

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Jean Alberto Tremarin**

**LAJES ALVEOLARES DE CONCRETO PROTENDIDO:  
ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES**

Porto Alegre  
novembro 2013

**JEAN ALBERTO TREMARIN**

**LAJES ALVEOLARES DE CONCRETO PROTENDIDO:  
ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Roberto Domingo Rios**

Porto Alegre  
novembro 2013

**JEAN ALBERTO TREMARIN**

**LAJES ALVEOLARES DE CONCRETO PROTENDIDO:  
ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES**

Porto Alegre, novembro de 2013

Prof. Roberto Domingo Rios  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Roberto Domingo Rios (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Rubem Clécio Schwingel (UFRGS)**  
M. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Profa. Virgínia Maria Rosito d'Avila (UFRGS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Valter e Zelita, que sempre me apoiaram e me proporcionaram as melhores condições para que hoje eu esteja realizando essa conquista.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Roberto Domingo Rios, orientador deste trabalho, por toda atenção dedicada a mim e pelos valiosos ensinamentos, que, além de indispensáveis para a realização deste estudo, serão levados comigo para minha vida profissional.

Agradeço à Profa. Carin, coordenadora desta disciplina, por toda sua dedicação e pelas importantíssimas lições, sempre precisas e pertinentes para a qualificação deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Valter e Zelita, por todo apoio, carinho e atenção durante toda a faculdade.

Agradeço aos meus irmãos, Valter Junior e Katiane, que sempre me motivaram para a realização e aprimoramento deste trabalho.

Toda reforma interior e toda mudança para melhor  
dependem exclusivamente da aplicação  
do nosso próprio esforço.

*Immanuel Kant*

## RESUMO

As lajes alveolares constituem-se em um dos elementos pré-moldados mais utilizados, garantindo, cada vez mais, um importante espaço em obras de construção civil, devido às suas grandes vantagens. Essas lajes possuem alvéolos (vazios) longitudinais com formas diversificadas, com o propósito de diminuir o peso próprio da laje. Elementos pré-moldados, principalmente as lajes, não garantem uma grande rigidez da estrutura e podem estar mais suscetíveis a deformações. Assim, com o intuito de conhecer melhor o comportamento das lajes alveolares, este estudo faz uma análise, quanto às deformações, de lajes alveolares disponibilizadas na região de Porto Alegre, tendo como base as fórmulas e os procedimentos contidos na NBR 6118/2007. Para o estudo são utilizadas cinco diferentes lajes alveolares comercializadas por um único fabricante. A determinação das flechas nessas lajes são realizadas de forma teórica utilizando-se das fórmulas da Norma e calculadas com o auxílio básico, mas eficiente, do programa Microsoft Excel. Dessa forma, a partir dos resultados teóricos obtidos, pôde-se compará-los com os limites estipulados pela Norma e, assim, analisar se as lajes alveolares estudadas estão de acordo com os critérios da NBR 6118/2007.

Palavras-chave: Lajes Pré-moldadas. Cálculo Aproximado de Flechas Máximas em Lajes Alveolares. Deformações em Lajes Alveolares.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do estudo .....	18
Figura 2 – Comparação de custos entre lajes protendidas e convencionais em concreto armado .....	22
Figura 3 – Valor de $\varepsilon_r$ (umidade) .....	26
Figura 4 – Coeficiente $k_b$ (composição do concreto) .....	26
Figura 5 – Coeficiente $k_e$ (espessura fictícia) .....	27
Figura 6 – Coeficiente $k_t$ (tempo) .....	27
Figura 7 – Variação de $\beta_s(t)$ .....	29
Figura 8 – Deformação lenta .....	31
Figura 9 – Evolução da deformação total com o tempo .....	33
Figura 10 – Ensaio de carga – descarga – recarga, para análise da deformação lenta ....	34
Figura 11 – Variação de deformação lenta irreversível ( $\varepsilon_{ccf}$ ) .....	35
Figura 12 – Variação de $\beta_f(t)$ .....	38
Figura 13 – Seção transversal da laje LP 15 .....	48
Figura 14 – Seção transversal da laje LP 20 .....	49
Figura 15 – Seção transversal da laje LP 26,5 .....	49
Figura 16 – Seção transversal da laje LP 32 .....	49
Figura 17 – Seção transversal da laje LP 40 .....	49
Figura 18 – Posição das cordoalhas na laje LP 15, LP 20 e LP 26,5 .....	50
Figura 19 – Posição das cordoalhas na laje LP 32 e LP 40 .....	50
Figura 20 – Situação de carregamento .....	52



## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Combinação de serviço .....	56
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores numéricos usuais para a determinação da fluência e da retração ...	30
Tabela 2– Espessuras mínimas das lajes retangulares simplesmente apoiadas nos quatro lados (cm) .....	42
Tabela 3 – Valores do coeficiente $\xi$ em função do tempo .....	47
Tabela 4 – Dados das lajes .....	48
Tabela 5 – Dados das cordoalhas .....	51
Tabela 6 – Relação dos vãos máximos com as sobrecargas .....	51
Tabela 7 – Valores do coeficiente $\gamma_{12}$ .....	52
Tabela 8 – Valores dos esforços de protensão das lajes .....	58
Tabela 9 – Valores dos momentos de fissuração das lajes .....	58
Tabela 10 – Valores do momento de serviço da laje LP 15 .....	59
Tabela 11 – Valores do momento de serviço da laje LP 20 .....	59
Tabela 12 – Valores do momento de serviço da laje LP 26,5 .....	60
Tabela 13 – Valores do momento de serviço da laje LP 32 .....	61
Tabela 14 – Valores do momento de serviço da laje LP 40 .....	62
Tabela 15 – Flechas na laje LP 15 .....	63
Tabela 16 – Flechas na laje LP 20 .....	63
Tabela 17 – Flechas na laje LP 26,5 .....	64
Tabela 18 – Flechas na laje LP 32 .....	65
Tabela 19 – Flechas na laje LP 40 .....	63
Tabela 20 – Carregamento máximo na laje LP 15 .....	66
Tabela 21 – Carregamento máximo na laje LP 20 .....	67
Tabela 22 – Carregamento máximo na laje LP 26,5 .....	67
Tabela 23 – Carregamento máximo na laje LP 32 .....	67
Tabela 24 – Carregamento máximo na laje LP 40 .....	68

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varepsilon_{cs}$  = deformação específica, num instante genérico, devida à retração, ao nível do centro de gravidade da armadura (da área) da peça;

$\varepsilon_r$  = depende das condições climáticas (função da umidade do meio ambiente);

$k_b$  = coeficiente que depende da composição do concreto (função do consumo de cimento por  $m^3$  de concreto e do fator água-cimento);

$k_e$  = coeficiente que depende da espessura fictícia  $e_m$  da peça;

$k_p$  = coeficiente que depende da percentagem geométrica  $p = \frac{100A_s}{A}$  da armadura longitudinal (de área  $A_s$ ) em relação à seção da peça (de área  $A$ );

$k_t$  = coeficiente que quantifica o desenvolvimento da retração com o tempo;

$n$  = relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto;

$\varepsilon_{cs\infty}$  = valor final da retração;

$\beta_s(t)$  ou  $\beta_s(t_0)$  = coeficiente relativo à retração, no instante  $t$  ou  $t_0$ ;

$t$  = idade fictícia do concreto no instante considerado;

$t_0$  = idade fictícia do concreto no instante em que o efeito da retração na peça começa a ser considerado;

$\varepsilon_{1s}$  = coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente e da consistência do concreto;

$\varepsilon_{2s}$  = coeficiente dependente da espessura fictícia da peça;

$h_{fic}$  = espessura fictícia;

$\gamma$  = coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente ( $U\%$ );

$A_c$  = área da seção transversal da peça;

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

$\varepsilon_{ci}$  = deformação específica imediata do concreto devida à aplicação do carregamento;

$\Delta l_{ci}$  = deformação imediata;

$l$  = altura da peça de concreto;

$\sigma_c$  = valor do carregamento;

$E_s$  = módulo de elasticidade secante do concreto;

$\Delta l_{ct}$  = deformação máxima no tempo infinito;

$\Delta l_{ci}$  = deformação imediata;

$\varepsilon_{cc}$  = deformação lenta;

$\varepsilon_{ct}$  = deformação específica total;

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

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

$\varphi_{1c}$  = coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente  $U$ , em porcentagem, e da consistência do concreto;

$\varphi_{2c}$  = coeficiente dependente da espessura fictícia  $h_{fic}$  da peça;

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

$\varphi_{d\infty}$  = valor final do coeficiente de deformação lenta reversível;

$\beta_d(t)$  = coeficiente relativo à deformação lenta reversível função do tempo  $(t - t_0)$  decorrido após o carregamento;

$p$  = carregamento quase permanente;