e pela '*Fédération Internationale du Béton*' (FIB).

Já o desenvolvimento tecnológico da construção pré-fabricada nos Estados Unidos aconteceu a partir do '*benchmarking*'[3] europeu. Na década de 60, foi fundado Precast/Prestressed Concrete Institute - PCI, nos Estados Unidos, o qual atua até hoje e tem como objetivo pesquisar e balizar o mercado com informações técnicas referentes à construção pré-fabricada. Paralelamente, na Austrália, foi criada a National Precast Concrete Association – NPCAA, com os mesmos objetivos.

No Brasil a preocupação com a racionalização e a industrialização de processos construtivos apareceu no final da década de 50, sendo que as principais referenciais normativas e informativas vêm da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – e da Associação Brasileira de Construção Industrializada em Concreto – ABCIC (2002).

Segundo a Associação Brasileira de Construção Industrializada de Concreto – ABCIC

---

[2] Ciclo aberto de produção ocorre quando produção se realiza com base em elementos disponíveis no mercado, contando com a composição de sistemas com componentes de diferentes fabricantes (EL DEBS, 2000).

[3] *Benchmarking:* consiste em identificar, em outras "empresas", referências quanto à melhor forma possível para operar um processo ou solucionar um problema, buscando igualar ou superar o melhor desempenho conhecido (http://www.cpgec.ufrgs.br/Norie/)

(1980), não existiu no Brasil uma política de desenvolvimento tecnológico para o setor da construção industrializada. Assim, o que restou, até o início da década de noventa, se deve ao arrojo dos empresários interessados no avanço da industrialização, que buscavam redução de custos e maior agilidade no processo de execução. Por isso, até hoje, a utilização de processos construtivos pré-fabricados é mais expressivo nas construções industriais, comerciais e em empreendimentos hoteleiros, cujos investimentos são elevados e a expectativa de tempo de retorno do capital rápida.

O crescimento no setor de serviços ocorridos a partir da década de 90 no Brasil tem feito aumentar a demanda por hotéis, flats e '*shopping centers*'. O que, conseqüentemente, ocasiona o crescimento de novos investidores interessados em obras com grande velocidade de execução que viabilizem seus empreendimentos.

Como exemplo, temos o edifício "Aspen Park", visto na Figura 1 "a" e "b", em Maringá-PR, que é o mais alto em pré-fabricados de concreto construído no país atualmente. O edifício é de uso comercial, contendo um "*shopping center*" nos pisos inferiores e salas de escritório nos andares superiores. Sua altura é de 87 m, com área construída de 40.300 m^2 e estrutura executada em 9 meses de obra.

a – em construção b- concluído

Figura 1- Edifício Aspen Park, Maringá-PR. Brasil, concluído em 1995.
Fonte: (http://www.comunidadedaconstrucao.com.br/comunidade/, acesso 06/2007)

A produção flexibilizada, que combina a aplicação de peças padronizadas e de peças fabricadas de acordo com o projeto, algumas vezes com alto valor agregado, é cada vez mais freqüente, especialmente no exterior.

Pilares com consolos definidos de acordo com as exigências arquitetônicas do edifício também são comuns atualmente.

Peças com alto grau de industrialização, como o caso dos elementos de lajes alveolares em concreto protendio (ELACPs), são os elementos mais empregados atualmente e as formas de vigas e pilares são apenas adaptadas respeitando alguns parâmetros construtivos e produtivos. Porém a satisfação do cliente se torna cada vez mais determinante nas características dos produtos industrializados. As exigências não se restringem, apenas, às questões estéticas ou financeiras do projeto, estendendo-se inclusive para o atendimento das normas legais referentes aos direitos do consumidor, exigindo das indústrias, maior controle dos processos produtivos e certificação da qualidade de seus produtos perante seus clientes.

O uso de lajes alveolares acompanha o crescimento do mercado de pré-fabricados. Além disso, a aplicação dos ELACPs como elementos de vedação vertical, Figura 2 “a” e “b”, e a possibilidade da aplicação em outros sistemas construtivos, conforme se verifica pela Figura 3 “a”, “b”, “c” e “d”, reflete o potencial de aumento de consumo destes elementos no Brasil, pela versatilidade de utilização dos mesmos dentro da pré-fabricação.

a – aplicação horizontal (Inglaterra, 2003) b – aplicados na vertical (Inglaterra, 2003)

Figura 2 – Uso de ELACPs para fechamento vertical. Fonte: FERREIRA (2007)

a – ELACP sobre estrutura metálica (UK)

b – ELACP sobre concreto moldado in loco (África do Sul, 2001)

c – ELACP sobre alvenaria estrutural (África do Sul, 2001)

d – ELACP sobre estrutura de madeira (Finlândia, 2005)

Figura 3 “a”, “b”, “c” e “d” - Uso de ELACPs em diversos sistemas construtivos. Fonte: FERREIRA (2007)

Segundo dados da ABCIC, a indústria de pré-fabricados consumiu, em 2003, entre 4,0% e 4,5%, do total produzido pela indústria nacional de cimento e faturou R$ 4 bilhões (ABCIC, 2007).

Em 2002, a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas publicou a NBR 14861 que fixa os procedimentos para o recebimento e utilização de lajes alveolares de concreto protendido - LACP. Porém não são encontrados documentos nacionais que regulamentem a produção e controle de qualidade desses elementos.

Os ELACPs são empregados como componentes de lajes que devida sua flexibilidade podem exercer função de piso, unidade de telhado ou elementos de vedação vertical. Serão discutidos neste trabalho os elementos quando aplicados às lajes.

As lajes alveolares de concreto protendido são um dos mais avançados tipos de

elementos pré-moldados. Milhões de metros quadrados de lajes são fabricados todo ano no mundo e estas são aplicadas nos mais diversos tipos de edificações.

As lajes alveolares protendidas são geralmente usadas para vãos que variam entre 4 m e 20 m, a altura do elemento varia normalmente de 100 mm a 400 mm (pelos padrões das normas, porém na Itália se fabricam lajes com 500 mm de altura). Sua largura nominal é 1250 mm (EUA) e 1200 mm (Europa), mas tanto larguras maiores como menores também são empregadas. As lajes podem suportar uma carga de utilização superior a 30 kN/m^2. São comercializados em forma de painéis que apresentam comprimento variado, limitado pelo veiculo de transporte (normalmente máximo de 12,5 m e capacidade de carga dos equipamentos de içamento, 200 kN).

A indústria da construção civil não avança com a mesma velocidade que outros setores produtivos, contudo, nas indústrias de pré-fabricados internacionais, é possível notar grande evolução dos processos e técnicas de produção.

No Brasil, a indústria ainda apresenta, de maneira geral, baixa produtividade, grande desperdício de materiais, baixo controle de qualidade e más condições de trabalho para seus operários. Isso se deve, em parte, ao baixo valor da mão-de-obra do setor, a qual é pouco especializada e preparada. Outro fator é a baixa mobilidade do setor em se adaptar à economia de livre mercado, sem o protecionismo do Estado, ocorrida no início da década de 1990.

No caso específico da indústria de pré-fabricados, em razão das características produtivas e da concorrência, vem ocorrendo uma mudança de filosofia de trabalho, ao contrário do que ocorre com as construtoras convencionais em concreto armado. Vêm sendo aplicados maiores investimentos em recursos humanos e em tecnologia, melhorando os processos e a qualidade de seus produtos e continuamente aprimorando suas atividades para atender as demandas da sociedade.

De forma geral, esse segmento industrial está procurando atender, através de seus

produtos: economia, eficiência, desempenho técnico, segurança e condições favoráveis de trabalho.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Dentro do sistema pré-fabricado de concreto um importante componente do sistema são as lajes. Por exigir um complexo sistema de formas e escoramentos no sistema tradicional, os sistemas pré-moldados são cada vez mais empregados, pois significam, sobretudo, economia de tempo e espaço no canteiro de obras. Outro aspecto que justifica o trabalho são as recentes pesquisas realizadas pelos organismos internacionais, que visam, sobretudo, garantir a qualidade e segurança no emprego de ELACPs na construção civil.

Na Europa a FIB mantém diversos comitês especialmente designados para atuarem no desenvolvimento de processos, produtos e tecnologias voltadas para o concreto. No caso da pré-fabricação o comitê 6 é o responsável e o subcomitê HCS 6.2 – "Hollow Core Slabs", o grupo de estudos específicos para as lajes alveolares.

A FIB trabalha atualmente na definição de novos métodos de ensaios que melhor caracterizem o comportamento desses elementos. No Brasil ainda não existem normas para ensaios de elementos de lajes alveolares de concreto protendido, seja isoladamente, seja em conjunto para formar um pavimento. Em contrapartida, o uso desses elementos estruturais já está difundido em todo território nacional, com milhares de metros quadrados produzidos anualmente.

Há disponível, no mercado nacional, diversos sistemas de lajes que empregam elementos pré-moldados em sua concepção, os quais, em sua maioria, não possuem padronização ou controle nos processos de fabricação. Cita-se entre eles:

- Lajes pré-fabricadas tipo trilho: composta de vigas ou vigotas pré-fabricadas de concreto armado, intercaladas com blocos de concreto ou de cerâmica. As vigotas

possuem formato de um "T" invertido. Depois da montagem, é lançada uma camada de concreto, a capa de solidarização, que faz com que a laje transforme-se num conjunto único;

- Lajes pré-fabricadas tipo trilho protendidas: as lajes nervuradas podem ser executadas com vigas ou vigotas protendidas de fábrica, quando é necessário resistir a vãos maiores ou diminuir o número de pontos de escoramento;
- Lajes pré-fabricadas treliçadas: composta por peças pré-moldadas têm como vantagem a redução da quantidade de formas. Hoje, utiliza-se o sistema treliçado com nervuras pré-moldadas, executadas com armaduras treliçadas. O sistema pode ser composto com elementos cerâmicos ou formado apenas por treliças duplas chamadas de “pré-lajes”.
- Lajes maciças pré-moldadas em série: composta por uma placa de dimensões e geometrias idênticas ao cômodo da edificação, moldada no local, no chão, umas sobre as outras, e içadas posteriormente para o local definitivo. O sistema é atualmente utilizado em conjuntos habitacionais;
- Lajes compostas por elementos de laje “pi” ou “U”: Os elementos de laje tipo “pi” podem ser empregados com ou sem capa de concreto moldada no local. Esse tipo de elemento é também empregado como vedação vertical. Sua principal característica é vencer vãos que podem chegar até 40m (EL DEBS, 2000) e dispensar escoramento. A largura das lajes, normalmente, é de 1,0 m e 1,20m, mas podem chegar até 2,50 m. A altura varia de 150 mm a 300 mm, embora possam atingir 500 mm;
- Lajes compostas por elementos de laje alveolares de concreto: trata-se de um sistema composto por lajes que possuem normalmente largura de 1 250 mm, com comprimentos de até 20 m. São pré-fabricados e normalmente são protendidos. Podem contar com capa moldada no local ou não. No Brasil a opção com capa é a mais

utilizada.

A descrição utilizada aqui segue a classificação feita pela NBR 9062/2006, que define:

> *2. Pré-fabricados: elemento que é executado fora do local de utilização definitivo da estrutura, produzido em usina ou instalações análogas, que disponham de pessoal e laboratórios e controle de qualidade permanente, que deve abranger pelo menos as seguintes etapas da produção: fôrmas, armadura, mistura e lançamento do concreto, armazenamento, transporte e montagem;*
>
> *3. Pré-moldados: elemento que é executado fora do local de utilização definitiva da estrutura, produzido em condições menos rigorosas de controle de qualidade, sem a necessidade de pessoal, laboratório e instalações congêneres próprias.*

No presente trabalho como forma de consolidar o domínio sobre a utilização de ELACPs. Oferecendo uma síntese sobre as considerações e procedimentos utilizados atualmente pela indústria internacional. Por fim a pesquisa deve apontar os caminhos para pesquisas futuras sobre o tema, abrindo portas para o desenvolvimento de tecnologia nacional no setor.

Finalmente, este trabalho apresenta-se como uma contribuição para consolidação dos conhecimentos nacionais sobre o sistema pré-fabricado em concreto, visando maior desenvolvimento da tecnologia nacional, através do aprofundamento do conhecimento acerca desses elementos construtivos.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Pretende-se definir procedimentos de ensaio para estudo do cisalhamento em elementos de laje alveolar de concreto protendido através do ensaio padrão de apoio conforme

a FIB (CEB-FIP, 1992), procurando apresentar uma análise de como estes procedimentos de ensaios podem ser aplicados no Brasil para garantir a qualidade dos elementos de lajes alveolares.

Apresentar resultados de ensaios experimentais realizados conforme as prescrições contidas nos boletins da FIB (CEB-FIP, 1992) e da EN 1168:2005, para analisar o comportamento de elementos de lajes alveolares pré-fabricados de concreto protendido e comparar esses ensaios com os modelos teóricos de cálculo.

Como objetivo secundário, servir de ponto de partida para que se desenvolva, através de outras pesquisas, a criação de uma metodologia, ou normalização nacional, que permita efetuar o controle de qualidade periódico desses elementos, por parte dos fabricantes.

1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1 consta a introdução, apresentando: o desenvolvimento do sistema construtivo pré-moldado, através da evolução histórica do setor, exemplos da utilização de ELACPs nos diferentes sistemas construtivos no mercado nacional e internacional, são informados os objetivos do trabalho e sua justificativa.

No capítulo 2 encontram-se: a revisão bibliográfica, ensaios para controle de qualidade desses elementos, citação dos principais órgãos de normalização, pesquisas recentes realizadas sobre o tema, os principais modelos de cálculos utilizados para análise do cisalhamento e a descrição das características das matérias-primas empregadas na fabricação do concreto e do aço.

O capítulo 3 apresenta o método de desenvolvimento do trabalho, onde está presente o estudo da padronização de ensaios existentes (FIP, 1992) e EN 1168: 2005 (CEN 2005) até a descrição dos procedimentos e equipamentos empregados na pesquisa.

O capítulo 4 apresenta os resultados do estudo de caso desenvolvido, confrontando-os

com os modelos teóricos de cálculo constantes da normalização internacional.

A análise e discussão dos resultados são apresentadas no capítulo 5, para cada tipologia ensaiada.

Finalmente, o capítulo 6 resume as conclusões do trabalho e apresenta sugestões para pesquisas futuras que promovam o desenvolvimento de tecnologia nacional sobre o tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fim de facilitar futuras pesquisas este capitulo é iniciado com uma breve descrição das principais organizações nacionais e internacionais relacionadas ao estudo e normalização de ELACPs.

A seguir apresentam-se os conceitos básicos de aplicação de ELACPs, os principais métodos produtivos, os modelos de cálculos utilizados para análise do cisalhamento e informações pertinentes ao desenvolvimento e aperfeiçoamento do uso das matérias-primas empregadas na fabricação – o concreto e o aço.

Por fim, são apresentadas as pesquisas recentes desenvolvidas apontando as tendências atuais de estudo sobre ELACPs no cenário internacional.

A pré-fabricação, segundo ORDONÉZ (1974), "é uma fabricação industrial, fora do canteiro, de partes da construção, capazes de serem utilizadas mediante ações posteriores de montagem".

Os elementos de lajes alveolares de concreto protendido são o subsistema mais difundido atualmente no mercado nacional e internacional, principalmente em obras com alto nível de pré-fabricação.

Os ELACPs são um dos tipos mais evoluídos de elementos pré-fabricados, sendo produzidas dezenas de milhões de metros quadrados todo ano no mundo, empregados nas construções das edificações mais modernas (FIB, 1992).

Segundo FOLCH (2004):

> "O sistema de piso em lajes alveolares é o que obteve maior sucesso no mercado da construção civil. De fácil instalação, pode atingir grandes vãos, facilitando o layout e otimizando a estrutura, seja ela moldada in loco, metálica ou de elementos reticulados pré-fabricados."

Dentro do sistema estrutural reticulado convencional, as lajes são responsáveis por

captar todo carregamento vertical dos pavimentos e transmiti-los para vigas e posteriormente para pilares e fundação.

Em edifícios altos assumem o importante papel de distribuição de esforços horizontais entre os pilares da edificação, agindo como um diafragma entre os pavimentos. Portanto, esses elementos estão sujeitos à esforços perpendiculares e paralelos ao plano o que exige que o projetista atente para diversos detalhes de projeto.

Dois significativos benefícios das estruturas pré-fabricadas estão relacionados com a eficiência estrutural que permite elementos mais esbeltos e o uso otimizado de materiais, com baixo índice de desperdício de recursos. Desta forma, sistemas compostos por ELACPs permitem a concepção de edifícios com áreas livres maiores e vãos acima do convencional, fato que pode ser claramente notado na analise dos vãos de lajes e coberturas usuais no sistema.

O uso de peças pré-fabricadas de concreto na construção civil representa um significativo progresso em termos construtivos, permitindo a racionalização e o aperfeiçoamento técnico das obras.

A pré-fabricação, enquanto um sistema construtivo, incorpora os conceitos de linha de montagem da indústria de base e bens de consumo, proporcionando racionalização construtiva e maior controle de qualidade. SABBATINI (1989) define racionalização construtiva como:

> *"... um processo composto pelo conjunto de todas as ações que tenham por objetivo otimizar o uso de recursos materiais, humanos, organizacionais, energéticos, tecnológicos, temporais e financeiro disponíveis na construção em todas as suas fases."*

Há uma tendência de que o uso de pré-fabricados deva aumentar significativamente nos próximos anos, na medida em que o custo com pessoal torne-se maior, as matérias-primas mais escassas e o consumo energético aumente.

O fato de grande parte das construções pré-fabricadas serem recentes no país, menos de 15 anos, não se tem a comprovação prática a respeito da durabilidade e eficiência das técnicas praticadas atualmente, o que reforça a necessidade da realização de pesquisas e desenvolvimento de tecnologia nacional no setor.

A EN 1168:2005, também não considera que haja contribuição por parte do engrenamento mecânico do concreto ou efeito de pino na armadura. No presente trabalho foi analisado somente os ensaios de cisalhamento, como já mencionado.

2.1 INSTITUIÇÕES DE NORMALIZAÇÃO OU RECOMENDAÇÃO

Algumas das principais instituições relacionadas ao pré-fabricado no Brasil e no mundo são relacionadas abaixo. Estas mantêm equipes de especialistas no tema e são responsáveis pela produção de documentos que balizam o uso e produção de elementos pré-moldados em concreto no mundo.

Nacionalmente citam-se duas instituições como as principais responsáveis pela produção de documentação que regulamentam o uso e disponibilizam orientações sobre a aplicação da tecnologia da pré-fabricação no país. Contudo, as principais organizações encontram-se o exterior.

Outras seis instituições internacionais são apresentadas. Uma norte-americana, uma australiana e quatro européias, a seguir:

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT);
- Associação Brasileira de Construção Industrializada em Concreto (ABCIC);
- National Precast Concrete Association of Australia (NPCAA);
- Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI);
- British Standards Institution (BSI);
- Fédération Internationale du Béton (FIB);

- International Prestressed Hollow Core Association (IPHA) ;
- Comité Européen du Normalisation (CEN).

Dentre as instituições européias, o CEN é o principal organismo normalizador da União Européia. Por outro lado, a FIB atua como instituição de pesquisa e recomendação específica para a construção civil, em relação ao concreto.

A FIB atua como organismo de pesquisa e desenvolvimento conjunto entre as empresas e o meio acadêmico, possuindo vários comitês e sub-comitês na área de concreto.

2.2 ELEMENTOS DE LAJE PRÉ-FABRICADOS

Os elementos pré-moldados para lajes são um dos produtos pré-moldados mais antigos e que mais trazem vantagens para o sistema pré-moldado seja em versatilidade arquitetônica, devido à possibilidade de obtenção de grandes vãos, seja econômica devido à redução de tempo de montagem e número de fundações. Além disso, esses são os elementos pré-fabricados que apresentam maiores níveis de industrialização o que permite a confecção de milhares de m^2 com reuso das pistas de protensão a cada 24 horas.

O mercado oferece uma variedade de sistemas para lajes pré-fabricadas, dos quais três se destacam por apresentar alto grau de pré-fabricação e dispensar o uso de escoramentos, que são:

- Sistemas de lajes alveolares protendidos ou armados;
- Sistemas de lajes com nervuras protendidas (seções T ou duplo T);
- Sistemas de lajes maciças de concreto;

As principais vantagens dos sistemas pré-fabricados para lajes são:

- A rapidez da construção;
- A ausência de escoramento;
- A diversidade de tipos disponíveis no mercado;

- A capacidade de vencer grandes vãos;
- Faces inferiores bem acabadas;
- Alto desempenho mecânico;
- Menor degradação ambiental, uma vez que dispensa o uso de madeiramento na confecção de formas e escoramentos.

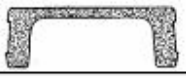
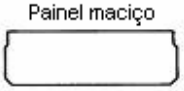
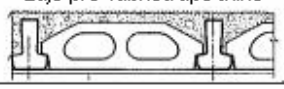
Os requisitos estruturais fundamentais para as lajes de pavimento são: a capacidade portante (resistência ao momento fletor e ao cisalhamento), a rigidez, a distribuição de força transversal de cargas concentradas e distribuição das ações horizontais por meio da ação de diafragma horizontal. Dependendo do uso, ou destinação, os pisos também necessitam atender outros requisitos como isolamento acústico e térmico e resistência ao fogo.

Na tabela 1, são apresentadas algumas características de elementos aplicados com essa função. Dentre as diversas tipologias mostradas na tabela, este trabalho se ateve aos elementos de laje alveolar pré-fabricada de concreto protendido – ELACP.

Em relação aos ensaios de cisalhamento, segundo VAN ACKER (2007), os mesmos foram idealizados no início da criação dos elementos de laje alveolar em concreto protendido – ELACPs. Naquela ocasião, os ensaios eram realizados para, a partir deles, dimensionar tais elementos.

Na Alemanha inúmeros ensaios de cisalhamento foram realizados, os quais formaram uma amostragem para a padronização. Posteriormente, com a melhoria das tecnologias de fabricação do cimento e da produção do concreto e da modernização dos processos foi necessário iniciar-se novos estudos de adequação.

Tabela 1 – Características dos principais elementos de laje (adaptado de FERREIRA, 2003)

Tipo de piso	Vão máximo (m)	Espessura do piso (mm)	Largura normal do elemento (mm)	Peso próprio do elemento (kN/m²)
Painel alveolar armado	9	100 - 300	300 - 1200	2.0 - 4.0
Painel alveolar protendido	20	120 - 550	200	2.0 - 4.8
Painel Pi	24 (30)	200 - 800	2400	2.0 - 5.0
Painel U 	9	150 - 300	600	1.5 - 3.5
Painel maciço 	6	100 - 250	300 - 600	0.7 - 3.0
Laje pré-fabricada treliçada	7	100 - 200	600 - 2400	2.4 - 4.8
Laje pré-fabrica tipo trilho 	7	200 - 300	200 - 600	1.8 - 2.4

2.3 PESQUISAS RECENTES

Vêm sendo realizadas pesquisas para que se possa conhecer melhor o comportamento dos ELACPs isoladamente, ou em conjunto. TKALCIC et al. (2007), realizaram ensaios com diversas tipologias de elementos de lajes, variando espessura e comprimento, baseando-se nas recomendações da EN 1168: 2005, para aferir a resistência ao cisalhamento desses elementos em relação aos valores teóricos de norma.

Foram ensaiados ELACPS com os comprimentos variando entre 4 m e 16 m, e espessuras variando entre 0,15 m e 0,5 m. Para ensaios de compressão do concreto dos ELACPs foram utilizados testemunhos com diâmetro de 50 mm e altura de 56 mm, atendendo os requisitos da EN 12504-1 e a distância de aplicação do carregamento foi de ***2,5 *h***. Segundo os autores, a precisão dos resultados depende da média dos ensaios, assim, quanto

maior o número de ELACPs ensaiados, maior será a precisão.

Com os resultados é possível aferir a qualidade dos produtos e comparar com os valores teóricos de cálculo.

O método de carregamento se diferenciou, pelo fato de terem sido feitos carregamentos cíclicos, na velocidade de 1/10 da carga máxima teórica de ruptura, até atingir 70% do Estado Limite Último de cálculo.

No décimo ciclo o elemento foi carregado até a sua ruptura. A Figura 4 mostra a fissura para um dos modelos de laje ensaiados.

Figura 4 – Abertura de fissura para ensaio de cisalhamento em ELAPCs
Fonte: TKALCIC et al. (2007)

Os resultados atenderam as especificações contidas na norma, segundo os autores.

Em outra pesquisa conduzida por AJDUKIEWICZ et al. (2007) foram realizados ensaios comparativos para se analisar o comportamento de elementos de laje com e sem capa, submetidos a carregamentos quase distribuídos, em idades jovens (240 dias) e mais avançadas (550 dias), desses elementos.

Foram ensaiados 4 elementos de 7 m de comprimento e 0,32 m de espessura. Os modelos HCS1 e HCS2 foram expostos às condições ambientais normais antes dos ensaios e sua resistência foi avaliada no decorrer do tempo.

Já os modelos HCS3 e HCS4 foram mantidos em condições de laboratório com temperatura e umidade relativamente controladas por quase dois meses e posteriormente sob as mesmas condições, para os ensaios de avaliação ao longo do tempo.

A Figura 5 mostra o modelo de carregamento e dimensões principais de uma tipologia dos elementos ensaiados.

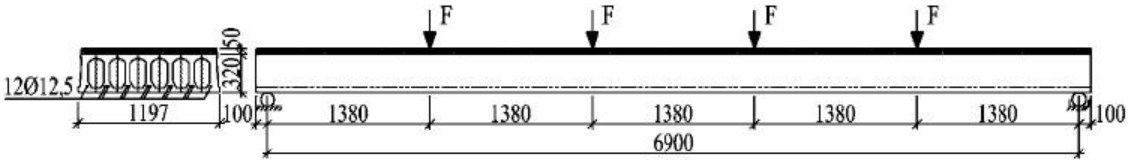


Figura 5 – Esquema de ensaio de elemento de laje em 6 pontos. Fonte: AJDUKIEWICZ et al. (2007)

A Figura 6 apresenta os gráficos de momento fletor versus deflexão máxima, dos quatro elementos ensaiados. O elemento HCS-2, com capa, apresentou o melhor desempenho, correspondendo a um dos elementos que ficou totalmente exposto às condições climáticas naturais, apresentando uma diferença entre o que apresentou menor desempenho (HSC-3) de 50 kN.m e uma deflexão em torno de 37,5 % menor que o elemento de menor desempenho.

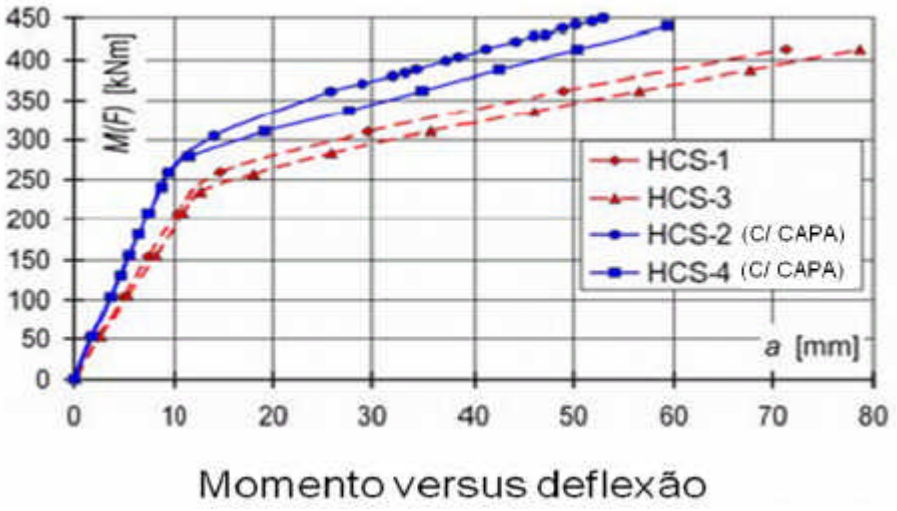


Figura 6 – Gráfico de momento por deflexão máxima para os modelos ensaiados.
Fonte: AJDUKIEWICZ et al. (2007)

Segundo os autores, os elementos ensaiados tiveram um comportamento similar na ruptura, tendo como diferença, unicamente o efeito de perda de aderência (delaminação) entre

a capa e a laje, para os elementos ensaiados com capa. Todos os elementos apresentaram falha de adesão na interface entre o concreto e os cabos de protensão, na região próxima ao apoio.

Foram realizadas pesquisas por ELLIOTT (2002) onde foram montados pavimentos compostos por ELACPs, os quais receberam a solidarização das juntas entre os elementos e a concretagem das faces, conforme recomendado pela FIB (2000) para garantir a transferência dos esforços para os outros elementos, caso ocorra algum acidente.

Não é prática comum no Brasil a execução de cintamento visando evitar o colapso global. Pesquisas que estão sendo conduzidas por ELLIOTT (2006), estudam o comportamento do conjunto de elementos de laje já solidarizados como um pavimento em relação aos mecanismos de ruptura decorrentes das ações nos ELACPs associados. Contudo, esses ensaios não utilizam capas de concreto sobre os pavimentos.

Outro fator importante para assegurar que a estrutura após a montagem irá trabalhar como um diafragma rígido, transferindo os esforços solicitantes horizontais para o restante da estrutura é o correto engrenamento dos elementos de laje por meio de graute nas junções, conforme mostrado na Figura 7.

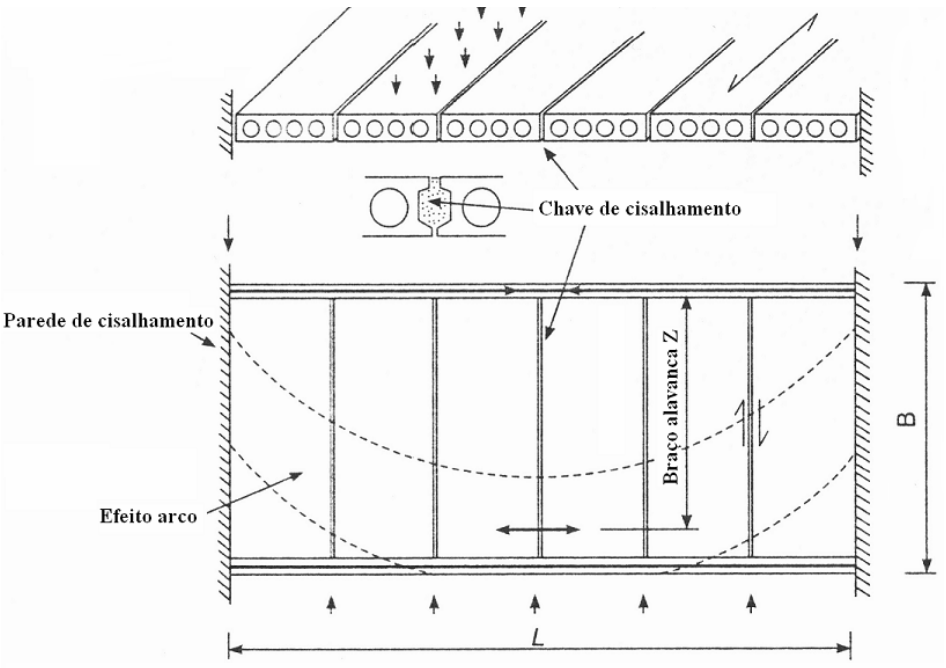


Figura 7 – Efeito de engrenamento dos elementos de laje ao formar pavimentos
Compilado de ELLIOTT (2002)

Ao intertravar os ELACPs longitudinalmente, a laje do pavimento passará atuar como uma parede. As ações verticais serão absorvidas pelos apoios e parte pela chave de cisalhamento criada, de forma a manter o mesmo nível dos elementos, conforme ELLIOTT (2002). Além disso, a mesma chave assegura a transferência dos esforços horizontais, pelo engrenamento longitudinal entre os elementos de laje, gerando o efeito de arco.

Esse ensaio é um dos vários previstos no manual da FIB (CEB-FIP, 1992) e na EN 1168: 2005, como necessário para se determinar a capacidade resistente desses elementos às ações horizontais e ao efeito de diafragma rígido. Esse tipo de ensaio possibilita conhecer com maior rigor a capacidade de transmissão dessas ações para os elementos de viga e pilar, bem como o comportamento global dos três elementos atuando conjuntamente.

A Figura 8 apresenta o esquema de montagem desses ensaios. Um aspecto importante desse tipo de ensaio é a avaliação da ligação entre os elementos de laje e pilares, na região dos recortes.

Figura 8 – Esquema de montagem de pavimento de ELACPs para ensaio de avaliação do cisalhamento entre a interface dos elementos. Fonte: FERREIRA (2007)

ÅKESSON (1993) realizou simulação computacional para analisar o comportamento na zona de transmissão, de elementos de laje alveolar pré-fabricadas de concreto protendido e comparar os resultados com o modelo teórico de cálculo. 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. A Figura 9 ilustra o esquema de cada fase analisada, com a direção dos principais mecanismos de falha.

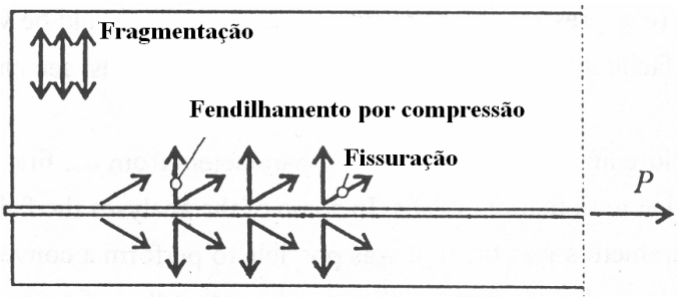


Figura 9 – Esquema de falhas possíveis em ELACPs sob ações e carregamentos
Compilado de ÅKESSON (1993)

Os ensaios de elementos de laje solidarizados são importantes para avaliar também, a capacidade de engrenamento mecânico dos elementos entre si, através de suas juntas grauteadas.

2.4 LAJES ALVEOLARES – COMPOSIÇÃO POR TIPOLOGIA

As lajes alveolares são encontradas tanto em concreto protendido quanto em concreto armado, onde os elementos estão disponíveis em espessuras que variam de 150 mm a 400 mm, atingindo em alguns casos, 500 mm de espessura. Atendendo a uma grande variedade de vãos e de carregamentos.

O uso de lajes protendidas pré-fabricadas, segundo o FIB (CEB-FIP, 1992), apresenta as seguintes vantagens:

- Uma grande gama de aplicações tanto como pisos, telhados e paredes;
- Baixos custos de produção;
- Processo de produção altamente automatizado e mecanizado;
- Apresentam bom acabamento na face inferior não necessitando de forro;
- A taxa de protensão elevada e os alvéolos conferem otima relação peso versus

carregamento;

- Bom isolamento térmico e acústico.

Algumas desvantagens das lajes alveolares podem ser:

- Inflexibilidade em certas dimensões como larguras e espessuras padronizadas e tamanho de aberturas;
- Resistência à flexão transversal limitada;
- Diferentes deformações;
- Requer equipamentos especiais de manuseio;

O ciclo de produção de ELACPs é mostrado esquematicamente no fluxograma da Figura 10. Nota-se que até a concretagem, duas atividades podem ocorrer paralelamente, dependendo do planejamento e coordenação de produção da fábrica.

Figura 10 – Fluxograma do processo de produção de ELAPCs

A Figura 11 “a”, “b”, “c” e “d”, a seguir, ilustra as 4 principais etapas do processo produtivo.

a – Sistema de protensão

b – Concretagem e cura a vapor

c – Desprotensão e corte

d – Estocagem

Figura 11 - Etapas do processo produtivo de ELACPs. Fonte: FERREIRA (2007)

Lajes alveolares também são denominadas de lajes ôcas ou vazadas. Podem ser utilizadas com ou sem previsão de uma capa de concreto moldado no local. No segundo caso, a capa irá auxiliar na distribuição de esforços horizontais e proporciona solidarização entre os elementos de laje, criando o efeito de diafragma rígido.

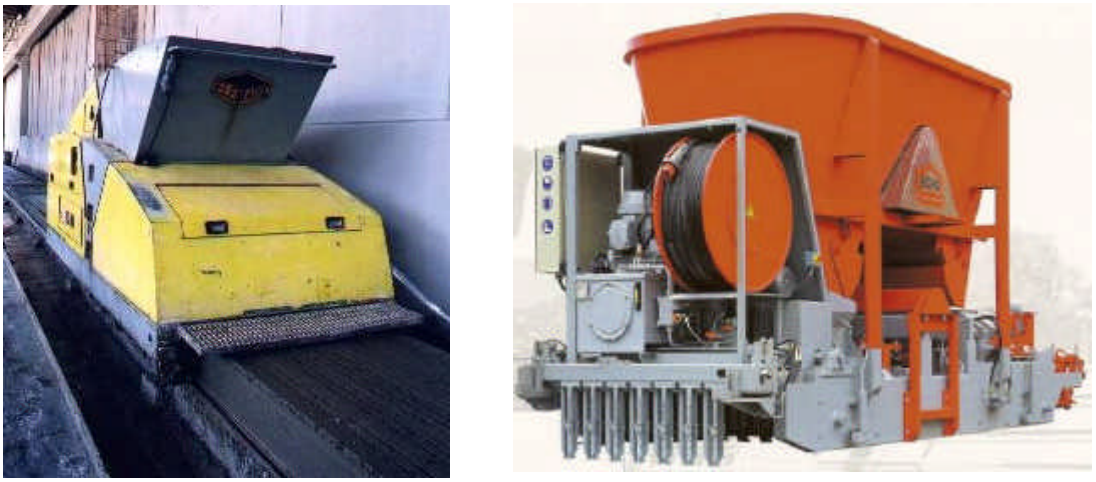
2.4.1 Geometrias Em Função Do Equipamento De Produção

O formato dos alvéolos pode ser: circular, oval, ogival, semi-ogival ou retangular. A diferença entre os formatos dos alvéolos ocorre em função do sistema de produção, isto é, o tipo de equipamento utilizado.

Podem ser utilizadas na fabricação formas convencionais com tubos sacados ou mesmo com forma perdida. Porém, os dois processos mais utilizados são:

- Extrusão: onde o concreto é expulso pelo equipamento e comprimido nas paredes do molde. Esse processo é executado com concretos de fator água / cimento muito baixo, similares aos processos de prensagem de blocos de concreto. Os alvéolos dos ELACPs produzidos por extrusão são circulares;
- Forma Deslizante (*Slipform*): Nesse processo por deslizamento de fôrma e resulta em formatos ogivais ou retangulares.

A Figura 12 “a” mostra o equipamento de extrusão, enquanto a Figura 12 “b” apresenta o equipamento de fôrma deslizante utilizados no sistema de pista fixa. Outra diferença importante entre esses processos produtivos refere-se a trabalhabilidade do concreto, enquanto as formas deslizantes utilizam um concreto mais úmido, os sistemas por extrusão necessitam de um concreto com fator água cimento mais baixo o que pode ser desfavorável a ancoragem das cordoalhas.



a – Equipamento por extrusão b- Equipamento para forma deslizante

Figura 12 “a” e “b” – Equipamentos de fabricação das lajes alveolares em pistas de protensão
Fontes: (ECHO – Engineering NV, 2006; ELEMATIC Spy, 2006)

Na Europa, um processo produtivo denominado “carrossel”, onde as pistas se movimentam e os equipamentos de concretagem ficam parados, apresenta uma evolução dos processos produtivos utilizados pelas empresas internacionais. Esse processo evita o

transporte de concreto pela fábrica, tornando o ambiente mais seco e limpo. Outra vantagem é a facilidade de transporte interno das peças e a execução de serviços secundários na própria pista de concretagem, como é o caso da fixação dos suportes para içamento ou dos rasgos para inserir as armaduras de continuidade.

Os elementos de laje produzidos nesse sistema saem para a expedição ou área de estocagem sem que seja necessário realizar serviços adicionais como perfuração, cortes parciais ou outros.

Deve ser salientado que o sistema produtivo tipo "carrossel" é novo e o único em operação até o momento. Nesse processo pose-se notar economia de espaço e racionalização no consumo de energia utilizada para promover a cura, já este processo ocorre em área especifica da fábrica. Outro aspecto importante é que toda a água utilizada para limpeza das pistas e dos equipamentos escoa por canaletas laterais e é reciclada internamente junto à pista de concretagem, sendo reaproveitada para novas limpezas. Com isso, também há economia no consumo de água dentro do processo produtivo. A Figura 13, apresenta um detalhe da pista de concretagem e do equipamento fixo. As setas indicam a direção da movimentação das pistas.

Figura 13 – Sistema de forma tipo carrossel. Fonte: FERREIRA (2007)

Na Figura 14 são apresentados alguns modelos segundo o equipamento utilizado para a fabricação. Os vazios, ou alvéolos, ajudam a tornar o elemento mais leve e com melhores

propriedades termo-acústicas. A porcentagem de área vazia na seção transversal varia entre 30% e 50% (FERREIRA, 2003).

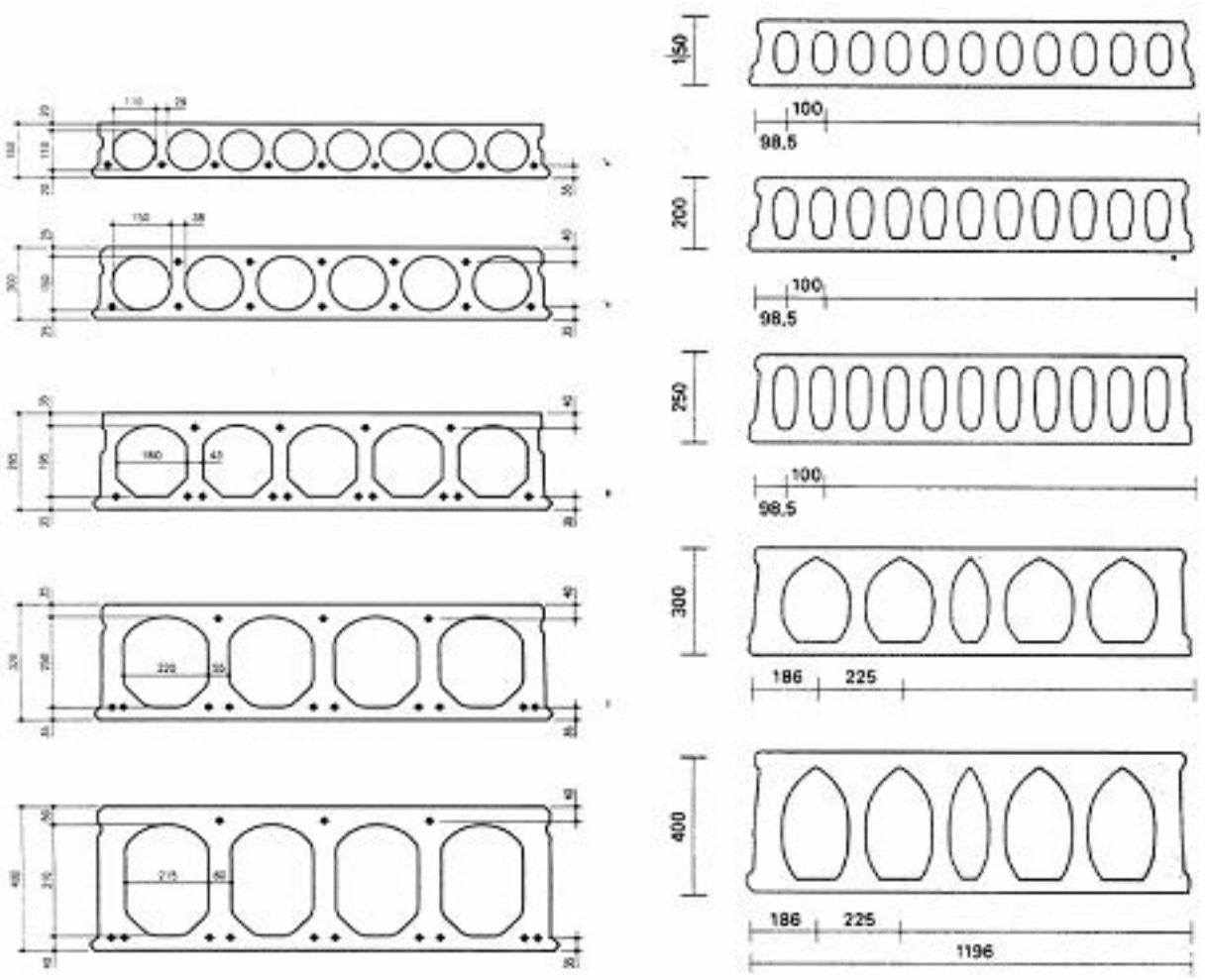


Figura 14 - Seções transversais típicas dos elementos de laje alveolar protendida
(adaptado de FERREIRA, 2003)

Os ELACPs, a exemplo de outras peças pré-fabricadas, seguem o conceito de aumento do momento de inércia das seções transversais e diminuição do peso das peças.

Segundo ELLIOTT (2002), os elementos de lajes alveolares devem possuir propriedades geométricas que possuam, além da resistência do elemento, capacidade para transmitir os esforços decorrentes das ações horizontais, funcionando como diafragma. Essa capacidade é obtida pela consolidação das juntas entre os elementos, pela correta execução das ligações de continuidade entre os elementos e pelas ligações da laje com as vigas e pilares.

Em geral, nos países europeus é comum o uso de lajes alveolares sem capa com as ligações executadas diretamente de arranques posicionados numa pré-viga e posteriormente consolidando-os com a laje.

As peças, ao serem produzidas, devem conter ranhuras na superfície superior para que, no momento da concretagem na obra, possa ser garantida a boa aderência do concreto lançado. Além disso, deve ser garantida a remoção total do material pulverulento, lavando-se a superfície, preferencialmente com água sob pressão.

Imediatamente observada a inexistência de água empoçada sobre o elemento, o concreto deve ser lançado e os demais procedimentos de acabamento executados.

Deve se promover ainda a devida solidarização entre a laje e as vigas e entre os elementos de laje entre si. Essa solidarização se faz pelo preenchimento com concreto nos pontos de apoio dos elementos e da pré-viga e das juntas longitudinais entre os elementos, utilizando graute ou microconcreto.

Caso o preenchimento dessas juntas não seja adequadamente executado, a laje poderá perder sua capacidade para absorver os esforços horizontais.

A Figura 15 “a” e “b”, a seguir, mostra o detalhe de uma ligação laje e viga e o esquema de ligações dos elementos entre si e desses com os outros elementos estruturais.

a – Exemplo de ligação entre laje e viga b - Esquema de ligações usuais para as lajes

Figura 15 “a” e “b” – Tipos usuais de ligações para elementos de lajes alveolares

No Brasil o uso de lajes com capa ainda é preponderante. Dessa forma, a continuidade é garantida pela tela da capa e pelos arranques da pré-viga. Para efeito de cálculo, ELLIOTT (2002) afirma que o coeficiente de atrito superficial entre os elementos de concreto, μ, deve ser de 0,4 para as bordas laterais dos mesmos.

Na região onde são executados os cortes dos alvéolos esse valor passa para 1,4 e deve ser de 1,7 para as bordas de topo dos elementos onde são ligados às vigas e às outras partes da estrutura longitudinalmente.

Como os elementos de laje alveolar são protendidos em apenas uma das faces, é comum existir uma contra-flecha ao se montar o pavimento. Outro cuidado a ser tomado no momento da produção, é que o concreto deve resistir já nas primeiras idades a esforços de compressão e tração, uma vez que menos de 24 horas após a concretagem os elementos são cortados e transportados.

As pistas de protensão são construídas em concreto ou em aço com comprimento de 80 a 200m. O grau de protensão, tipos de cordoalhas e espessura dos elementos são os principais parâmetros de projeto.

As lajes alveolares são principalmente utilizadas em construções com grandes vãos, como escritórios, hospitais, escolas, edifícios comerciais e industriais.

Outro uso, menos freqüente, é na construção de apartamentos e residências, quando se deseja, sobretudo, rapidez na execução e versatilidade na elaboração da planta. Além disso, seu uso não está limitado à construção pré-fabricada em concreto, podendo ser empregada em sistemas moldados no local, metálico ou em alvenaria estrutural.

Os elementos de laje alveolar possuem normalmente largura de 1200 mm (padrão europeu) ou 1250 mm (padrão americano), com comprimentos de até 20 m, sendo mais comum um comprimento de 12,5m devido às restrições impostas nas dimensões dos veículos de transporte.

A largura real do elemento é, geralmente, de 3 a 6 mm menor que a dimensão nominal para permitir ajustes construtivos e para prevenir excessos no “layout” do pavimento devido ao acréscimo acumulativo de possíveis discrepâncias nessa dimensão. As bordas dos elementos são frisadas para assegurar a transferência do cisalhamento vertical entre os elementos de laje. A junção entre elementos adjacentes são grauteadas no local, após a instalação, proporcionando a solidarização das peças.

As principais vantagens dos ELACPs são:

- Melhor desempenho termo-acústico que placas maciças;
- Vencem grandes vãos;
- São mais leves que lajes maciças;
- Dispensam escoramentos e fôrmas;
- Podem ser utilizadas em todos os sistemas construtivos;
- Menor consumo de concreto;
- Boa produtividade com alto grau de mecanização;
- Permite construção mais “seca”;
- Menor tempo de construção;
- Plataforma de trabalho imediata;
- Maior flexibilidade arquitetônica que outras lajes pré-fabricadas;
- Alta capacidade de carga;
- Bons índices de resistência a incêndios;
- Bom acabamento das superfícies inferior e superior.

2.5 CONTROLE DE QUALIDADE SEGUNDO A FIB (CEB - FIP)

O controle de qualidade está associado ao desempenho do produto conforme a aplicação destinada. Todo fabricante deve possuir nas suas instalações os equipamentos necessários para realizar os ensaios de controle de qualidade, no decorrer da produção ou estar regularmente aferindo a qualidade através de laboratórios que possam atestar o desempenho dos elementos pré-fabricados periodicamente.

Vários requisitos preliminares devem ser atendidos antes de iniciar os ensaios de aferição da qualidade. Tais verificações dizem respeito ao controle de qualidade dos materiais que irão compor o produto acabado, os métodos de fabricação dos elementos e os processos construtivos ou de montagem desses elementos nas obras.

Ao contrário dos ensaios de aferição da qualidade dos elementos de laje, as verificações de processos produtivos e construtivos devem ser realizadas constantemente, para cada novo lote de produção e em cada obra executada.

Quando um determinado lote de elementos é produzido, devem ser extraídos corpos de prova do concreto utilizado para realização dos ensaios de resistência média nas datas de liberação da pista.

Em relação aos agregados, também devem ser coletadas amostras regularmente, para conferir a granulometria dos mesmos e possíveis alterações.

A água também deve ser analisada em relação à existência de sais nocivos ou outros compostos que afetem a reação química com o cimento, podendo gerar compostos incompatíveis com o concreto ou o aço. Para o caso particular de elementos de lajes alveolares, as recomendações da FIB constam na Tabela 2.

As verificações são realizadas para todos os elementos de concreto pré-fabricados e os quesitos marcados na última coluna à direita representam as verificações adicionais que devem ser feitas para elementos de laje alveolar em relação aos demais elementos.

Tabela 2 – Aspectos a serem considerados no controle de qualidade.
Fonte: FIB (CEB-FIP, 1992)

Aspecto mudar a tabela de acordo com o fib	Controle para elementos pré-fabricados	Controles particulares para lajes alveolares
1 Materiais Componentes do Concreto		
Agregado Graúdo / Agregado Miúdo	x	x
Água / Cimento / Aditivos	x	x
Aço	x	x
2 Processo de produção		
Dosagem do concreto	x	x
Protensão	x	x
Compactação do concreto	x	x
Cura	x	x
3 Produto		
a) compressão		
Ruptura de Corpos de Prova moldados	x	
Ruptura de Corpos de Prova extraídos (testemunho)	x	x
Ensaios não destrutivos		x
b) tração		
Ruptura de Corpos de Prova moldados	x	
Ensaios de lajes		x
Densidade do concreto		x
Escorregamento das cordoalhas		x
Ensaios de carga (cisalhamento)		x
Dimensões	x	x
Controle de fissura	x	x
5 Construção no local		
transporte	x	
Equipamento para montagem		x
Condições de apoio	x	x
Juntas e ligações	x	x
Controle de fissura	x	x

O controle de qualidade dos ELACPs é exercido de duas maneiras distintas. A primeira refere-se aos procedimentos adequados na fase de projeto, para garantir diversos requisitos como a seguir:

- **Escorregamentos, lascas e partes quebradas**: o escorregamento dos fios ou cabos de protensão é crítico, portanto devem ser tomadas algumas precauções. A principal medida é não cortar as lajes antes que tenham atingido a resistência mínima de projeto para retirada da protensão. Se não observado esse procedimento haverá escorregamento dos fios ou cabos em todo o comprimento da zona de transmissão de

esforço de protensão, uma vez que o concreto não será capaz de restringir, mecanicamente, a movimentação do aço. O embutimento visível dos fios ou cabos ao se retirar a protensão pode ser medido para dar uma noção do comprimento de transmissão e de quanto se deve limitar esse embutimento. Se a aderência entre o concreto e o aço na zona de corte da peça estiver normal, após o corte da laje, então é possível utilizar a Equação 1 para se determinar o escorregamento teórico ocorrido no momento da desprotensão.

$$\Delta l_0 = f * L_t * e_s \qquad \text{Eq. (1) - AKESSON (1993)}$$

Onde:

Δl_0 = escorregamento ocorrido;

f = fator de forma, variável entre 0,33 e 0,50, segundo resultados experimentais, dependente da tipologia de aço (fios ou cabos) e da distribuição das tensões de aderência entre concreto e o aço na extensão da zona de transferência de protensão, (Lt).

L_t = comprimento característico de transferência de protensão que varia entre 400 mm e 750 mm para cabos até ∅9,3 mm e entre 600 mm e 1000 mm para cabos de ∅12,5 mm.

e_s = deformação ocorrida em função da força de protensão aplicada no cabo;

- **Resistência ao cisalhamento:** A resistência ao cisalhamento deve ser verificada regularmente como requisito de aferição de qualidade, seja por meio de ensaios destrutivos ou não destrutivos como será visto;
- **Ancoragem dos fios e cabos de protensão**: O comprimento de ancoragem dos cabos de protensão está diretamente relacionado com a extensão da zona de transferência de

protensão, conforme visto anteriormente;

- **Fissuras**: deve ser verificada visualmente a existência de fissuras, especialmente na região das nervuras, na região de corte das peças e na face superior, nas primeiras idades. Em geral, fissuras com aberturas iguais ou menores que 0,2mm;
- **Tolerâncias dimensionais**: Essas devem ser verificadas as dimensões principais das peças (comprimento, largura e espessura), como empenamentos longitudinais, transversais e esquadro dos elementos.

Segundo o FIB (CEB-FIP, 1992), quanto maior o processo de mecanização, maior deve ser a experiência em manufatura da empresa.

O acompanhamento por encarregados e gerentes de produção é importante em todas as fases, uma vez que cada espessura de laje pode receber uma força de protensão diferente de outras, maior ou menor número de fios ou cordoalhas e um tempo para retirada da protensão e corte dos elementos diferenciados entre cada lote.

Dentre os dois principais tipos de equipamentos de produção, por extrusão e por fôrmas deslizantes, as limitações das dimensões em tamanho e forma são governadas pela consideração dos seguintes aspectos:

- Segurança estrutural, isto é, o somatório das espessuras de nervuras total mínimo como função da resistência ao cisalhamento exigida;
- Segurança ao fogo;
- Tecnologia de produção.

Ao se projetar um novo elemento de laje devem ser consideradas as duas formas de produção e analisar-se qual dos métodos será o mais eficiente para a geometria adotada.

A Tabela 3, a seguir, exibe resumidamente os procedimentos de projeto e de fábrica, ao se desenvolver um elemento de laje alveolar.

Tabela 3 – Requisitos de projeto para fabricação de ELAPCs.
(Compilado de FIB, 1992).

Requisitos de projeto de ELAPCs visando a qualidade	
Dimensões	**Projeto:** verificar tolerâncias dimensionais: altura, espessura de cada nervura, espessura total das nervuras, espessura da mesa superior e inferior e posicionamento dos fios ou cabos; **Em fábrica:** comprimento dos suportes disponíveis
Fissuras	**Não deve haver formação de fissuras na zona de transferência de protensão, principalmente se ocorrer por resistência ao cisalhamento;fissuras com até 0,2 mm de abertura e relação comprimento versus profundidade de até 3, são permitidas desde que não sejam em ambientes quimicamente agressivos.**
Ancoragem de fios e cabos	**Projeto:** determinar diâmetros, disposição e quantidade de fios e cabos; força de protensão; data de desprotensão; resistência do concreto para desprotensão. **Em fábrica:** conferir embutimento dos cabos; fissuras que sejam paralelas às posições dos cabos; lascas ou partes soltas próximas aos cabos e às bordas.
Lascas e estouros de partes	**Verificar em todo elemento a existência de partes lascadas, soltas ou estufadas e desprendidas dos fios ou cabos**
Resistência ao cisalhamento	**Ensaios de verificação destrutivos e não-destrutivos regulares por lotes de produção.**

A segunda delas refere-se à organização e fiscalização adequada dos processos de produção, para evitar falhas de execução ou de fabricação de um determinado produto. Seguindo essa forma de controle, diversos itens devem ser acompanhados e previstos durante a produção das lajes.

Com relação à produção, deve-se notar que todos os fatores importantes que possam afetae a qualidade final do produto devem estar definidos na fase de projeto. Os principais aspectos a serem considerados em relação à qualidade do produto final quando projetando as seções transversais para lajes alveolares são:

- Nervura e espessura do flange – para dimensões mínimas, diferentes aspectos como as propriedades de mistura do concreto, tamanho do agregado, compactação do concreto e resistência ao cisalhamento devem ser levados em consideração;
- Configuração, cobrimento do concreto e número de cabos protendidos – deve ser considerada uma espessura mínima para se atingir um adequado isolamento acústico do concreto, levando em consideração quaisquer tolerâncias dimensionais possíveis;

- Forma dos núcleos (alvéolos) – a forma dos núcleos é determinada pelo sistema de produção. Para lajes extrudadas, a forma é, em princípio, semi-circular a oval, sendo que para lajes formadas por fôrmas deslizantes os núcleos usados são geralmente escantelados.

A espessura da flange, a forma dos núcleos e o cobrimento do concreto para os cabos protendidos também têm influência na resistência ao fogo da laje.

Segundo ELLIOTT (2007), devem ser tomadas as medidas, com paquímetro, de cada nervura entre os alvéolos e, posteriormente, anotadas no elemento a ser ensaiado, ou numa folha onde conste o número do elemento, a posição de cada nervura e sua largura.

O mesmo procedimento deve ser realizado (FIB, 1992) para as flanges superiores e inferiores dos alvéolos.

Essas medidas servirão para auxiliar a análise do elemento ensaiado e certificar se a ruptura teve início na nervura ou na flange de menor espessura.

FIB (CEB-FIP, 1992) e a EN 1168 – 2005, incluem no modelo de cálculo teórico os procedimentos para se calcular o somatório das seções transversais das nervuras dos ELAPCs. Esse procedimento será detalhado adiante.

Segundo VAN ACKER (2007), a forma ideal de apoio para os elementos de laje nos ensaios de apoio padrão é utilizar uma rótula na extremidade oposta à extremidade onde será realizado o ensaio. A rótula centrada permite que exista algum deslocamento tridimensional da peça até que ela se acomode. Dessa forma, o risco de fissuras com tensões abaixo das tensões nominais fica praticamente eliminado, uma vez que pequenos empenamentos ou desníveis se ajustam pelo equilíbrio da rótula.

Neste trabalho, não foi utilizado esse método por não estar previsto no manual da FIB (CEB-FIP, 1992).

Ainda, (idem), os elementos que serão submetidos aos ensaios deverão ser construídos

segundo as recomendações gerais a seguir:

- Possuir a largura e a espessura total como o padrão de fabricação;
- Comprimento de 15*h ou 4,00 m (em que h é a espessura do elemento de laje sem capa), devendo tomar a maior entre as duas medidas;
- Verificar as condições de umidade e temperatura na data dos ensaios;
- Retirar um trecho de elemento adjacente ao modelo de ensaio, medindo entre 50 mm e 200 mm, de onde serão retirados corpos de prova cilíndricos para verificação da resistência do concreto para o elemento a ser ensaiado. Esse procedimento deve ser feito através de serra copo diamantada;
- Promover o nivelamento adequado nos apoios para correta acomodação das peças, evitando concentração de esforços de torção e ruptura prematura;

2.6 MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE ELACPs

As lajes alveolares são fabricadas utilizando-se apenas dois materiais como matéria-prima: o concreto e aço. Para que se possa conseguir obter melhores desempenhos mecânicos dos elementos de lajes produzidos é necessário que trabalhe em cada um desses materiais e assegurando a boa interação entre eles.

Por ser a principal matéria-prima empregada na fabricação das peças pré-fabricadas, descreve-se a seguir alguns conceitos e materiais a fim de fornecer referencias que possam proporcionar avanços no uso desse material na indústria de pré-fabricados.

De forma geral, os traços empregados almejam a obtenção de concretos de alta resistência mecânica, obtida em curto prazo de tempo. No caso de ELACPs, 24 horas é o tempo de corte e retirada das peças das pistas de moldagem. Nas vigas e pilares, concretos com f_{ck} superior a 40 MPa são comumente empregados. Portanto, a aplicação de um concreto de alto desempenho com uso de aditivos, fibras e agregados especiais torna-se cada vez mais

comum nos pátios das fábricas.

Segundo o PCI (1998) no *"Design Guide for Precast Prestressed Slabs"*, nos Estados Unidos já é comum o uso de concretos com 50 MPa a 75 MPa. Contudo, esses valores são praticados naquele país, em razão do dimensionamento prevendo abalos sísmicos nas edificações.

Considerando os elementos de laje, a principal diferença do concreto utilizado para os demais tipos de concreto está no fator água / cimento, em geral, bem menor que o usual.
Em relação aos agregados, a composição granulo métrica é essencial para se permitir um concreto capaz de ser adequadamente compactado pelos equipamentos.

Normalmente, o cimento ARI é o mais utilizado, em razão da sua capacidade em adquirir alta resistência já nas primeiras horas. No caso da indústria de pré-fabricados esse quesito é importante, uma vez que a cura convencional e a desmoldagem nos tempos adequados para os demais cimentos, ocasionaria a imobilização das formas por longo período de tempo, tornando inviável, economicamente, a pré-fabricação.

A granulometria é um aspecto importante nos grãos de cimento, quando o clínquer passa pelo processo de moagem uma vez que ela define a velocidade das reações de hidratação.

O cimento CP V- ARI tem suas especificações descritas na NBR 5733/1991. Apesar de proporcionar uma cura mais rápida, como descrito, atinge resistências finais inferiores aos cimentos CP II e CP III. A garantia da rápida pega e resistência iniciais dos concretos elaborados com cimento ARI, se deve à elevada capacidade de hidratação desse. Esse aspecto deve ser considerado, especialmente quando se trabalha com elementos de pequenas espessuras uma vez que, havendo rápida hidratação também existe uma rápida exotermia.

Deve ser considerada a possibilidade de aberturas de microfissuras devidas à retração. Dessa forma, é possível controlar esse efeito indesejável, seja pela adição de fibras, seja por

meio de aditivos que diminuam o calor de hidratação.

Como a fabricação seriada é um dos pré-requisitos para a produção dos pré-moldados, o aumento da produtividade pode ser obtido pelo aumento do número de fôrmas, ou através da composição adequada do concreto.

No primeiro caso o investimento é muito alto, no segundo exige-se maior qualificação técnica do pessoal de fábrica para elaborar concretos com estudo de granulometria, uso de cimento de alta resistência inicial, adições, aditivos e métodos mais eficientes de cura.

Para o caso específico de elementos de laje alveolar, a cura a vapor, ou térmica, é uma forma de aumentar a produtividade, melhorar a qualidade do produto acabado e melhorar o desempenho estrutural desses componentes. Isso ocorre porque existe um equilíbrio entre o calor de hidratação, interno, e o vapor aquecido, externo, que evita perda da água de hidratação.

A elevada reatividade do cimento CP-V ARI, é aproveitada como forma de acelerar o processo de hidratação e reações que ocorrem entre a pasta cimentícia e os agregados.
Sob o ponto de vista da melhoria da qualidade, na fabricação de ELACPs, o uso do cimento CP-V ARI é fundamental.

A melhoria do processo produtivo, o aprofundamento do conhecimento acerca do comportamento do concreto e dos novos aditivos desenvolvidos nos últimos anos, possibilita que se obtenha hoje elevada resistência inicial, rápida cura e baixa retração da pasta cimentícia.

Na indústria de pré-moldados, as adições e os aditivos estão cada vez mais presentes. No caso de lajes alveolares a intenção é obter-se uma pasta coesa, de baixo fator água/cimento e cura rápida, para atingir a resistência mínima necessária para liberação da protensão e das pistas no menor tempo possível. Como adições, podem ser mencionadas a microssílica e o fíler calcário.

Os elementos de laje alveolar, em relação ao processo produtivo, são feitos com concretos de baixo fator água / cimento. Esses concretos, em geral são extremamente secos e possuem baixa trabalhabilidade. Os equipamentos utilizados no Brasil fazem uso desse tipo de concreto. Caso sejam utilizados equipamentos do tipo *"slipform"*, é necessário utilizar um concreto mais fluido, mas com baixo *slump* para evitar-se excessivas deformações e nas faces superiores dos alvéolos.

A Figura 16 "a" e "b", a seguir, compara a superfície das lajes produzidas pelos dois métodos, sendo a primeira com concreto menos fluido (extrusão) e a segunda com concreto mais fluido (forma deslizante). Nota-se, no caso da Figura 16 "b", os sulcos formados pela depressão do topo dos alvéolos nas regiões onde não se encontram as nervuras.

a - Extrusora –África b – Fôrma deslizante – Reino Unido

Figura 16 "a" e "b"– Diferença entre os concretos usados em ELACPs. Fonte: FERREIRA (2007)

Como descrito, o uso de superplastificantes de segunda e terceira geração possibilitam melhorar a trabalhabilidade sem que seja necessário aumentar a quantidade de água.

Nota-se que nos dois métodos de produção apresentados, o segundo apresenta algumas melhorias em relação ao primeiro, como:

- Face superior mais rugosa, melhorando a aderência com a capa;
- Maior facilidade de colocação de insertos no momento da concretagem;
- Pasta mais homogeneizada e úmida, conferindo maior aderência à armadura.

Contudo, em termos de sustentabilidade, o primeiro método, por utilizar menor quantidade de água para produção, é o mais adequado. Outra vantagem é a imobilidade da pista, que diminui o tempo com limpeza e manutenção dos equipamentos. Com isso, a avaliação de qual dos dois sistemas é o melhor, se torna mais complexa, exigindo um estudo específico para determinar o custo versus benefício real de cada um.

2.6.1 Agregados

Os agregados são os componentes minerais responsáveis por grande parte da ocupação volumétrica do concreto, cerca de 75% do volume das peças em concretos é composto por esse tipo de material.

As características mais importantes dos agregados são:

- Composição mineralógica;
- Resistência à compressão;
- Absorção de água;
- Superfície específica e geometria (forma romboédrica é a ideal).
- Granulometria seguindo os padrões normativos para se definir se são graúdos ou miúdos;
- Forma dos grãos;
- Isenção de corpos estranhos, saibro, argila e outros materiais pulverulentos.

2.6.2 Aditivos e Adições ao Concreto

O concreto recebe, hoje em dia, diversos outros produtos que ajudam a melhorar ou alterar suas propriedades. São as adições e os aditivos.

A primeira categoria se relaciona aos seguintes produtos ou materiais:

- Cinzas volantes;

- Pozolanas;
- Fíler calcário;
- Escória de alto-forno.
- Sílica ativa;
- Fibras metálicas e sintéticas.

A segunda categoria está relacionada aos aditivos, que são, geralmente, produtos químicos adicionados no momento de aplicação do concreto na obra. São eles:

- Aceleradores de pega;
- Retardadores de pega;
- Plastificantes;
- Impermeabilizantes;
- Corantes.

Entre as adições, para o caso específico das lajes alveolares, a adição de fibras na capa pode contribuir para o aumento de algumas propriedades mecânicas desses elementos.

Segundo o ACI 544.R1-82 (1992), concreto reforçado com fibras (CRF) é um concreto contendo um cimento hidráulico, água, agregados miúdo e graúdos e fibras discretas descontinuas.

Não são consideradas malhas contínuas, tecidos trançados e longas barras como tipos de fibras discretas para reforço de elementos. Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), o concreto com fibras também pode conter pozolanas ou aditivos normalmente empregados em concretos convencionais.

De acordo com o ACI 544-R1 (1987), o concreto reforçado com fibras difere do concreto comum pelo tamanho máximo do agregado, que deve estar limitado entre 2 mm e 10 mm. O comprimento das fibras varia, geralmente, entre 10 mm e 50 mm, mas fibras contínuas como fios de lã, algodão ou tecido, também podem ser utilizadas no CRF.

A adição das fibras no concreto tem como objetivo principal minimizar os efeitos de fragilização do material decorrentes da obtenção das elevadas capacidades de carga. Sabe-se que, com o aumento da resistência, o concreto passa a se comportar como um material frágil, podendo romper-se abruptamente, o quê torna perigosa a sua utilização em elementos estruturais.

Com a adição das fibras esse efeito é minimizado, pois segundo WAFA & ASHOUR (1992), o material se torna mais dúctil. Além disso, as pesquisas realizadas por eles comprovam que o aumento da resistência à compressão aumenta pouco (cerca de 5%), porém na flexão os ganhos são mais significativos proporcionando ganhos de até 87% na resistência.

A tenacidade, avaliada pelo ensaio de flexão, pode aumentar de 3,8 vezes até 18,7 vezes. A resistência à tração indireta também podem aumentar bastante, até 160%.

No que diz respeito ao processo de pré-fabricação de elementos de laje, os aditivos de maior importância são os superplastificantes. A Tabela 4, mostra os principais agentes aditivos para concretos e suas principais finalidades.

Tabela 4 – Aditivos para concretos e suas funções

ADITIVOS	INDICAÇÕES
Acelerador de cura	**Diminuir o tempo de cura do concreto, especialmente nas primeiras idades**
Retardador de cura	**Aumentar o tempo para iniciar a pega do concreto**
Plastificante	**Melhorar a trabalhabilidade sem aumentar o fator água cimento**
Impermeabilizante	**Protege o concreto contra a umidade ambiental**

Os aditivos superplastificantes são amplamente utilizados na fabricação de peças com geometria complexa, onde a vibração não pode ser efetuada com toda eficiência necessária. Também são utilizados em elementos onde a concentração de armadura afeta o processo de adensamento.

Sua principal função é permitir a redução do fator a/c e promover um aumento da fluidez da massa fresca com a quantidade mínima de água.

O efeito na redução da água de amassamento confere ao concreto maiores capacidades mecânicas e tornam estes mais resistentes as ações de agentes deteriorantes. A permeabilidade de concretos com baixos valores de fator a/c também diminui, o que os torna mais eficientes para aplicação em ambientes saturados ou de umidade elevada, como ambientes de calderaria e siderurgia.

2.6.3 Importância da Cura do Concreto

Além dos requisitos normativos em relação aos insumos utilizados na fabricação de pré-moldados de concreto em geral, deve ser observado, para o caso das ELACPs, que o processo de cura afeta significativamente os seguintes quesitos:

- Durabilidade do elemento;
- Resistência do concreto;
- Formação de fissuras por retração na cura;
- Tempo de imobilização do equipamento e pistas.

Em vista disso, é importante que se considerem esses quesitos ao se produzir tais elementos.

Após o início de pega do concreto, a hidratação do cimento se desenvolve com grande velocidade. Nesse período a água existente na mistura tende a sair pelos poros do material e evaporar.

A evaporação, se não controlada, pode comprometer a hidratação do cimento, gerando fissuração excessiva por retração e diminuição da capacidade resistente do concreto.

Ao conjunto de medidas que visam evitar a evaporação precoce da água de hidratação e conservar as condições necessárias à boa hidratação do cimento, se dá o nome de cura.

Para estruturas usuais de concreto, a cura consiste em molhar as superfícies aparentes da peça, ou mesmo molhar as faces das formas de madeira, mantendo-as úmidas até que

alcancem resistência satisfatória.

Para elementos estruturais de superfícies, moldados no local, deve-se atingir resistência característica a compressão (***fck***) de 15 MPa (NBR 14931/2004). Já para peças protendidas é necessária uma resistência mínima (***fck***) de 20 MPa ou de acordo com o projeto de produção.

A água utilizada na cura deve ser potável ou satisfazer as condições descritas na NBR 12654/1992.

Na indústria de pré-fabricados em concreto a liberação das formas e do elemento moldado é sempre feita no menor tempo possível, a fim de se reduzir o chamado "tempo morto" e aumentar a produtividade do processo.

A Figura 17 mostra um exemplo de sistema de cura a vapor realizada através de envelopamento das pistas.

Figura 17 – Seqüência de pistas submetidas à cura com vapor. Fonte: FERREIRA (2007)

Segundo EL DEBS (2000), as possíveis maneiras de acelerar o processo são:

- Utilizar cimento de alta resistência inicial (**ARI**);
- Aumentar a temperatura;
- Utilizar aditivos.

Atualmente, o uso do cimento **ARI** é comum, combinado com um aumento de temperatura que pode ser via vapor de água ou aquecimento das formas. A utilização de aditivos é menos freqüente.

A NBR 9062/2006 prevê dois tipos de cura para os elementos pré-moldados: cura normal e cura acelerada. Além dos cuidados com a perda da água de reação, o concreto deve ser protegido contra agentes prejudiciais, como mudanças bruscas de temperatura, secagem, chuva forte, água torrencial, agentes químicos, bem como choques e vibrações que possam produzir fissuração da massa ou prejudicar a aderência com a armadura.

Nos casos de cura acelerada por tratamento térmico, a NBR 9062/1985 diz que caso não haja contato de vapor de água com a superfície, deve-se manter úmida a superfície ou fazer uso de película impermeável resistente à temperatura imposta pelo tratamento. O tratamento térmico deve ser cuidadosamente controlado, levando-se em conta as seguintes fases:

- Velocidade máxima da elevação da temperatura;
- Temperatura máxima;
- Tempo de aplicação do calor;
- Tempo de resfriamento.

Na cura a vapor e à pressão atmosférica, devem ser tomados cuidados especiais para que as peças sejam aquecidas uniformemente.

Este tratamento é efetuado em ambiente vedado por material isolante como: lonas, lençóis plásticos ou outro material adequado, de maneira a garantir a saturação do vapor e impedir excessiva perda de calor e umidade.

As saídas dos pontos de alimentação de vapor devem ser posicionadas de forma a evitar a descarga direta sobre as peças ou fôrmas. Caso contrário, poderá haver diferença de resistência num mesmo lote de elementos fabricados, ocorrendo variabilidade nas

características dos elementos, tendo como conseqüência a diminuição da qualidade do produto.

Devem ser analisadas, do ponto de vista econômico, as diversas soluções possíveis para utilização de cura térmica, em função da relação custo versus benefício, uma vez que todos os processos dependem de consumo energético, que é um dos principais fatores que evidenciam a perda de eficiência dos processos industriais atualmente.

As temperaturas da câmara de vapor e do elemento pré-moldado devem ser convenientemente controladas.

De acordo com a NBR 9062/2006, deve-se utilizar uma curva de temperatura em função do tempo respeitando os seguintes parâmetros:

- Incremento máximo na elevação da temperatura de 20º C/h;
- Temperatura máxima do elemento submetido a tratamento a vapor sob pressão atmosférica de 70º C;
- Decréscimo de temperatura a uma taxa inferior a 30º C/h.

É proposta por EL DEBS (2000), uma curva de aquecimento apresentada na Figura 18. O autor salienta que a forma mais difundida é a cura a vapor à pressão atmosférica e destaca que a cura a vapor com pressão é utilizada em elementos de concreto celular.

Salienta ainda que outras formas de aquecimento podem ser utilizadas para se acelerar o processo de ganho de resistência tais como:

- Aquecer a água de amassamento e os agregados antes da mistura;
- Empregar raios infravermelhos ou uso de resistência elétrica (utilização da própria armadura ou fios especiais).

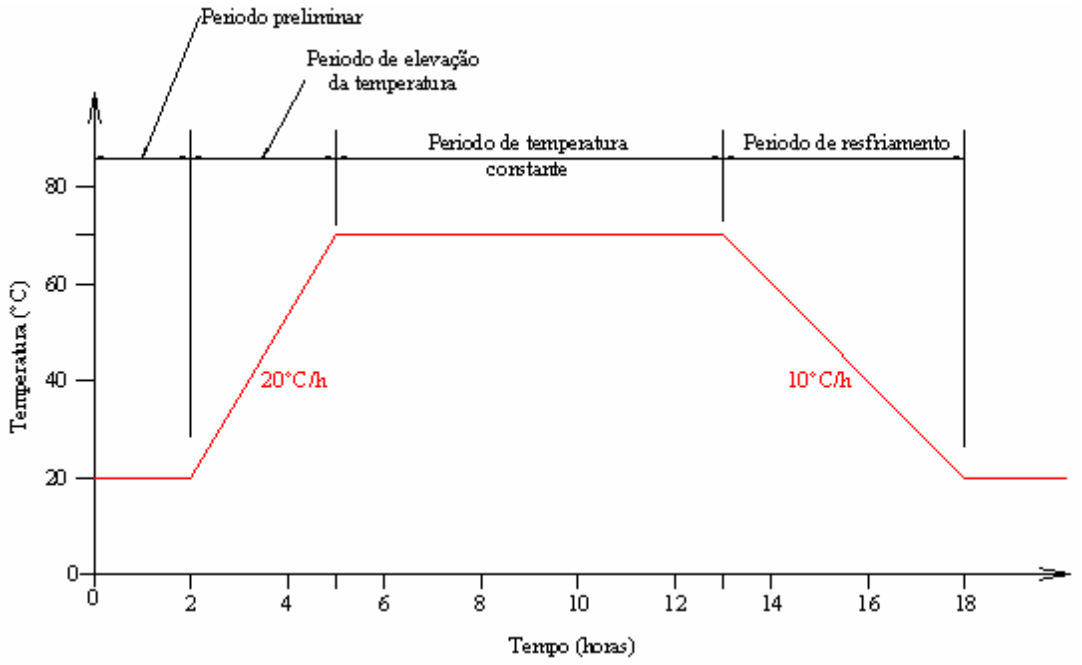


Figura 18– Ciclo típico de cura a vapor (EL DEBS, 2000)

2.6.4 Principais Características dos Aços Utilizados

Em lajes alveolares, no Brasil, aplica-se normalmente como material de resistência à tração, cordoalhas de protensão de 7 fios, apenas na face inferior das lajes. Já no exterior é comum o uso de feixes de fios de protensão que são posicionados até o centro da seção transversal da peça.

É possível aplicar aço de protensão nas duas faces, porém não é a situação comum para lajes.

A Figura 19, a seguir, apresenta um exemplo de protensão simultânea dos cabos. Esse método garante maior homogeneidade da força de protensão aplicada.

Figura 19 – Protensão simultânea do feixe de fios, Inglaterra. Fonte: FERREIRA (2007)

O aço presente na capa, concretada no local, é composto por armadura passiva em malha, porém o trabalho em conjunto com as lajes pode não ocorrer caso não se observem cuidados na fabricação das mesmas ou no momento de execução da capa na obra. As cordoalhas e fios para protensão, no Brasil, são produzidos por uma única siderúrgica. Sendo assim, existe certa dificuldade em adquirir todas as bitolas que o fabricante menciona em seu catálogo, especialmente para o caso de baixo consumo.

Um dos fatores que dificultam o desenvolvimento de produtos do aço voltados para a construção civil no Brasil é que sua produção visa primeiramente às exportações, pois, sendo os fabricantes empresas multinacionais, buscam atender primeiramente o mercado mundial.

Conseqüentemente, não existe preocupação em atender o mercado nacional da construção civil, pois esse representa pouco em relação ao mercado internacional. Assim, o mercado está sujeito à disponibilização de produtos que os fabricantes queiram distribuir.

São produzidos no país, fios e cordoalhas para utilização em sistemas de pré-tensão e cordoalhas para os sistemas de pós-tensão. Neste trabalho só serão vistos os aços destinados à pré-tensão, uma vez que esse é o sistema de protensão utilizado na produção dos ELAPCs.

Para o caso dos fios, são atendidos os requisitos da NBR 7482, da ASTM-A 421 e da BSI – 2691. O módulo de elasticidade para os fios corresponde a 210 MPa. A Figura 20

mostra um rolo de fio liso para protensão.

Figura 20 – Embalagem de fornecimento dos fios para protensão
Fonte: ARCELOR-MITTAL (2007)

A perda, por relaxação, após 100 horas a 20° C, submetidos ao carregamento inicial correspondente a 80% da carga máxima ruptura, segundo o fabricante, é de 8,5% para os fios de relaxação normal – RN e de 3,5% para os fios de relaxação baixa – RB. Para o caso das cordoalhas de 3 e 7 fios, mostrados na Figura 21, são atendidos os requisitos constantes da NBR 7483.

As cordoalhas são fabricadas apenas com aços de relaxação baixa – RB.

Figura 21 – Cordoalhas de 3 e 7 fios para protensão
Fonte: ARCELOR-MITTAL (2007)

A Tabela 5, a seguir, especifica os tipos de fios produzidos e suas principais características e propriedades.

Tabela 5 – Fios para protensão produzidos no Brasil. Fonte: ARCELOR-MITTAL (2007)

Tipo	Diâmetro nominal (mm)	Área nominal (mm^2)	Área mínima (mm^2)	Massa média (kg/km)	Tensão mínima de ruptura		Tensão mínima (1% alongamento)		Along. na ruptura (%)
					(MPa)	(N/mm^2)	(MPa)	(N/mm^2)	
CP 145 RB L	9,0	36,6	62,9	500	1450	145	1310	135	6,0
CP 150 RB L	8,0	50,3	49,6	395	1500	150	1350	135	6,0
CP 170 RB E	7,0	38,5	37,9	302	1700	170	1530	153	5,0
CP 170 RB L	7,0	38,5	37,9	302	1700	170	1530	153	5,0
CP 170 RN E	7,0	38,5	37,9	302	1700	170	1450	145	5,0
CP 175 RB E	4,0	12,6	12,3	99	1750	175	1580	158	5,0
CP 175 RB E	5,0	19,6	19,2	154	1750	175	1580	158	5,0
CP 175 RB E	6,0	28,3	27,8	222	1750	175	1580	158	5,0
CP 175 RB L	5,0	19,6	19,2	154	1750	175	1580	158	5,0
CP 175 RB L	6,0	28,3	27,8	222	1750	175	1580	158	5,0
CP 175 RN E	4,0	12,6	12,3	99	1750	175	1490	149	5,0
CP 175 RN E	5,0	19,6	19,2	154	1750	175	1490	149	5,0
CP 175 RN E	6,0	28,3	27,8	222	1750	175	1490	149	5,0
L = liso; E = entalhado (conferre maior aderência ao concreto)									

A Tabela 6, a seguir, mostra os tipos de cordoalhas produzidas no Brasil, conforme as características descritas anteriormente.

Tabela 6 – Cordoalhas de 3 e 7 fios para protensão. Fonte: ARCELOR-MITTAL (2007)

Tipo	Diâmetro nominal (mm)	Área nominal (mm^2)	Área mínima (mm^2)	Massa média (kg/km)	Carga mínima de ruptura		Carga mínima (1% alongamento)		Along. na ruptura (%)
					(kN)	(kgf)	(kN)	(kgf)	
Cord. CP 190 RB 3x3,0	6,5	21,8	21,5	171	40,8	4080	36,7	3670	3,5
Cord. CP 190 RB 3x3,5	7,6	30,3	30,0	238	57,0	5700	51,3	5130	3,5
Cord. CP 190 RB 3x4,0	8,8	38,3	37,6	304	71,4	7140	64,3	6430	3,5
Cord. CP 190 RB 3x4,5	9,6	46,5	46,2	366	87,7	8770	78,9	7890	3,5
Cord. CP 190 RB 3x5,0	11,1	66,5	65,7	520	124,8	12480	112,3	11230	3,5
Cord. CP 190 RB 7x9,5	9,5	55,5	54,8	441	104,3	10430	93,9	9390	3,5
Cord. CP 190 RB 7x12,5	12,7	101,4	98,7	792	187,3	18730	168,6	16860	3,5
Cord. CP 190 RB 7x15,2	15,2	143,5	140,0	1126	265,8	26580	239,2	23920	3,5
RB = relaxação baixa									

Apesar de estarem indicadas nas tabelas as cordoalhas de 3 fios, segundo VAN ACKER & ELLIOTT (2007), essas cordoalhas não são recomendadas para a fabricação de elementos de laje alveolar pré-fabricada de concreto protendido – ELACPs.

Esse tipo de cordoalha possui pouco entrelaçamento entre os fios diminuindo a capacidade de atrito mecânico entre a interface da pasta cimentícia e do aço. Além disso,

como pode ser visto na primeira cordoalha à esquerda da Figura 21, a torção ocorre de forma mais alongada do que as cordoalhas com 7 fios, tornando mais fácil o escorregamento do aço no interior do concreto.

3 DESCRIÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO NOS ENSAIOS

Dos diversos tipos de ensaios previstos pela FIB (CEB-FIP, 1992) e pela EN 1168:2005 (CEN, 2005), foram realizados, neste trabalho, os ensaios padrão de apoio para 4 tipologias de ELACPs. Os possíveis arranjos para o ensaio de apoio padrão são os mostrados na Figura 22. Da mesma forma, a extração dos corpos de prova das pistas quando a pista for liberada, devem seguir o esquema mostrado na Figura 23, a seguir.

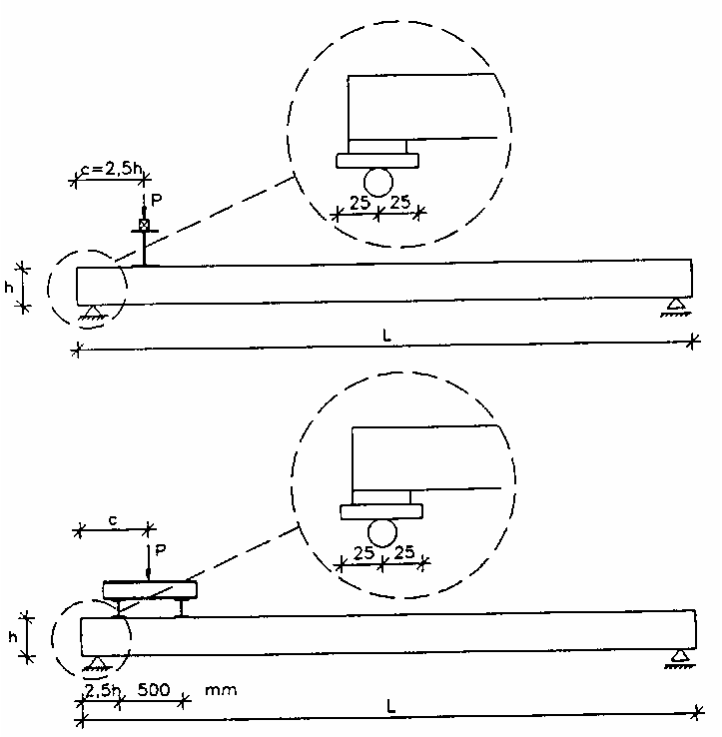


Figura 22 – arranjos de apoios para ensaios de elementos de laje alveolares Fonte: FIB (CEB-FIP, 1992)

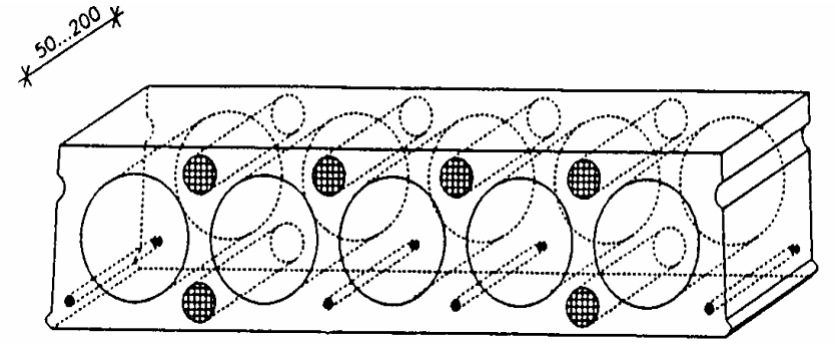


Figura 23 – Dimensão da amostra para extração dos corpos de prova e localização dos pontos de extração. Fonte: FIB (CEB-FIP, 1992)

Em relação aos materiais e sua caracterização foram utilizadas as normas da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Para que seja possível certificar a qualidade dos produtos é necessário que se realizem ensaios padronizados regularmente, a cada lote pré-determinado, sendo recomendados que se façam pelo menos 3 ensaios destrutivos por lote e os ensaios dos materiais conforme descrito nas normas correspondentes a cada um.

Entre os ensaios de caracterização, são mais comuns para o concreto: o de Resistência à Compressão e o de Resistência à Tração por Compressão Diametral do corpo-de-prova.

A norma brasileira para estruturas de concreto pré-moldado, NBR 9062, foi recentemente revisada, tendo como principais aspectos: adequação à NBR 6118.

Em relação aos ELACPs, houve a publicação da norma NBR 14861, em 2002, porém, nessa norma não são estabelecidos ensaios ou critérios de verificação da qualidade para ELACPs, como também não são definidos modelos de dimensionamento desses elementos, os quais possuem diversas particularidades em relação aos demais elementos de concreto, convencional ou pré-fabricado.

A fim de definir-se um procedimento de ensaio padronizado para análise do cisalhamento em ELACPs, partiu-se de um procedimento descrito em FIB (CEB-FIP, 1992) e repetido na EN 1168/05.

Buscou-se estabelecer requisitos mínimos de aceitabilidade em relação ao controle de qualidade para as lajes alveolares de concreto protendido, possibilitando estudos futuros e desenvolvimento tecnológico. Assim, verificam-se não só os requisitos mínimos de resistência de um elemento estrutural, como também, questões como falhas no processo produtivo conferindo maior segurança ao consumidor final e futuros usuários.

Após o levantamento bibliográfico sobre o assunto realizou-se ensaios pilotos para avaliar os procedimentos descritos. Finalmente, para avaliar a aplicabilidade dos

procedimentos definidos, foram realizados ensaios de cisalhamento com cinco grupos de lajes.

O primeiro grupo se constituiu de elementos de laje sem capa de concreto, o segundo com capa armada, o terceiro com capa em concreto reforçado com fibras metálicas, o quarto com preenchimento de 2 alvéolos e o quinto com o preenchimento de 4 alvéolos. Tais ensaios seguiram as recomendações contidas no FIB-1992 e da EN 1168:2005.

3.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS EXPLORATÓRIOS

As atividades a seguir foram desenvolvidas pelo NETPRE – Núcleo de Estudos e Tecnologia de Pré-moldados de Concreto, da Universidade Federal de São Carlos, através de convênio com a ABCIC – Associação Brasileira da Indústria da Construção Industrializada de Concreto, através da empresa CASSOL – Pré-fabricados, em Curitiba - PR, onde foram realizados os experimentos.

A capacidade de produção de ELACPs na empresa, onde foi implantado o pórtico de reação e elementos de instrumentação utilizados na pesquisa, é de 1.250 m^2/dia.

A definição dos objetivos iniciais foi desenvolvida em reuniões com participações de engenheiros representantes da empresa que deu o suporte material, ELACPS e equipamentos de ensaios e os pesquisadores.

Tais reuniões visaram possibilitar a definição de prazos, quantidade de peças a serem ensaiadas e demais detalhes técnicos entre as partes, visando não obstruir os trabalhos executados pela empresa e não haver atrasos na pesquisa.

Definido o cronograma da pesquisa iniciou-se o trabalho de implantação do sistema de pórtico, instrumentação e definição dos procedimentos de ensaios.

A idéia inicial foi criar uma rotina simples e de fácil execução por parte dos fabricantes desses elementos, de forma a possibilitar o controle de seu processo produtivo, da

mesma forma como já é realizado em relação ao concreto.

As rotinas trataram das medições, alinhamentos, definição dos equipamentos mais adequados para a aquisição dos dados, nivelamentos e os demais procedimentos necessários, antes e durante a execução de cada ensaio, sendo distribuído em 2 fases exploratórias.

Os procedimentos descritos a seguir tiveram como objetivo diagnosticar e determinar as melhores alternativas para realizar os ensaios propriamente ditos, adotando, tanto quanto possível, as recomendações da FIB (CEB-FIP, 1992).

Foram realizados ensaios pilotos para verificar os seguintes requisitos:

- Verificação da eficiência dos apoios;
- Nivelamento dos apoios;
- Comportamento do elemento sobre os diversos materiais de regularização dos apoios extremos;
- Nivelamento da viga de transferência transversal;
- Eficiência dos materiais de regularização do apoio da viga transversal;
- Sistemas de carregamento e medição;
- Sistemas de controle de taxa de carregamento;
- Sistema de aquisição de dados.

3.1.1 Primeira Etapa

Nessa fase foram identificados os procedimentos gerais da empresa, levantando os processos aplicados na fabricação e no controle de qualidade dos ELACPs. Para isso, percorreu-se toda a fábrica visitando-se os setores administrativos e laboratórios e, em seguida, a linha de produção.

Na linha de produção, primeiramente foi acompanhada a protensão e concretagem de uma pista de 200 m de ELACP (h = 20cm) para identificação de possíveis parâmetros de

fabricação que pudessem interferir no estudo a ser desenvolvido ou nos resultados dos ensaios a serem realizados.

Após analisar possíveis interferências referentes ao processo produtivos dos ELACPs, o trabalho foi iniciado, sendo desenvolvido um sistema de apoio rotulado de acordo com o descrito no manual FIB (CEB-FIP, 1992), conforme consta no ANEXO II.

Em relação ao sistema de apoio das extremidades desenvolveu-se inicialmente um sistema composto por uma barra circular Ø 10,0 mm posicionada entre duas barras de seção retangular medindo 15 mm x 50 mm, ambas com friso circular. Com será visto posteriormente, esse sistema foi substituído por outro mais eficiente.

Foi observada a necessidade de um mecanismo que garantisse a aplicação de carga a uma taxa constante, pois esta deveria estar abaixo de 50 kN/min, conforme o manual FIB.

Optou-se, inicialmente, por um sistema eletromecânico automatizado, contudo, pela variação ocorrida no sistema, decidiu-se fazer este controle manualmente, com uso de cronômetro e indicador digital do carregamento. Isso garantiu uma aplicação de carga a taxa de 40 kN/min.

Após a realização de três ensaios pilotos notou-se que o mecanismo de apoio rotulado desenvolvido não era eficiente, devido à imperfeições no sulco das barras, o qual foi feito de forma inapropriada.

Devido ao problema com o apoio obtinha-se um desnível transversal no mesmo, de forma que apenas um lado da seção ficava em contato com o apoio, ocorrendo uma ruptura indesejada, como se vê na Figura 24 e carga de ruptura abaixo da real.

As diferenças entre os apoios eram agravadas pelo desnível existente entre os trilhos do pórtico, onde se apoiavam as vigas de sustentação desses mesmos apoios, além de imperfeições geométricas, de pequena escala, nos elementos de laje.

Figura 24 - Ruptura indesejada devido a desnível transversal na rótula.
Fonte: FERNANDES e MONTEDOR (2006)

Procurou-se, então, encontrar uma posição nos trilhos onde não ocorresse esse desnível, tanto na transversal quanto na longitudinal. Para se obter precisão na checagem dos níveis utilizou-se um nível de mangueira.

A quarta tentativa para resolver este problema foi ensaiar uma peça ao cisalhamento, substituindo as rótulas por uma tira de elastômero (dureza *shore* 60) de 50 mm de largura e 10 mm de altura, apoiado direto sobre as vigas de apoio. Como não houve a acomodação desejada, entre a laje e o apoio, adotou-se outra alternativa.

Foram colocadas 2 tiras paralelas de elastômero (dureza shore 50) de 40mm de largura por 15 mm de espessura sobre os apoios e duas tiras de mesmas características posicionas sob a viga de transferência de carga.

No terceiro ensaio piloto optou-se também por aplicar uma faixa de argamassa de 10 mm de espessura na região de apoio da viga de transferência utilizando o sistema de apoio sem rótula para facilitar a execução do ensaio.

Outro procedimento de acompanhamento foi a utilização de um sistema de registro de dados via filmagem, tentando-se gravar o mostrador do deslocamento do atuador mecânico

(relógio comparador) e da célula de carga simultaneamente, na medida em que se aplicava o carregamento. Contudo, não se obteve êxito com esta tentativa, devido à dificuldade de leitura por problemas de qualidade da imagem gerada e da dificuldade de preparação dos anteparos necessários.

Com o inssucesso dos resultados iniciais foram adotadas outras medidas e providências para a continuidade dos experimentos. Entre elas, foi adquirido um sistema de aquisição de dados que fosse suficientemente preciso para realizar a leitura do carregamento e dos deslocamentos, simultaneamente.

Nesta primeira etapa realizaram-se, portanto, 3 ensaios pilotos para estudo e definição dos procedimentos do ensaio de apoio padrão com base nas prescrições da FIB (CEB-FIP, 1992).

3.1.2 Segunda Etapa

Após as análises dos resultados obtidos, reiniciaram-se os trabalhos de campo, realizando-se as verificações das alterações propostas para o sistema na primeira etapa e executando-se um terceiro ensaio piloto para teste do novo sistema de carregamento e aquisição de dados instalados.

Os testes no sistema de *data logger* e transferência de dados foram satisfeitos e, a seguir, preparou-se o sistema e os equipamentos para a realização da bateria de ensaios dos elementos para verificar e validar os procedimentos definidos e descritos anteriormente.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 DESCRIÇÃO DOS MODELOS ENSAIADOS

Os ensaios padrão de apoio estão baseados nas recomendações contidas no FIB (CEB-FIP, 1992) e na EN 1168:2005, assim como os modelos teóricos de cálculo.

Em relação aos materiais e sua caracterização foram utilizadas as normas da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Para que seja possível certificar a qualidade dos produtos é necessário que se realizem ensaios padronizados regularmente, a cada lote pré-determinado. Desta forma verifica-se a qualidade final do produto e, indiretamente, torna-se possível a identificação de alterações nos parâmetros de fabricação ou das matérias-primas empregadas, como a resistência do concreto, a aderência do aço, variações devidas à cura e imperfeições de execução do equipamento.

Para se garantir a qualidade dos ELACPs produzidos, ensaios das peças em tamanho real oferecem maior confiabilidade e segurança ao produto entregue ao mercado consumidor.

Os ensaios-pilotos não foram computados para efeito de análise do carregamento e deformação, uma vez que aqueles se destinavam à ajustes do sistema e dos procedimentos de ensaio e determinação dos procedimentos definitivos aqui descritos.

Os elementos de laje alveolar de concreto protendido (ELACPs) podem se apresentar com, ou sem, capa de concreto e com, ou sem, o preenchimento de alvéolos.

Os ensaios tiveram por objetivo determinar não somente a resistência ao cisalhamento, mas também para obter, com maior certeza, resultados satisfatórios em relação a alguns parâmetros relacionados a capacidade resistente da peça para cargas aplicadas próximas a região de apoio (30 a 70 cm do apoio), que pudessem auxiliar equipes de projeto no desenvolvimento de novos elementos, bem como para aferir a qualidade dos elementos em produção.

Como padrão recomendado pela FIB, adota-se a distância de aplicação de carga igual a 2,5.h_{elacp}. Com isso, o processo ruptura/fissuração pode ocorrer de duas maneiras:

- Por cisalhamento do concreto próximo às nervuras ou flanges;
- Pela perda de ancoragem dos cabos (perda de aderência mecânica da interface), causando ruptura por flexão;
- Pelas duas ações combinadas, podendo iniciar-se por cisalhamento ou flexão, conforme a situação mais crítica entre as duas acima.

A execução periódica desses ensaios, combinados com os ensaios dos materiais utilizados na fabricação dos ELACPs servem como ferramenta indispensável no controle de qualidade dos mesmos, assegurando que seu desempenho esteja adequado às situações para as quais o elemento foi produzido.

4.1.1 Amostragem Segundo a FIB e a EN 1168:2005

O número de amostras a serem ensaiadas, visando a certificação da qualidade, deve ser de 1 peça de cada modelo a cada 3 a 6 meses ou 25000 m^2 a 50000m^2.

Recomenda-se uma amostragem de uma peça a cada 40000m^2 ou 4 meses de produção. Caso o fabricante não possua controle rigoroso dos agregados nem de granulometria. esse período deverá ser no máximo a cada 3 meses, para garantir que eventuais variações da qualidade e pureza dos agregados não comprometam o desempenho final dos ELACPs.

No caso de estudos específicos para desenvolvimento de produto recomenda-se uma amostragem de pelo menos 3 peças, sendo ideal um conjunto de 5 peças para que haja boa representatividade dos resultados obtidos.

Em casos de mudança das características da peça ou materiais utilizados na fabricação, recomenda-se a execução de ensaios em conjuntos amostrais de 5 peças ou mais.

Podendo ser incluídos nos ensaios excedentes grupos de ensaios não destrutivos.

O comportamento dessas lajes pode ser melhor compreendido através de séries de ensaios. Para isso foram realizados ensaios padrão de apoio com 5 grupos de lajes para cada tipologia de ensaio, sem preenchimento de alvéolos, e com 6 grupos para os ELACPs preenchidos com alvéolos, sendo estes:

- Lajes sem capeamento de concreto - 5 peças;
- Lajes com capeamento de concreto e tela - 5 peças;
- Lajes com capeamento de concreto reforçado com fibras de aço - 5 peças;
- Lajes sem capeamento, com preenchimento de 2 alvéolos – 6 peças ;
- Lajes sem capeamento, com preenchimento de 4 alvéolos – 6 peças.

Inicialmente realizaram-se os ensaios de apoio padrão em ELACPs (previamente denominado ensaio de cisalhamento) em duas lajes sem capa. Na seqüência, foram realizados ensaios de apoio padrão em três peças sem capa e em cinco peças com capa e tela de aço. totalizando 10 ensaios nessa etapa.

Os ensaios da terceira etapa tiveram por objetivo as análises de:

- Preenchimento de alvéolos;
- Aplicação de fibras na capa de concreto;
- Variação da distância de aplicação da carga no ensaio de apoio padrão, isto é, utilizar-se o valor 2,5*h ou 2*h, sendo esse último utilizado nos elementos com capeamento.

A visita também teve por finalidade treinar os funcionários da empresa envolvida e avaliar se a descrição dos procedimentos era de fácil compreensão e aplicação. Para isso foram selecionados funcionários da empresa que foram instruídos e acompanhados durante todo o processo.

Nesta etapa foram realizados 17 ensaios padrão de apoio com diversas tipologias,

como será detalhado posteriormente. A execução de cada ensaio durou entre 30 a 60 minutos e foram realizados com o auxílio de 2 operários e 1 supervisor da própria indústria, ao quais manipularam os elementos com os guinchos e os outros equipamentos utilizados na fábrica para movimentar e posicionar as peças a serrem ensaiadas.No caso dos elementos com capa de concreto reforçado com fibras metálicas foram utilizadas fibras de 50 mm de comprimento, com quantidade especificada pelo fabricante do produto, isto é, dosagem de 30 kg de fibra por metro cúbico de concreto.

4.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS ELACPs

Foi desenvolvido um critério de análise e de aplicabilidade dos procedimentos definidos para os ensaios adrão de apoio, com a realização de ensaios em peças medindo 4000 mm x 1250 mm e espessura de 200 mm, conforme recomendações da FIB (CEB-FIP, 1992).

As principais dimensões da seção transversal dos ELACPs estão detalhadas na Figura 25. À esquerda está definida a geometria da nervura de borda lateral e metade do flange de borda do elemento. À direita, uma das nervuras intermediárias, com os 2 semicírculos correspondentes aos alvéolos intermediários. Também, nota-se o posicionamento dos cabos de protensão de borda e intermediário. Contudo, nenhuma das peças ensaiadas possuía cordoalhas em todas as nervuras, isto é, os elementos de laje são constituídos por 5 cordoalhas, ficando 2 nervuras sem protensão. Não foram avaliadas, neste trabalho, possíveis implicações decorrentes da falta de 2 cordoalhas, bem como efeitos decorrentes da protensão não simultânea dos cabos.

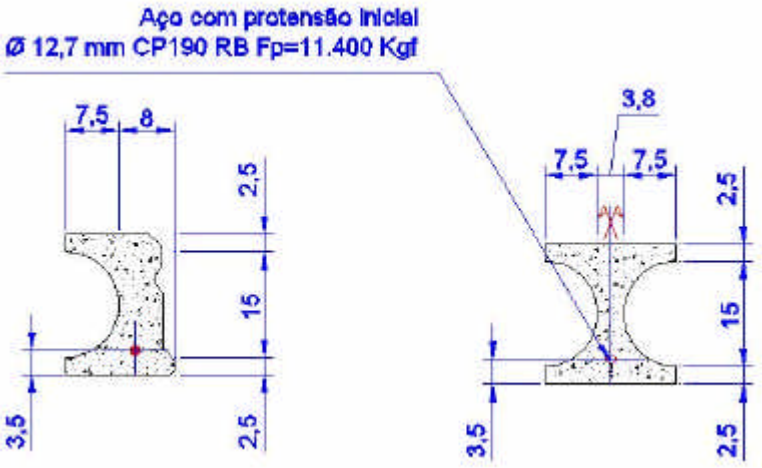
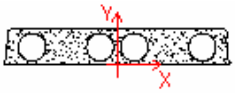
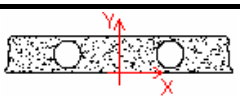


Figura 25 – Características geométricas principais dos ELACPs ensaiados - seções típicas

As características geométricas dos grupos de elementos de laje ensaiados estão apresentadas na Tabela 9, a seguir.

Tabela 7 - Características geométricas dos elementos de laje alve olares

ELACP L20 com largura de 124,5 cm					
Geometria do ELACP Altura e nº de alvéolos preenchidos	**$A_{c,\,calc}$ (cm^2)**	**Y_{cg} (cm)**	**Momento de Inércia I_x (cm^4)**	**Raio de giração eixo y (cm^2)**	**F_p (kN)***
L20	**1377.95**	**9.95**	**6,7x10^3**	**37.06**	**102,6**
L20/com capa 5cm e chavetas preenchidas**	**2059.24**	**13.83**	**13,8x10^3**	**37.64**	**102,6**
 L20/ 2 alvéolos	**1731.38**	**9.97**	**7,2x10^3**	**35.48**	**102,6**
 L20/ 4 alvéolos	**2084.81**	**9.98**	**7,7x10^3**	**36.09**	**102,6**
*** A força de protensão indicada resulta da multiplicação da força unitária, pelo número de cordoalhas e por 90%, parâmetro de eficiência de protensão.** **** Essa geometria é válida para capa de concreto simples ou reforçado com fibras.**					

4.3 PROCEDIMENTOS PRELIMINARES

A seguir estão descritos os procedimentos preliminares definidos e aplicados na pesquisa, conforme definidos, de forma a possibilitar a repetitividade dos mesmos e possibilitar a implantação de novos centros de controle e estudo para esse material.

4.3.1 Listagem do Material Utilizado

Para a execução do ensaio são necessários os seguintes equipamentos:

- Sistema de pórtico de reação adequado;
- Sistema de aplicação de carga que permita o controle da taxa de carregamento;
- Sistema de aquisição de dados com leitura simultânea de pelo menos 3 (três) canais a cada 5 segundos;
- Célula de carga com capacidade de 50 t e precisão de 0,01t;
- Transdutores de deslocamento com curso superior a 10 cm;
- Régua de alumínio de 2m de comprimento;
- Linha de nylon;
- Trena;
- Vassoura;
- Esquadro;
- Fio marcador de obra;
- Prumo de centro;
- Marcador industrial ou caneta para transparência;
- Nível de mangueira;
- Nível de mão com 50 cm ou mais;
- Prancheta;
- Lápis e borracha;

- Extrator de testemunhos;
- Relógio com cronômetro.

4.3.2 Esquema de Apoio e Aplicação de Carga

O esquema de suporte e carregamento foi formado por duas vigas longitudinais, metálicas, apoiadas sobre superfície nivelada e rígida (base de reação de concreto e fundação apropriada) e duas vigas transversais móveis, metálicas, que possuem internamente um sistema de nivelamento hidráulico.

Sobre cada viga de apoio transversal foi posicionada a barra de centralização do elemento de laje. Uma tira de acomodação de cloropreno ("neoprene") de dureza *shore* igual a 50 de 15mm de altura, 40 mm de largura e 1250 mm de comprimento foi posicionada no sulco da barra de centralização ou colada sobre a mesma. Esses dois modelos opcionais são apresentados no ANEXO I - Sistema de apoio inferior.

A distância entre apoios e a posição do carregamento é apresentada na Figura 26 e a distância efetiva é função da altura do ELACP (h_p).

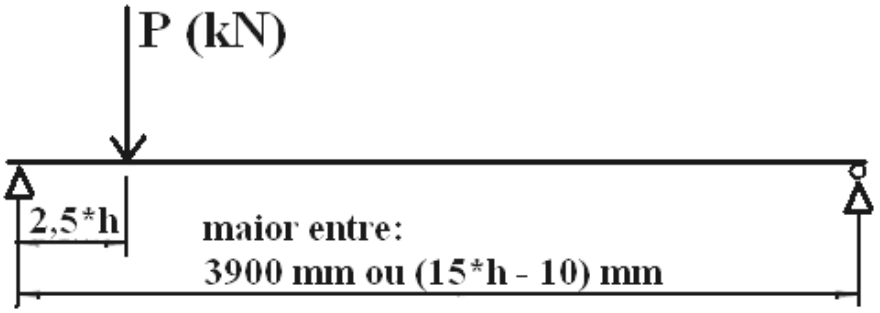


Figura 26 - Esquema de carregamento para o ensaio padrão de apoio

O apoio representado pelo triângulo com circulo indica o lado onde foi posicionado o

sistema de nivelamento formado por dois pistões hidráulicos interligados, formando um sistema de vasos comunicantes que garante a distribuição uniforme da carga no ELACP.

A carga ***P*** foi aplicada sobre a viga de transferência, constituída por um perfil "I" enrijecido (com pelo menos 5 flanges de enrijecimento transversal), com uma placa quadrada, soldada na mesa superior da peça, medindo 150 mm por 150 mm e 19 mm de espessura.

Sobre a placa foi posicionada a rótula, conforme detalhe no ANEXO II – Rótula de apoio sob célula de carga. A célula de carga foi alinhada verticalmente, por meio do prumo de centro, ficando posicionada entre a rótula e o pistão de aplicação de carga.

O comprimento da peça ensaiada foi o maior valor entre 4000 mm e 15*$h_{pelacp,}$, em milímetros. O elemento de laje foi posicionado sobre as bases, ficando o centro de apoio e rotação situado a 50 mm da face do elemento, em ambas as extremidades da peça, resultando num vão máximo permissível líquido de 3900 mm ou 15*h_{pelacp} – 100 mm, prevalecendo a maior medida.

4.3.3 Preparação das Peças Para o Ensaio

Recomenda-se que a fabricação dos elementos de laje ocorra 10 (dez) dias antes dos ensaios (por este ser o tempo médio de aplicação das peças fabricadas) , sendo sua capa, caso exista, concretada 24 horas após o fim da cura da peça. Ao se concretar a capa nos elementos devem ser tomados os seguintes procedimentos preliminares:

- Limpeza da superfície com vassoura, para retirar poeira e resíduos;
- Saturar-se com água por uma hora;
- Iniciar a concretagem quando a superfície do elemento estiver sem acúmulo de água.

Nos ELACPs sem capa deverá ser executada faixa de argamassa de regularização de 250 mm de largura, por 1250 mm de extensão e 10 mm de espessura na posição de apoio da viga de transferência de carga. A posição do centro da faixa é mostrada na Figura 27, a seguir.

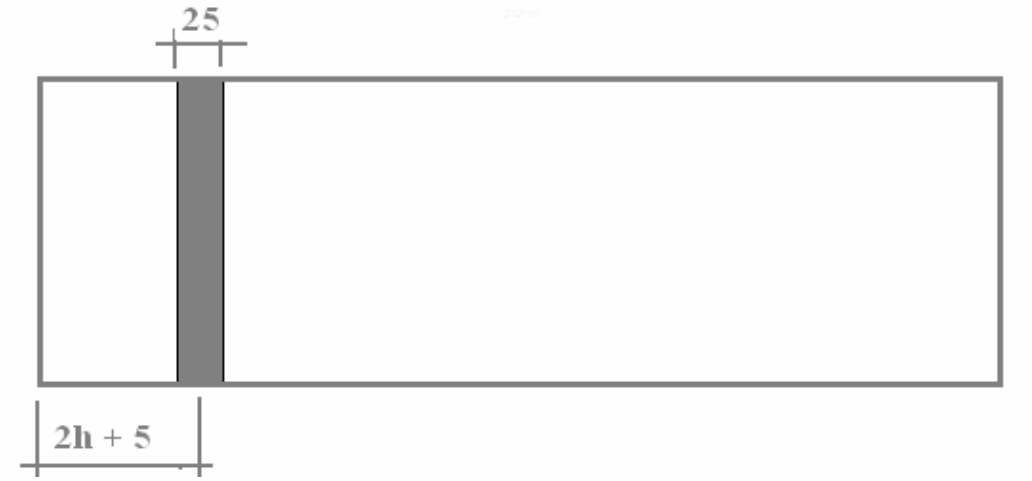


Figura 27 - Faixas de argamassa de regularização em ELACPs, h_{elacp} = 25 cm, sem capa

A Figura 28 mostra as medições realizadas para posterior marcação nos elementos a serem ensaiados.

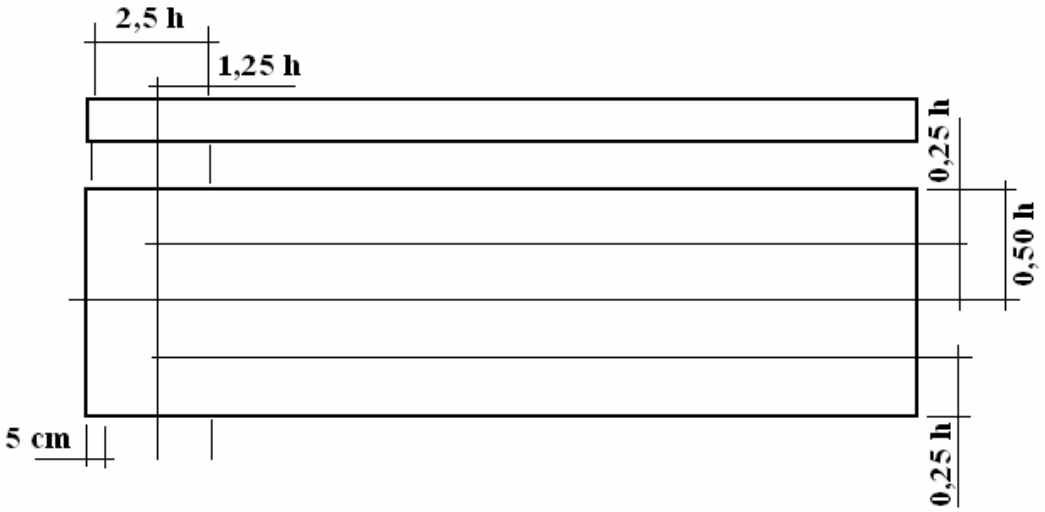


Figura 28 – Medidas para efetuar as marcações nas peças de ensaio

Após a concretagem da capa ou das faixas de regularização deve ser realizada as marcações na peça. Utilizando-se um lápis de carpinteiro, marcador industrial ou caneta para retroprojetor, esquadro e trena são tomadas as medidas e feitas as marcações.

Devem ser marcadas as 2 faces laterais do elemento, depois devem ser feitas as marcações na face inferior e superior com auxílio de fio marcador de obra, de acordo as dimensões da Figura 29 “a” e “b”. Essa marcação tem por objetivo facilitar a visualização e anotação das fissuras ocorridas no ensaio.

a – Medição conf. Figura 25

b – Marcação com esquadro

Figura 29 “a” e “b” – Medição e marcação com esquadro nas 2 faces da peça a ser ensaiada

4.3.4 Posicionamento, Nivelamento e Ajuste dos ELACPs

A seqüência de atividades descritas a seguir é fundamental para que as condições de ensaio propostas sejam atendidas:

1º) Posicionar o apoio fixo (o que não tem o sistema de compensação de nível) com o auxilio de um esquadro, de maneira que este fique perpendicular aos trilhos do pórtico de carregamento, usando as marcações de 4 m no trilho (Figura 30 “a” e “b”);

a – Posicionamento preliminar

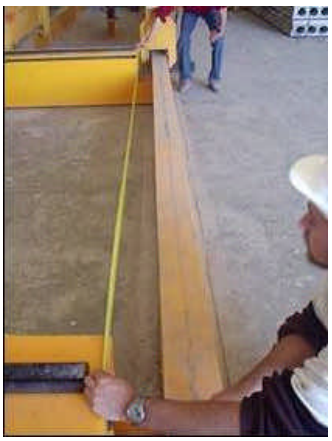
b – Verificação final com esquadro

Figura 30 - Posicionamento do apoio de reação

2º) Verificar o nivelamento transversal nesse apoio (desnível entre as extremidades da barra de centralização desse apoio). Este desnível deve ser medido inicialmente com nível de mão, conforme visto na Figura 31 e verificado com mangueira de nível sendo o desnível menor que 3 mm;

Figura 31 – Verificação de nível transversal do apoio

3º) Medir a distância entre apoios necessária, conforme o vão do elemento a ser ensaiado. Deve-se tomar como referência os centros das extremidades das barras de centralização de cada um dos apoios de reação, conforme Figura 32 “a” e “b”;



a – Aferição do lado esquerdo

b – Aferição lado direito

Figura 32 “a” e “b” – Medida da distância entre apoios pelo lado esquerdo e direito

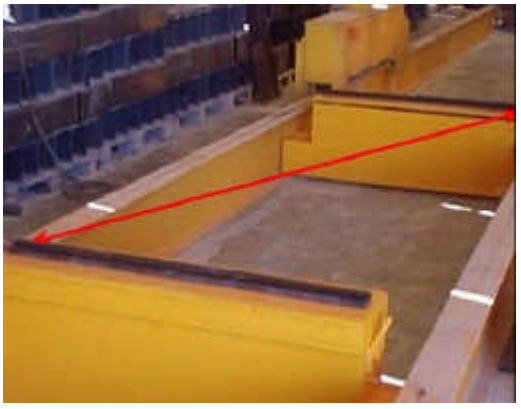
4º) Deve ser verificado o nivelamento longitudinal entre as extremidades das barras de centralização dos dois apoios com uso de mangueira de nível. O desnível deve ser inferior a 5 mm. É fundamental que o sistema de ajuste do apoio esteja nivelado antes da conferencia desse nivelamento. Caso o desnível seja maior que o indicado deve-se corrigi-lo retirando (ou adicionando) óleo no sistema de pistões ou com outro sistema de

ajuste similar, conforme mostrado pela Figura 33;

Figura 33 – Verificação do nivelamento longitudinal com nível de mangueira

5º) Realizar a verificação final de ortogonalidade com uso de linha de nylon indeformável. Uma medida cruzada entre as extremidades das barras de centralização deve ser feita de forma que as duas diagonais tenham as mesmas distâncias.

O ajuste deve ser feito com auxilio de alavanca, caso ocorra diferenças maiores que 0,5 cm deve se reiniciar o processo de posicionamento de apoios, como mostrado pela Figura 34 “a” e “b”;



a – Verificação da ortogonalidade

b – Ajuste final da ortogonalidade

Figura 34 “a” e “b” – Verificação das diagonais nas duas direções

6º) Posicionar as barras de centralização sobre os apoios metálicos. A centralização transversal dessa barra deve ser feita posicionando-se o pistão de carregamento sobre o apoio, Figura 35 “a”. Com o auxílio de um prumo de centro deve-se alinhar o centro do

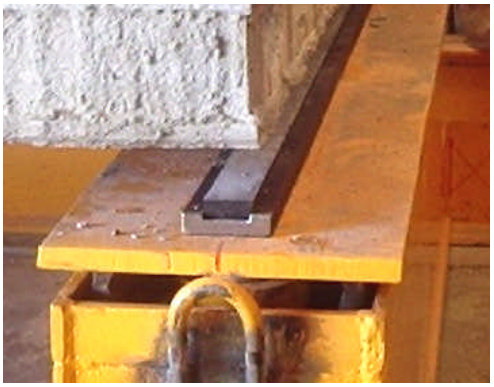
pistão com o centro da barra nos dois apoios, como na Figura 35 “b”;

a – Posição do pistão

b – Verificação exata do centro

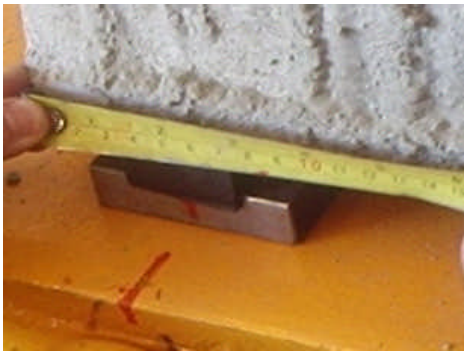
Figura 35 “a” e “b” - Posicionamento da barra de centralização da peça

7º) verificar o encaixe das tiras de cloropreno na barra e posicionar o ELACP deixando uma folga de 50 mm (± 5 mm) do eixo da tira à extremidade da laje, como mostrado na Figura 36 “a”, “b” e “c”, aferindo ao terminar o posicionamento;



a – Alinhamento final sobre o apoio

b – Elemento alinhado e nivelado



c – Verificação final do posicionamento

Figura 36 “a”, “b” e “c”– Configuração final do elemento sobre o sistema de reação

8º) Varrer e lavar a face superior do painel;

9º) Posicionar a viga de transferência (eixo) de carga sobre a laje a uma distância de 2,5.h do eixo da barra de centralização. Deve-se realizar a medição nas duas faces laterais após o posicionamento do ELACP. Duas tiras de cloropreno de 15 mm x 40 mm x 1250 mm devem ser posicionadas sob a viga faceando as laterais da mesa do perfil "I", entre a viga e a argamassa de regularização (ou capa), conforme mostra a Figura 37;

Figura 37 – Colocação e alinhamento da viga de distribuição transversal do carregamento

10º) Alinhar o pistão de aplicação de carga com o eixo da viga de transferência e posicionar a rótula sobre a placa de distribuição da viga de transferência, como mostrado na Figura 38 "a" e "b";

a – posicionamento da viga de transferência

b – posicionamento da rótula

Figura 38 "a" e "b" - Posicionamento do pórtico em relação a viga de transferência

11º) Posicionar a célula de carga sobre a rótula e abaixar o pistão de carregamento garantindo que a centralização feita esteja correta;

12º) Em seguida, devem ser posicionados os transdutores no eixo da viga de transferência, um de cada lado da célula de carga mantendo uma distância aproximada de 30 cm, como mostra a Figura 39 "a" e "b". Esta distância, bem como o número do canal do *data logger* utilizado devem ser anotados na folha de campo;

a – Detalhe do transdutor esquerdo b – Visão geral da célula e dos transdutores

Figura **39** "a" e "b" - Posicionamento dos transdutores

13º) Devem ser conectados ao *"data logger"* os dois transdutores de deslocamento e a célula de carga e ligado o *"display"*. Devem ser verificadas as leituras para os 3 canais antes do início do ensaio. Durante o ensaio manter o *"display"* no canal da célula de carga para que se possa controlar a taxa de aplicação de carga, conforme mostra a Figura 40;

Figura 40 – Sistema de aquisição de dados

14º) A taxa de carregamento do ensaio deverá ser de 40 KN/min (4tf/min). Se controlada manualmente deverá ser feita com auxílio de um cronômetro e treinamento prévio do operador do macaco hidráulico. Recomenda-se o uso de sistema automatizado de controle da taxa de aplicação de carga;

15º) Antes do início do ensaio deve ser preenchida a folha de campo (ANEXO III) e anotados os horários de início e final do ensaio (armazenamento de dados). Observações adicionais sobre as peças e sobre o andamento do ensaio também devem constar nessas folhas;

16º) O momento de cessar a aplicação da carga e encerrar o ensaio se dá quando verificado que não ocorre ganho de carga mesmo com o macaco hidráulico sendo acionado;

17º) O armazenamento dos dados deve ser realizado em intervalos de no máximo 5 segundos, registrando-se as três medidas simultaneamente. Após o término do ensaio os resultados devem ser transferidos para o computador que contenha o software especifico do sistema de aquisição de dados. Com os dados armazenados procede-se o tratamento Vários berços de nivelamento podem ser usados. Os mais comuns são os de madeira, cloropreno (neoprene) ou polipropileno de alta densidade (HDPP).

Após os procedimentos descritos até aqui, é necessário posicionar o berço de nivelamento transversal, onde será apoiada a viga de distribuição de carga transversal.

Para promover a acomodação correta do atuador, recomenda-se utilizar uma viga metálica com 150 mm a 200 mm de altura, montada na transversal do elemento. A viga deve ser apoiada sobre uma base niveladora de argamassa, gesso, plástico, madeira ou neoprene, com espessura de 10 mm, largura igual a da mesa da viga e comprimento igual à largura do elemento ensaiado. A Figura 40, “a” e “b”, a seguir, mostra um exemplo essa configuração.

a - Base niveladora de madeira posicionada no eixo de aplicação da carga

b - Viga de distribuição centralizada com o eixo de aplicação do carregamento

Figura 41 “a” e “b” – Posicionamento da base niveladora e da viga de distribuição transversal do carregamento sobre o elemento de laje

Finalizada essa etapa, devem ser instalados os equipamentos de carregamento e medição, bem como posicionado o pórtico junto ao ponto de aplicação da carga.

O correto posicionamento do elemento de laje sobre a base, bem como a marcação correta do ponto de aplicação da carga e a colocação da viga de distribuição transversal, é fundamental para que os resultados sejam satisfatórios, pois qualquer desvio pode resultar em ações secundárias. Como os elementos possuem um comprimento bastante reduzido desde os apoios até o ponto de aplicação da carga, todas as verificações preliminares devem ser refeitas antes do ensaio propriamente dito.

Excentricidades transversais do atuador também devem ser verificadas para que o espalhamento da tensão ocorra de forma simétrica no sentido transversal do elemento de laje ensaiado.

A Figura 41 “a”, “b”, “c” e “d” apresenta a montagem dos dispositivos de aplicação e monitoramento da carga aplicada, respectivamente, bem como seus ajustes prévios, que deverão ser feitos após o posicionamento final do elemento de laje a ser ensaiado. Esse procedimento deve ser repetido para cada elemento ensaiado.

a – Posicionamento da rótula triaxial

b – Fixação da célula de carga

c – Célula de carga e transdutor posicionados e fixados

d – vista geral do conjunto pronto para ser ensaiado

Figura 42 “a”, “b”, “c” e “d” – Seqüência de posicionamento da célula de carga, do atuador, do transdutor e visão geral do conjunto pronto

4.3.5 Forma de Documentação dos Ensaios

Os resultados devem ser apresentados em 3 folhas - duas folhas de campo e um gráfico de carga versus deslocamento - de acordo com o exemplo apresentado no ANEXO III.

Através do gráfico deve ser determinada a reação máxima no apoio ($P_{a,max}$), a qual é indicada no gráfico impresso.

A folha dos ensaios de compressão realizados com os testemunhos extraídos no dia do ensaio deve ser anexada às demais. Caso o conjunto de ensaio dos testemunhos seja formado por mais de uma peça, devem-se anotar os valores manualmente no gráfico. Outros elementos

auxiliares podem ser adicionados aos gráficos, para facilitar a compreensão dos mesmos e para documentar visualmente os ensaios, como desenhos e fotos antes, durante e após os ensaios.

4.4 ENSAIOS DE CISALHAMENTO

Para estabelecer critérios de aceitação, os ensaios devem resultar sempre iguais ou superiores ao que prescrevem as normas. Para isso, antes da apresentação dos ensaios foi realizado o cálculo pelos modelos constantes na NBR 6118 (2004) a qual se baseia na EN 1168, revisada em 2005.

4.4.1 Modelo Teórico de Cálculo

Hoje, no Brasil, a análise da resistência dos elementos de lajes alveolares próximo ao apoio é feita através da NBR 6118, que se baseia nas normas européias. Caso o esforço cortante atuante seja maior que o máximo calculado, a norma prescreve o 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.

O ganho da resistência ao cisalhamento ao preencher os alvéolos é considerado proporcional à área do concreto, desconsiderando a possibilidade de escorregamento da armadura ou falha na interface entre concreto do alvéolo e do elemento de laje. Esse aspecto foi analisado através dos ensaios com preenchimento de 2 e 4 alvéolos com graute, sem adição de armadura nos mesmos.

Para a análise dos resultados experimentais, foram calculados os valores teóricos da resistência ao cisalhamento sem considerar os coeficientes de segurança previstos pela NBR 6118, assim como na EN 1168:2005. Nas datas de ensaios, considerou-se uma perda de protensão de 10%.

De acordo com a norma brasileira, a resistência ao cisalhamento de projeto é dada pela Equação 1:

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

A resistência de ruptura média nos ensaios $V_{rup,méd}$ deve ser superior à resistência última de cálculo V_{Ru}, calculada pela Equação 1 sem os coeficientes de minoração dos materiais, conforme a Equação 2:

$$V_{rup,med} \geq V_{Ru} \qquad \text{Eq. (2)}$$

O cisalhamento máximo de serviço $V_{máx}$, na região do apoio da laje alveolar, foi aqui considerado pela relação dada na Equação 3:

$$V_{máx} \leq V_{Rd} / 1{,}4 \qquad \text{Eq. (3)}$$

As Tabelas 7 e 8, a seguir, comparam os resultados dos modelos teóricos descritos acima, com os ensaios realizados com as 4 tipologias de elementos de laje alveolar. Ao mesmo tempo, são comparados os resultados teóricos para o valor do f_{ctm} de cálculo e o valor obtido pelos ensaios de compressão diametral dos corpos-de-prova e testemunhos.

A Tabela 7 mostra os valores dos elementos de laje sem capa, com capa e tela e com capa e fibras metálicas.

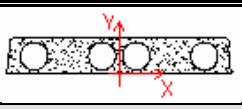
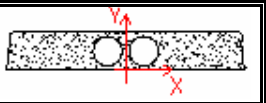
Tabela 8 - Características comparadas dos elementos de laje alveolar

	Laje sem Capa		Laje com capa+Tela		Laje com Capa+Fibras	
f_{cj}(Laje a 10dias) (MPa)	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
f_{cj}(capa a 10dias) (MPa)	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
f_{ctm} (MPa)	3,51[1]	4,00 [2]	3,51[1]	4,00 [2]	3,51[1]	4,00 [2]
$f_{ctk,inf}$ (MPa)	2,46	2,80	2,46	2,80	2,46	2,80
f_{ctd} (MPa)	1,76	2,00	1,76	2,00	1,76	2,00
t_R (MPa)	0,614	0,700	0,614	0,700	0,614	0,700
t_{Rd} (MPa)	0,439	0,500	0,614	0,500	0,614	0,500
A_s (mm²)	500	500	500	500	500	500
b_w (mm)	320	320	320	320	320	320
d (mm)	165	165	215	215	215	215
? adimensional?	0,0095	0,0095	0,0074	0,0074	0,0074	0,0074
F_p (kN/cabo)	102,6	102,6	102,6	102,6	102,6	102,6
N_{sd} (kN/peça)	513	513	513	513	513	513
$A_{c,\ calc}$ (mm²)	137795	137795	200295	200295	200295	200295
s_{cp} (MPa)	3,723	3,723	2,561	2,561	2,561	2,561
k (adimensional)	1,435	1,435	1,435	1,385	1,385	1,385
V_{Ru} (kN/peça)	102,93	121,00	119,52	132,57	113,65	125,86
V_{Rd} (kN/peça)	81,95	96,32	92,92	102,25	88,73	96,32
V_{max} (kN/peça)	58,54	68,8	66,37	73,04	63,68	68,80

1- f_{ctm} teórico de cálculo; 2- f_{ctm} valor médio dos CPs nos ensaios de tração por compressão diametral do concreto nas datas de ensaio.

A Tabela 8 apresenta os resultados para os elementos sem capa preenchidos com 2 e 4 alvéolos.

Tabela 9 – Propriedades características dos elementos de laje alveolar com preenchimento de 2 e 4 alvéolos

				
	Sem capa e 2 alvéolos preenchidos		**Sem capa e 4 alvéolos preenchidos**	
f_{cj}(Laje a 10dias) (MPa)	**40,0**	**40,0**	**40,0**	**40,0**
f_{cj}(capa a 10dias) (MPa)	**40,0**	**40,0**	**40,0**	**40,0**
f_{ctm} (MPa)	**3,51**[1]	**4,00** [2]	**3,51**[1]	**4,00** [2]
$f_{ctk,inf}$ (MPa)	**2,46**	**2,80**	**2,46**	**2,80**
f_{ctd} (MPa)	**2,46**	**2,80**	**2,46**	**2,80**
t_R (MPa)	**0,614**	**0,700**	**0,614**	**0,700**
t_{Rd} (MPa)	**0,439**	**0,500**	**0,439**	**0,500**
A_s (mm²)	**500**	**500**	**500**	**500**
b_w (mm)	**630**	**630**	**940**	**940**
d (mm)	**165**	**165**	**165**	**165**
? (adimensional)	**0,0048**	**0,0048**	**0,0033**	**0,0033**
F_p (kN/cabo)	**102,6**	**102,6**	**102,6**	**102,6**
N_{sd} (kN/peça)	**513**	**513**	**513**	**513**
$A_{c,\ calc}$ (mm²)	**173138**	**173138**	**208481**	**208481**
σ_{cp} (MPa)	**2,963**	**2,963**	**2,461**	**2,461**
k (adimensional)	**1,435**	**1,435**	**1,435**	**1,435**
V_{Ru} (kN/peça)	**173,74**	**191,62**	**238,87**	**264,33**
V_{Rd} (kN/peça)	**137,30**	**150,07**	**186,98**	**205,17**
V_{max} (kN/peça)	**98,07**	**107,19**	**133,56**	**146,55**

1- f_{ctm} teórico de cálculo; 2- f_{ctm} valor médio dos CPs nos ensaios de tração por compressão diametral do concreto nas datas de ensaio.

Onde:

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

$f_{ctd} = f_{ctk,inf}/\gamma_c$ – com o coeficiente de minoração de resistência, γ_c=1,0

$? = A_{s1} / b_w * d$

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

k = coeficiente com os seguintes valores:

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

- para os demais casos: $k \geq$ | ***1,6 – d*** | (não menor que 1), com ***d*** em metros.

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

b_w = largura mínima da seção ao longo da altura útil ***d*** (L_{LACP} – número de alvéolos x diâmetro dos alvéolos)

d = altura útil $(h_{lacp} - d')$

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

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

4.4.2 Composição dos Elementos Ensaiados

Conforme já descrito, no ensaio de cisalhamento os elementos foram divididos em 5 grupos. O primeiro grupo se constituiu de elementos de laje sem uso de capa de concreto. Nesse grupo foram ensaiados 5 elementos de laje, tendo sido anotados a data, a hora, a temperatura, a umidade no momento da fabricação e a resistência característica do concreto aplicado nas pistas. Também foram extraídos os respectivos testemunhos, conforme descrito anteriormente, para verificação da resistência na data de remoção das formas e liberação das pistas de protensão.

O segundo grupo se constituiu de 5 elementos de laje com capeamento de 50 mm de espessura e tela de aço, sem adição de fibras.

O terceiro grupo foi formado pelos elementos com capa em concreto reforçado com fibras.

O quarto grupo foi composto por 6 elementos de laje sem capa, preenchidos com 2

alvéolos. Finalmente, o último grupo foi formado por 6 ELACPs sem capa, preenchidos com 4 alvéolos, também com as mesmas características geométricas já descritas anteriormente.

A Tabela 10 resume a resistência característica do concreto à compressão e à tração, a resistência de protensão do aço utilizado, assim como o diâmetro nominal da cordoalha, a área nominal (conforme descrito na Tabela 4) e número de cordoalhas do mesmo.

Tabela 10 -Resistência do concreto e protensão do aço nas peças ensaiadas

Material	f_{cj}	f_{ctm}	*CP* aço	N° de cordoalhas	A_{sl} mm²	*f* cordoalhas
Concreto da laje	**40**	**4,0**	**190**	**5**	**507**	**12,5**
Concreto da capa	**40**	**4,0**	**190**	**5**	**507**	**12,5**
Concreto com fibra*	**40**	**4,5**	**190**	**5**	**507**	**12,5**
Preenchim. de 2 alvéolos	**40**	**4,0**	**190**	**5**	**507**	**12,5**
Preenchim. de 4 alvéolos	**40**	**4,0**	**190**	**5**	**507**	**12,5**
*** Capa de concreto reforçado com fibras de aço.**						

5 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os resultados obtidos com a série de ensaios está dividido por grupos. O resultado expresso aqui se constitui da média interna do total de ensaios realizados para cada tipologia.

Inicialmente serão apresentados os gráficos dos elementos de laje sem capa, com exemplo de um dos elementos ensaiados. Posteriormente, serão apresentados, respectivamente, os resultados dos elementos de laje com capa de concreto e tela, com capa de concreto e fibras metálicas e com alvéolos preenchidos, mas sem capa.

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos pelos ensaios realizados com os 5 ELACPs, com capa e sem capa, bem como com os 6 ELACPs sem capa e com os alvéolos preenchidos. Foi tomada a média interna do total de cada grupo, sendo descartados o maior e o menor resultado de ensaios, para diminuir o desvio-padrão da amostragem.

Tabela 11 – Média das resistências ao cisalhamento dos elementos de lajes ensaiados

Descrição	$V_{ru,\ méd}$ (kN)
Peças sem capa	**118,01**
Peças com capa	**160,21**
Peças com capa com fibras	**197,25**
Peças com preenchimento de 2 alvéolos	**166,15**
Peças com preenchimento de 4 alvéolos	**175,18**

Na seqüência são apresentados os gráficos com os resultados obtidos pelos ensaios, para os 5 grupos de lajes alveolares.

A Figura 42 mostra a reação nos apoios versus o deslocamento dos ensaios para lajes sem capa de concreto. A linha tracejada representa o valor médio, já calculado acima.

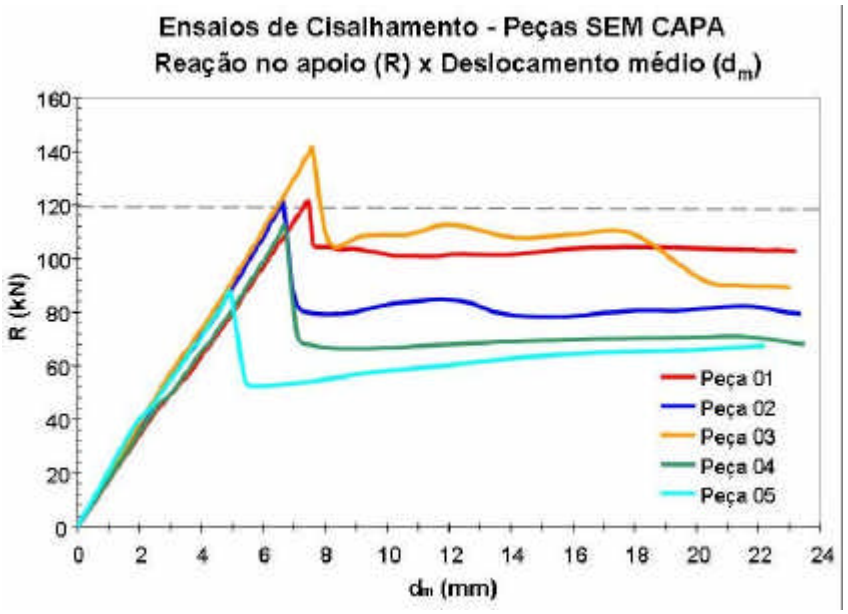
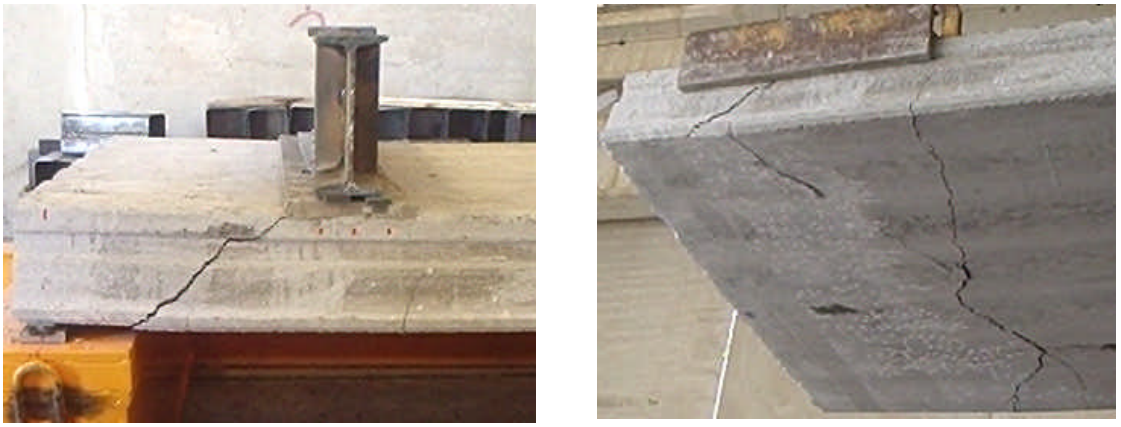


Figura 43 - Gráfico dos resultados dos ensaios para lajes sem capa, dado pela reação no apoio versus o deslocamento médio.

A Figura 44, “a” e “b”, apresenta a fissura ocorrida em um dos ELACPs ensaiados sem capa, em vista lateral e inferior.



a – Vista lateral b – Vista inferior

Figura 44 “a” e “b” – Exemplo da trajetória da fissura em ELACP sem capa

A Figura 45 apresenta a reação nos apoios versus o deslocamento dos ensaios com o grupo de lajes com capa de concreto de 5 cm de espessura, armadas com tela soldada.

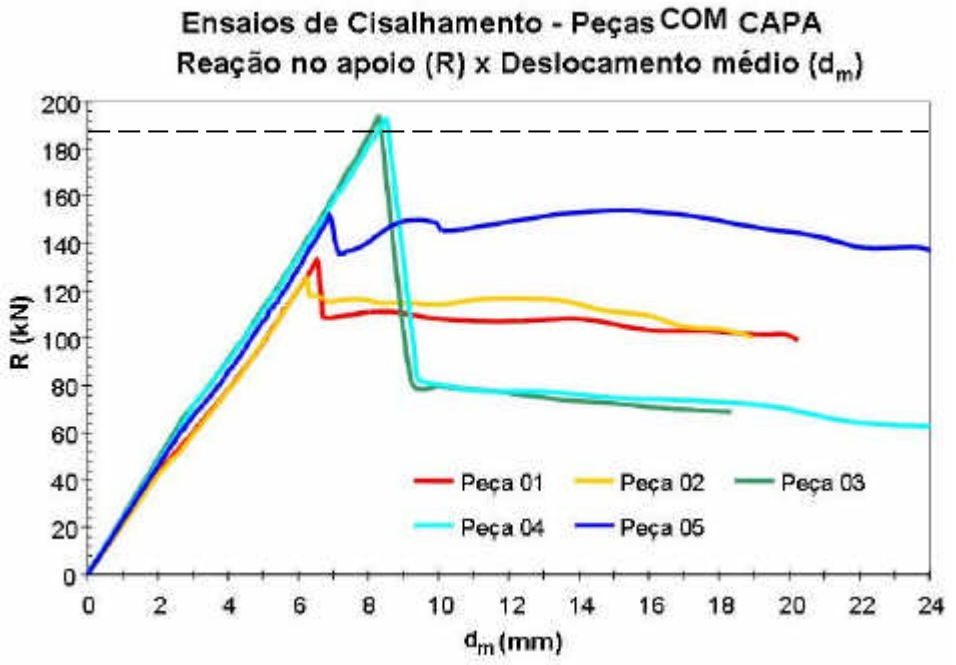


Figura 45 - Gráfico dos resultados dos ensaios para lajes com capa, dado pela reação no apoio versus o deslocamento médio.

A Figura 46 “a” e “b” apresenta uma vista lateral e inferior de um dos ELACPs com capa de concreto e tela ensaiados.

a - Vista lateral da fissura por cisalhamento b - Vista inferior da fissura por cisalhamento

Figura 46 “a” e “b” - Exemplo de fissura ocorrida em ensaio de cisalhamento de ELACPs

A Figura 47 mostra a reação nos apoios versus o deslocamento dos ensaios de cisalhamento para o grupo de lajes com capa de concreto reforçado com fibras de aço, em substituição à tela soldada.

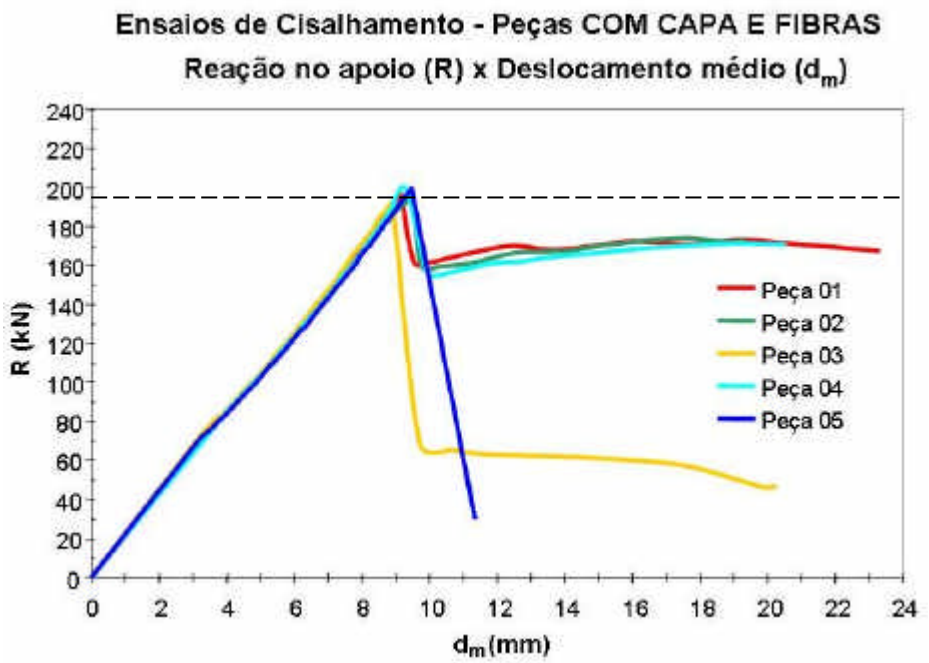


Figura 47 - Gráfico dos resultados dos ensaios para lajes com capa e fibras, dado pela reação no apoio versus o deslocamento médio.

A Figura 48 mostra a vista lateral e inferior de um dos ELACPs com capeamento de concreto reforçado com fibras ensaiado.

a – Vista lateral b – Vista inferior

Figura 48 “a” e “b” – exemplo de ruptura por cisalhamento em ELACPS com capeamento de concreto reforçado com fibra

A Figura 49 apresenta o gráfico de reação no apoio versus deslocamento, dos ensaios dos elementos sem capa, com 2 alvéolos preenchidos.

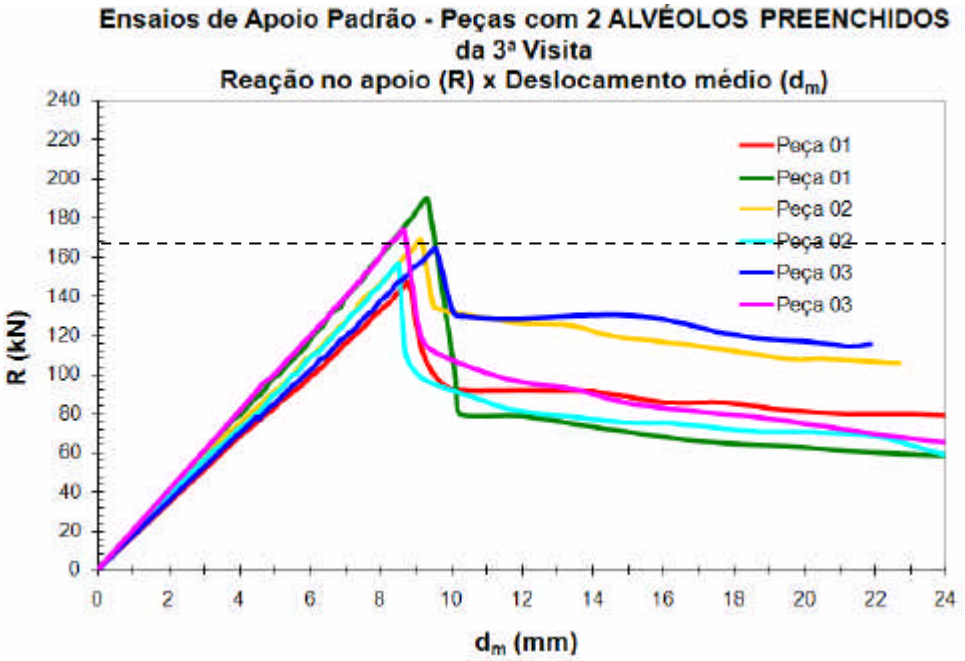


Figura 49 – resultados dos ensaios de cisalhamento em lajes com preenchimento de 2 alvéolos

A Figura 50 “a”, “b”, “c” e “d” mostra a seção transversal, as duas faces laterais com as aberturas de fissuras e a vista inferior, com o comportamento da fissura para um dos ELACPs preenchidos com 2 alvéolos. Pode ser notado na letra “d”, a abertura de fissura longitudinal no flange de um dos alvéolos centrais, conforme marcado.

a – Vista frontal com alvéolos preenchidos

b – Fissura ocorrida na lateral “A”

c – Fissura na lateral “B”

d – Comportamento da fissura transversal

Figura 50 “a”, “b”, “c” e “d” – Modelo de ruptura para um dos ELACPs preenchidos com 2 alvéolos

A Figura 51 mostra o gráfico de reação no apoio versus deslocamento, dos ensaios dos elementos sem capa, com 4 alvéolos preenchidos.

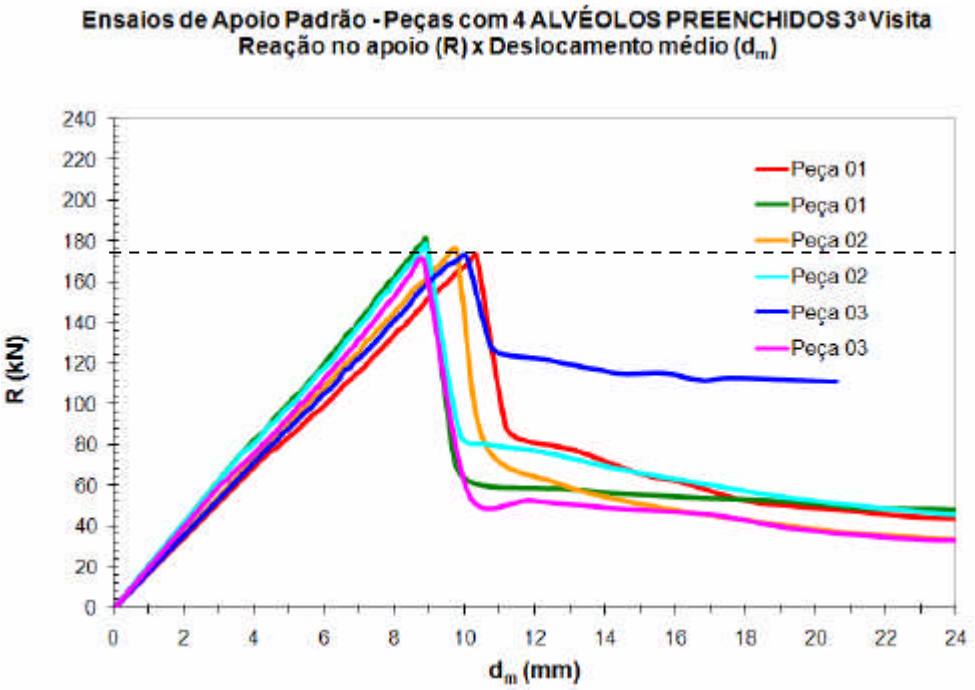


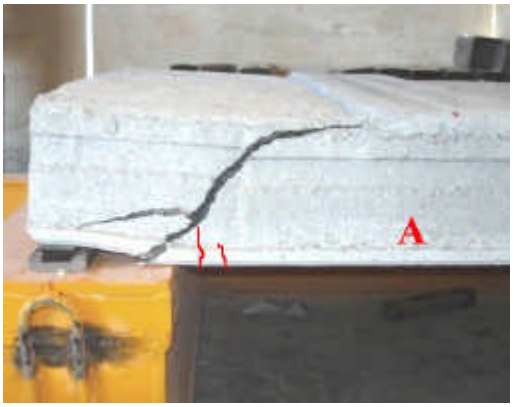
Figura 51 – resultados dos ensaios de cisalhamento em lajes preenchidas com 4 alvéolos

A Figura 52 “a” mostra o elemento sendo ensaiado com as letra “A” e “B” representando a face direita e esquerda, respectivamente, da posição em que o elemento se encontra na figura. A letra “d” mostra a fissura inicial, ocorrida na nervura dos alvéolos vazios onde se nota, também, próximo aos cabos de protensão, as fissuras diagonais indicando a perda de aderência. As letras “b” e ”c” mostram as fissuras laterais, conforme os lados.

a – ELACP com 4 alvéolos preenchidos

b – Inicio da fissuração nas nervuras

c – Fissura combinada na face B



d – Fissura de cisalhamento da face A

Figura 52 “a”, “b”, “c” e “d” – Emsaios em ELACPs com 4 alvéolos preenchidos

A Figura 53 apresenta a abertura de fissuras na face inferior do ELACP. Os traços em vermelho foram colocados para realçar fissuras que não estavam nítidas, mas importantes para mostrar a perda de aderência da protensão e a fissura longitudinal ocorrida num dos alvéolos vazios, por tração no concreto após a abertura de fissura da nervura interna.

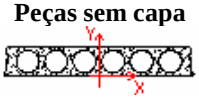
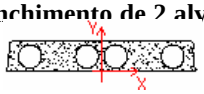
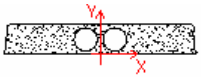
Figura 53 – Fissuras na parte inferior de um dos 6 ELACPs preenchidos com 4 alvéolos

A Tabela 12 apresenta a comparação entre os resultados de cálculo e os resultados obtidos pelos ensaios. O valor da resistência, de cálculo, do concreto à tração igual a 5, 309 MPa.

Foram realizados 5 ensaios por grupo, totalizando 15 ensaios para elementos sem preenchimento dos alvéolos. Com já descrito, a média interna de cada ensaio foi utilizada para manter os valores com menor desvio-padrão. No caso dos elementos preenchidos com alvéolos, foram ensaiadas 6 peças por tipologia.

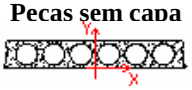
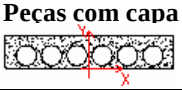
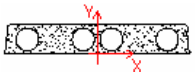
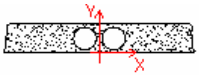
Os elementos com os alvéolos preenchidos está mostrado nas respectivas linhas pelos desenhos, conforme o número de alvéolos, isto é , 2 ou 4.

Tabela 12 - Comparativo entre valores teóricos de projeto e obtidos nos ensaios (f_{ctm} = 3,5 MPa)

Descrição	$V_{rup,méd}$ (kN)	V_{Ru} (kN)	V_{Rd} (kN)	V_{max} (kN)	$l = V_{max}/V_{max}$
Peças sem capa 	**118,01**	**102,9**	**81,95**	**58,54**	**2,02**
Peças com capa	**160,21**	**113,65**	**88,73**	**63,38**	**2,53**
Peças com capa com fibras	**197,25**	**113,65**	**88,73**	**63,38**	**3,11**
Preenchimento de 2 alvéolos 	**166,16**	**173,74**	**137,3**	**97,86**	**1,70**
Preenchimento de 4 alvéolos 	**175,18**	**238,87**	**186,98**	**133,56**	**1,31**

A Tabela 13, a seguir, mostra a mesma comparação, contudo, utilizando a tensão característica média, de tração, obtida nos ensaios de compressão diametral do concreto.

Tabela 13 - Comparativo entre valores teóricos experimentais e de ensaios ($f_{ctm,\,exp}$ = 4,0 MPa)

Descrição	$V_{rup,méd}$ (kN)	V_{Ru} (kN)	V_{Rd} (kN)	V_{max} (kN)	$l = V_{max}/V_{max}$
Pecas sem capa 	118,01	121,00	96,32	68,8	1,72
Peças com capa 	160,21	125,86	97,69	69,61	2,30
Peças com capa e fibras	197,25	125,86	97,69	69,61	2,83
Preenchimento 2 alvéolos 	166,16	191,6	150,07	107,19	1,55
Preenchimento 4 alvéolos 	175,18	264,3	205,17	146,55	1,20

Onde:

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 CP.

$V_{rup,méd}$ = Carga de ruptura obtida experimentalmente, com média calculada de acordo com equação (4), em kN;

V_{Ru} = resistência última, calculada sem considerar coeficientes de majoração, em kN.

V_{Rd} = resistência de cálculo, com coeficiente de segurança devidamente aplicados na equação (1), em kN.

V_{max} = carga máxima admitida na aprovação de controle de qualidade, em kN.

Pelos valores obtidos pode-se verificar que os mesmos atendem os critérios contidos na NBR 6118 no que diz respeito ao cisalhamento.

5.2 COMPARAÇÕES

Foi observado, pelos valores teóricos apresentados nas Tabelas 7 e 8, calculados com base em valores do $f_{ctm,exp}$ obtidos conforme NBR-6118, em comparação com aqueles obtidos por ensaios, que os primeiros se mostraram mais conservadores.

Neste contexto, é interessante notar que a realização de ensaios de resistência à tração (para traços padronizados na fábrica) pode conduzir a maiores valores máximos de serviço, possibilitando melhor ajuste de projeto. Contudo, devem ser realizados estudos em relação ao comportamento da protensão, entre o Estado Limite de Serviço e o Estado Limite Último. O mesmo deve ser feito para se constatar quesitos referentes à eficiência da ancoragem e o percentual de contribuição da protensão nos diversos estágios de carregamento, bem como a perda de aderência tanto no Estado Limite Último como para efeitos de carregamentos cíclicos.

Nota-se que as lajes com capa de concreto reforçada com fibras apresentaram um desempenho superior ao das lajes com capa e tela, conforme mostrado na Tabela 12, em torno de 18,8% superior. Já em relação aos ELACPs sem capa o desempenho foi bem melhor, representando um aumento de 40,2 %, aproximadamente.

Portanto, verifica-se que a adição de fibras contribui para o aumento da capacidade resistente das lajes. É possível, também, que ao longo da vida útil do elemento os efeitos de microfissuras por vibrações ou fluência sejam menores. Porém, isso só é possível verificar com séries de ensaios de fluência e carregamentos cíclicos acelerados.

Com base na comparação dos resultados experimentais com os valores teóricos de cálculo, os elementos de laje ensaiados (com ou sem capa) atenderam os valores teóricos.

Através dos ensaios padronizados foi possível avaliar a segurança entre a ruptura real e a situação máxima de serviço. Portanto, os mesmos podem ser utilizados para auxílio ao projeto, bem como para o controle da qualidade na produção.

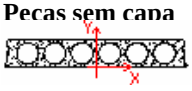
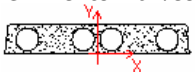
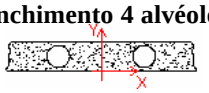
No caso dos elementos sem capa com preenchimento de 2 ou 4 alvéolos, também foram atendidos os valores teóricos. Contudo, especialmente para os elementos preenchidos com 4 alvéolos, o fator de segurança ficou muito pouco acima do limite teórico. Dessa forma, pode se afirmar que o preenchimento de 4 alvéolos não aumenta a capacidade resistente proporcionalmente (de forma linear) ao preenchimento de 2 alvéolos. Essa discrepância deve ser objeto de melhor investigação, especificamente para essa tipologia.

A Tabela 14 resume o aumento percentual comparado entre aumento de resistência e diminuição do coeficiente de segurança entre os resultados para os elementos sem capa e sem preenchimento de alvéolos e para os elementos com preenchimento de alvéolos. Nota-se que os valores de ensaios estão muito mais próximos do que os valores teóricos de cálculo. Neste caso, é importante considerar os valores de ensaio, uma vez que a diferença de ganho entre o preenchimento de 2 alvéolos provavelmente não compensará o tempo de execução das etapas necessárias para preencher mais 2 alvéolos em obra.

Quando o detalhamento de projeto é elaborado levando-se em consideração esse aspecto, isso se reverte em economia de escala em termos de construtibilidade, especialmente em se tratando de sistemas pré-fabricados de concreto.

Esses aspectos, no caso dos ELACPs, devem ser detalhados e decididos na fase de projeto.

Tabela 14 – Comparativo de ganho percentual entre 3 tipologias de ELACPs, relativo à resistência e construtibilidade

Descrição	$V_{rup,méd}$ (kN)	l	*Ganho percentual de ensaio*	V_{max} (kN)	*Ganho percentual teórico*
Pecas sem capa 	118,01	1,72	1,0	68,8	1,0
Preenchimento 2 alvéolos 	166,16	1,55	1,41	107,19	1,56
Preenchimento 4 alvéolos 	175,18	1,20	1,48	146,55	2,13

Tais informações são de grande valor para a elaboração do desenvolvimento de novos produtos, ou elementos de laje, com outras geometrias de alvéolos, por exemplo, ou outra tipologia de reforço da capa próximo às ligações da laje com os outros elementos da estrutura.

Da mesma forma é possível analisar a relação entre ganho de resistência dos ELACPs com capa e os ELACPs com preenchimento de alvéolos. Uma análise de projeto, construtibilidade e custos se mostra importante para que se defina qual dos processos construtivos representaria a melhor relação entre custo e benefício, considerando o ganho em resistência de elementos idênticos em relação à espessura, como os analisados na pesquisa.

6 CONCLUSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Através do convenio entre universidade e empresa se torna possível atingir melhores resultados nas pesquisas e maior rapidez de aplicação desses resultados pela indústria.

Com os resultados favoráveis apresentados neste trabalho, em relação à implementação de ensaios para controle de qualidade, pretende-se difundir a prática dos mesmos entre os fabricantes, para que esses passem a ter maior controle da qualidade de seus produtos, enquanto peças componentes de uma estrutura. Esse controle permite ainda ao fabricante, atender certas exigências legais em relação ao produto testado.

Outros ensaios, envolvendo o conjunto desses elementos devem ser realizados pelos centros de pesquisa, os quais possuem recursos humanos com conhecimento tecnológico necessário, bem como equipamentos e locais apropriados para realizar tais ensaios. Como exemplo, pode ser mencionado os ensaios de comportamento de um pavimento sob a ação de carregamentos laterais.

6.2 CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS

Em relação ao principal objetivo do trabalho, onde se pretendia implantar e avaliar um método de ensaio de cisalhamento, conforme as recomendações FIB (CEB-FIP, 1992), para efeito de controle de qualidade, em elementos de laje alveolar pré-fabricados de concreto protendido – ELACPs, conclui-se que foi cumprido.

Dentre as diretrizes gerais estabelecidas pelo manual para ensaios de lajes alveolares visando controlar a qualidade desses elementos isoladamente, também foram atendidas.

Após a execução dos ensaios preliminares e a definição de todos os procedimentos foi possível criar um método prático que pudesse ser executado por pessoal técnico, devidamente

treinado, desde que os fabricantes implantem um sistema para ensaios de ELACPs, com os elementos descritos nesta pesquisa.

Além do objetivo principal, foi possível, inclusive, realizar comparações entre diversas tipologias de ELAPCs quando submetidos aos ensaios de cisalhamento para atestar a eficácia dos procedimentos e dos métodos utilizados.

6.3 AVANÇOS EM RELAÇÃO A TRABALHOS ANTERIORES

Apesar de existirem inúmeros ensaios com elementos de laje alveolar no exterior, ou mesmo, com tais elementos atuando conjuntamente, no Brasil na ose tem notícia, até a conclusão dessa pesquisa, de trabalhos de mesma natureza.

Foram realizados mais de 28 ensaios, com 5 grupos de ELACPs, no decorrer de 3 meses. Esses resultados são expressivos, tanto pela quantidade de ensaios como pela diversidade de tipologias analisadas.

Mesmo ensaios nacionais com outros elementos pré-fabricados têm se limitado a uma ou duas tipologias e a uma peça de cada uma delas (SOUZA, 2006; CATOIA, 2007; KATAOKA, 2007). Portanto, se não é possível considerar o presente trabalho como pioneiro, é possível considerá-lo como uma importante referência de dados nacionais para futuras pesquisas, contendo ainda uma interpretação pratica dos procedimentos de ensaio padrão de apoio em ELACPs praticados na Europa.

6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para novos trabalhos devem ser ressaltados alguns fatores que podem ser descritos como fundamentais para que se realizem esses ensaios com maior rigor em centros de pesquisa.

Os ensaios realizados nesta pesquisa foram feitos na sede da empresa, com os equipamentos disponibilizados para atingir o objetivo principal já descrito. Contudo, ao se

realizar os mesmo ensaios em centros de pesquisa, ao se deparar com uma ocorrência inesperada no decorrer de um ensaio, é possível instalar sensores adequados para captar movimentos, deslocamentos e rotações, por exemplo, que não são possíveis obter ao se realizar os mesmos ensaios em fábrica.

Assim, sugere-se ao se realizar ensaios similares no futuro, verificar os principais quesitos:

- Os instrumentos devem estar calibrados;
- Controle de horário, umidade e temperatura regulares e monitorados;
- Instrumentos adicionais de verificação de deslocamentos verticais, rotação e outros, os quais não são necessários para verificação e controle de qualidade em fábrica, mas que são necessários para maior rigor nas análises e conclusões;
- Maior disponibilidade de tempo pela equipe que está trabalhando nos ensaios evitando perda de informações e interrupções por motivos externos.

Outras recomendações são:

- Pesquisas comparativas em relação aos processos construtivos paralelas às pesquisas referentes ao comportamento estrutural dos ELACPs, uma vez que ao se utilizar preenchimento de alvéolos ou uso de fibras, uma verificação do aumento do tempo e do custo de execução. Assim, pode ser verificado se realmente haverá uma melhoria da relação custo ‘versus’ benefício do produto edificado, em razão do aumento de resistência obtido no elemento estrutural;
- O mesmo pode ser descrito para a adição de fibras. A adição de fibras não foi o principal objeto de estudo deste trabalho, tendo sido utilizada como alternativa para analisar o comportamento da capa de concreto, em substituição à tela. No entanto, foi verificado um aumento real nos elementos ensaiados com essa tipologia, conforme já descrito. Esse pode ser um indicativo para que novas pesquisas sobre esse temas

específico sejam realizadas;

- Recomenda-se a elaboração de ensaios comparativos em relação ao uso ou não de fibras nas capas de concreto, uma vez que pode existir maior contribuição dessas ao se considerar um pavimento com múltiplos elementos atuando conjuntamente. Portanto, os resultados seriam, provavelmente, diferentes dos resultados apresentados para elementos isolados;
- Com relação aos ensaios para flexão de lajes alveolares, no momento estão sendo realizados estudos para validação de procedimentos padronizados, uma vez que os procedimentos indicados no manual da FIB -1992 não se encontram na edição recente da EN 1168:2005. Da mesma forma, não existe norma brasileira que aborde o tema. Dessa forma, também é um tema que permite explorar diversos aspectos em pesquisas.

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Além do ensaio apresentado aqui, os ensaios de flexão têm importância para a verificação da qualidade e comportamento à tração do concreto e de sua interação com o aço de protensão. Porém, tais ensaios devem ser realizados com elementos de maiores dimensões que aquelas especificadas pela FIB (CEB-FIP, 1992), caso sejam realizados em laboratório, até o limite de ruptura das peças.

Outras propostas de ensaios podem ser estudadas para se comparar com o modelo de ensaio proposto, uma vez que não há consenso em relação a uma metodologia unificada tanto no exterior como no Brasil.

Os métodos variam desde o vão dos modelos ensaiados até as espessuras usualmente ensaiadas. Enquanto na Europa é comum utilizar-se elementos com espessuras de 320 mm, no Brasil não seria a tipologia ideal para ser estudada, uma vez que os elementos produzidos para o mercado nacional possuem espessuras variando entre 150 mm e 200 mm.

Os trabalhos desenvolvidos por esta pesquisa se mostraram importantes não só pelos resultados obtidos, bem como, pela forma como foram realizados. Convênios entre as universidades e as indústrias podem gerar benefícios para ambos os lados. Para a indústria, significa a segurança de ter seus produtos avaliados por pesquisadores com responsabilidade e conhecimento tecnológico suficientes para apresentar soluções a problemas cotidianos. Para a universidade, possibilita participar mais ativamente do desenvolvimento sócio-econômico do país, ao contribuir para a disseminação e aplicação do conhecimento adquirido no meio acadêmico. Essa associação torna mais ágil o desenvolvimento tecnológico e industrial do país, resultando em benefícios para a população em geral, proporcionando melhoria da qualidade de vida das pessoas.

Pelos fatos descritos aqui se mostrou a atualidade e importância do tema abordado e a necessidade da continuidade das pesquisas no setor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6118/2004. **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____. NBR 9062/2006. **Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. NBR 14861. **Laje pré-fabricada – Painel alveolar de concreto protendido - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

_____. NBR 12654:1992 – **Controle tecnológico de materiais componentes do concreto – Procedimento**. Rio de janeiro: ABNT, 1992.

_____. NBR 14931: 2004. **Execução de estruturas de concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ACCETTI, K. M. **Tipos de fibras e propriedades do concreto com fibras**. Congresso Brasileiro do Concreto, 42o; IBRACON Trabalho de evento. São Paulo: IBRACON, 2000.

AJDUKIEWICZ, A.B.; KLISZCZEWICZ, A. T. & WEGLORZ, M. **Behaviour Of Pre-Tensioned Hollow-Core Slabs With In-Situ Concrete Topping**. CEB-FIB Symposium Dubrovnik, Croacia, may 2007

ÅKESSON, M. **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 1993.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI 544.1R-82. **State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. In: Manual of concrete practice** – V 5. Detroit: ACI, 1987.

ARCELOR-MITTAL. **http://www.constructalia.com/br_BR/products/productos_detalle.jsp?idApli=449365.** Acessado dia 4 de agosto de 2007.

BRUNA, P. J. V. **Arquitetura, industrialização e desenvolvimento**. 312p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo: FAUUSP, 1976.

CATOIA, B. **Comportamento de vigas protendidas pré-moldadas com ligações semi-rígidas.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR. São Carlos, 2007.

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

EL DEBS, Mounir Khalil. **Concreto Pré–moldado: Fundamentos e Aplicações**. São Carlos: EESC – USP, 2000.

ELLIOTT, Kim S. **Precast Concrete Structures**. Oxford: ELSEVIER, 2002.

FARAH, M. F. S. **Tecnologia, Processo de Trabalho e Construção Habitacional**. 297p. Tese de Doutorado – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. São Paulo.

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

FERREIRA, M. A. **Curso de Especialização para Professores de Sistemas Pré-Fabricados de Concreto.** São Carlos, EDUFSCar - NETPRE, 2007.

FIB – Fedération Internationale du Béton. **Guide to good practice: Quality assurance of hollow core slab**. London: Published by Seto Ltd., 1992.

FIB – Fedération Internationale du Béton. **Guide to good practice: Special design considerations for precast prestressed hollow core floors**. Lausanne: FIB, 2000.

FIP - Federation Internationale du Precontraine. **A STATE-OF-THE-ART report from the FIP**. Concrete International, v.7, n.3, p.66-68, FIP, 1985.

FOLCH, A.T. **Manual Munte de Projetos Pré-fabricados de Concreto**. São Paulo: ED. PINI, 2004.

FRIEDERICH, Thomas. **Fibre Modified Concrete – Significant Improvements at Low Fibre Dosages** . Concrete Plant International 4, August 2000. p. 36 – 46. 2000.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. 1ª. ed. São Paulo: Editora Pini, 1995.

KATAOCA, M. N. **Estudo da continuidade em ligações laje-viga-pilar em estruturas pré-moldadas de concreto.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR. São Carlos, 2007.

LINTZ, R.C.C. **Dosagem de concreto de elevado desempenho**. Dissertação de Mestrado, EESC, USP – São Carlos, pp. 5-8, 43-52. São Carlos: EESC-USP, 1997.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Material**. São Paulo, PINI, 1994.

MONTEIRO, P.J.M. **Controle da microestrutura para o desenvolvimento de concretos de alto desempenho**. Boletim Técnico, 22p (BT/PCC/86). São Paulo: EPUSP, 1993.

ORDONÉZ, J. A. F. **Pre-Fabricación – teoría y práctica**. V. 1. Barcelona: Editores Técnicos Associados, 1974.

SABBATINI, F.H. **Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos: formulação e aplicação de uma metodologia**, 336p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo: EPUSP, 1989.

SALAS, S. J. **Construção industrializada: pré-fabricação**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Apostila de curso. São Paulo: IPT, 1988.

SOUZA, A. S. **Comportamento de elementos pré-moldados de concreto com ligações semi-rígidas.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR. São Carlos, 2006.

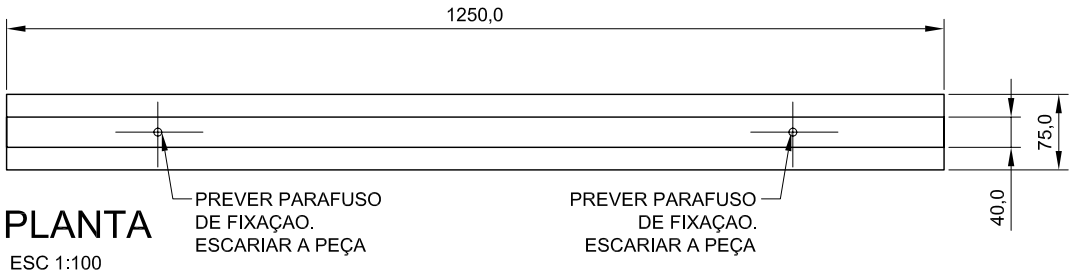
TKALCIC, D., BANIC, D., ZUPCIC, M. & PERIC, Z. **Prestressed Hollow Core Slabs – Shear Resistance Test According To HRN En 1168:2005.** CEB-FIB Symposium Dubrovnik, Croacia, may 2007

VAN ACKER, Arnold. **II Workshop em Concreto Pré-fabricado.** Palestra no NETPRE – Núcleo de Estudos e Tecnologia do Concreto Pré-fabricado, da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. São Carlos, NETPRE, 2007.

VAN ACKER, Arnold; ELLIOTT, Kim S. **Fib Masters Course.** Curso de Aperfeiçoamento para Professores e Técnicos do Setor de Pré-fabricados. São Paulo: ABCIC, Fib, NETPRE, 2007.

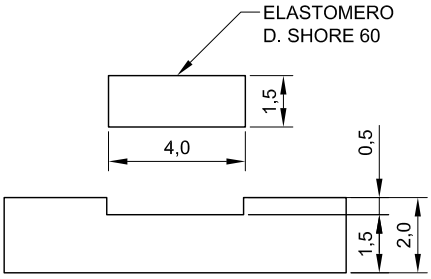
ANEXO 1

Detalhamento do sistema de apoio
dos elementos



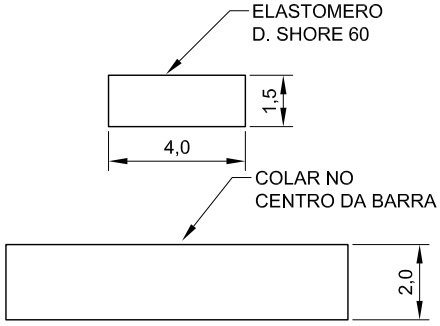
PLANTA

ESC 1:100



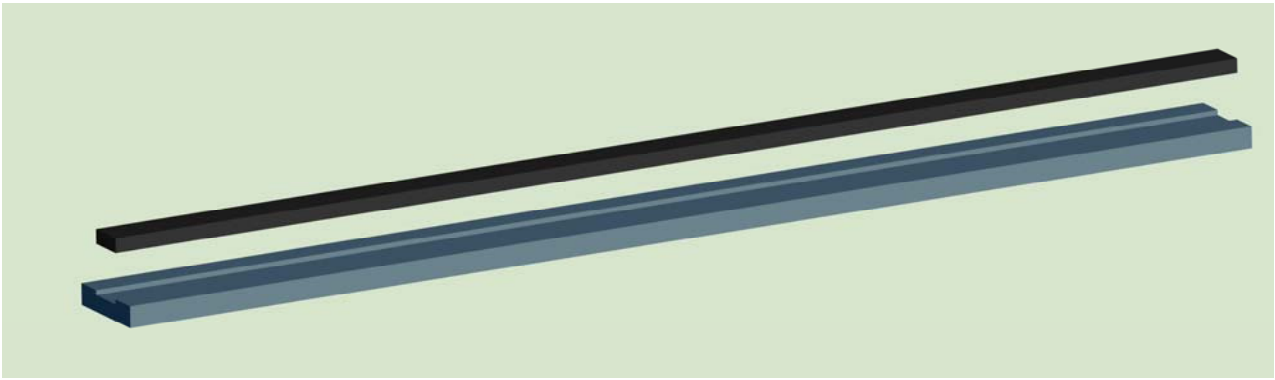
ELEV. LATERAL - MOD. 1

ESC 1:25



ELEV. LATERAL - MOD. 2

ESC 1:25

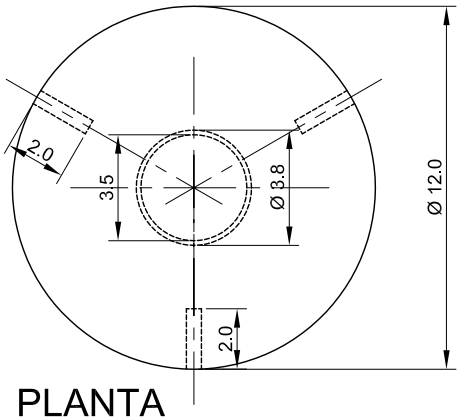


RENDERIZAÇÃO - MOD. 1

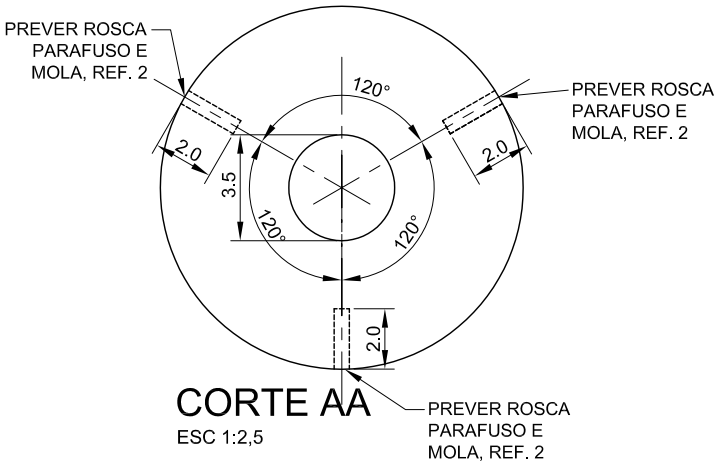
netpre Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-moldados de Concreto	SISTEMA DE APOIO INFERIOR		
	PLANTAS, ELEVEÇÕES RENDERIZAÇÃO		FOLHA: 1/1
GRUPO DE ESTUDOS DE PACP	UNIDADE COTAS: MILIMETROS	DWG NO. ROTULA E APOIO.DWG	REV.: 0
CASSOL – ABCIC	ESCALA: INDICADA	DES.: NEITON SANTOS	DATA: JUN/2006

ANEXO 2

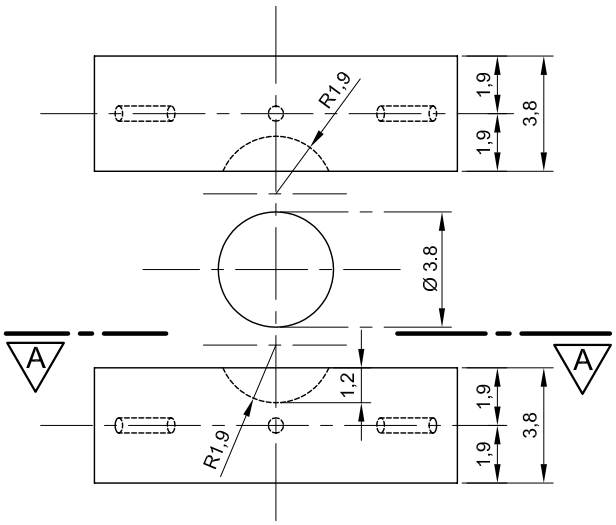
Detalhamento da rótula triaxial para
aplicação do carregamento



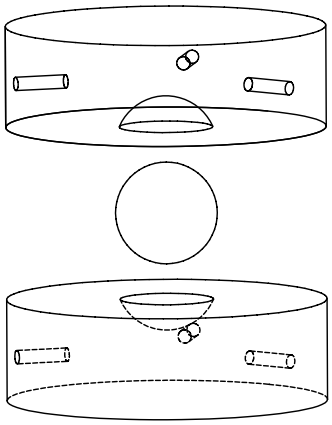
PLANTA
ESC 1:2,5



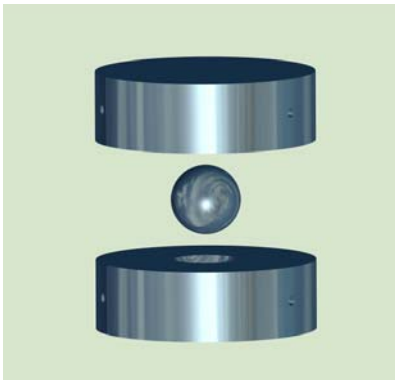
CORTE AA
ESC 1:2,5



EL. FRONTAL
ESC 1:2,5



PERSPECTIVA
S/ ESCALA



RENDERIZAÇÃO

IMAGEM REF. 1

IMAGEM REF. 2

netpre Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-moldados de Concreto	RÓTULA DE APOIO SOB A CÉLULA DE CARGA		
	PLANTAS, ELEVEÇÕES E PERSPECTIVA RENDERIZAÇÃO E IMAGENS DE REFERÊNCIA		FOLHA: 1/1
GRUPO DE ESTUDOS DE PACP	UNIDADE COTAS: MILIMETROS	DWG NO. ROTULA E APOIO.DWG	REV.: 0
CASSOL – ABCIC	ESCALA: INDICADA	DES.: NEITON SANTOS	DATA: JUN/2006

ANEXO 3

Folha de campo para anotações em

Ensaio padrão de apoio em ELACPs

ENSAIO PADRÃO DE APOIO EM ELACPs

1. Identificação da peça

Número peça:	
Identificação de fabricação/lote:	
Modelo Máquina/formas:	
Número x diâmetro de cordoalhas:	
Largura do painel (l_p):	
Altura do painel (h_p):	
Altura da capa (h_c):	
Fibras/Armadura na capa:	
Número de alvéolos preenchidos:	
Fibras/Armaduras no alvéolo:	
Idade do PACP:	
Idade da capa:	

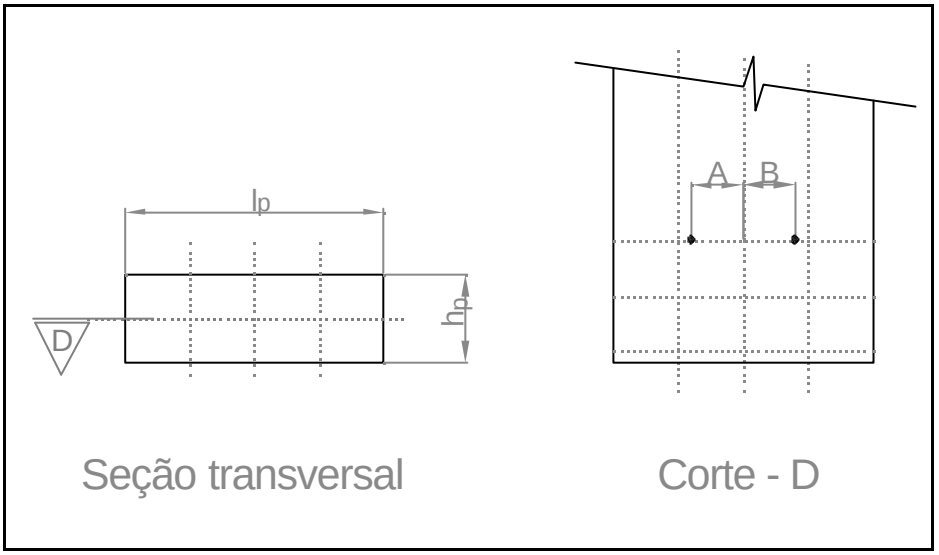


Figura 1 - Indicação de alvéolos, alvéolos preenchidos e cordoalhas.

2. Dados de ensaio

Data do ensaio (dd/mm/aaaa):	
Local do ensaio (Empresa/Cidade):	
Forma de controle da aplicação da carga:	
Hora de início do ensaio (hh:mm):	
Hora de término do ensaio (hh:mm):	
Taxa de carregamento (KN/min):	
Dimensões da viga de transferência (hxl_b):	
Dimensão A/canal do extensômetro (cm):	
Dimensão B/ canal do extensômetro (cm):	

3. Observações pré-ensaio

4. Indicação manual do esquema de fissuração

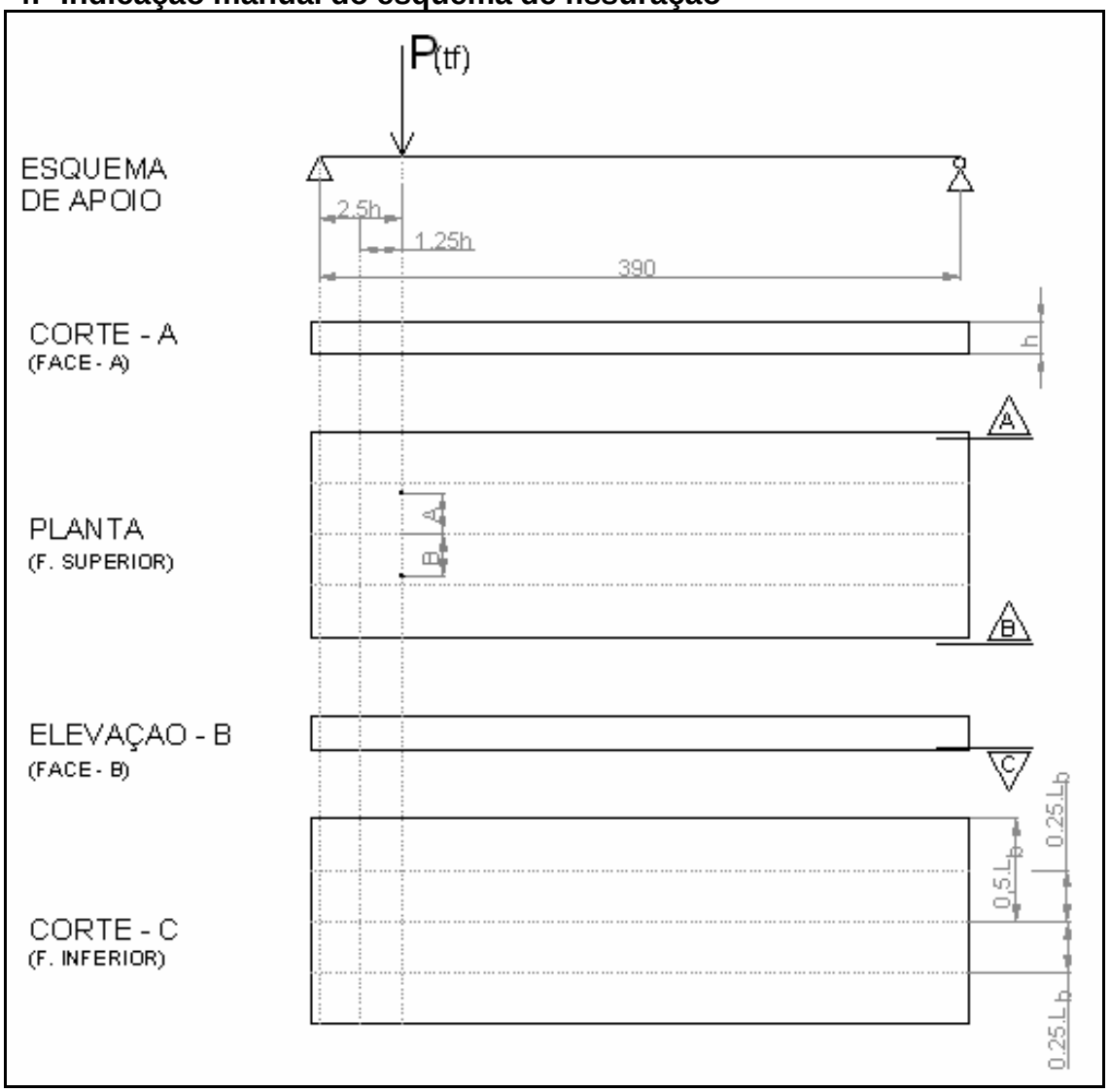


Figura 2 - Indicação de fissuras

5. Observações

_____

_____

_____

_____

_____

_____

ANOTAR HORA DE TÉRMINO NA FOLHA 1
GRÁFICO NA PÁGINA A SEGUIR

Nome do arquivo eletrônico do gráfico e dados:	
data da ultima modifiação no arquivo (dd/mm/aaaa):	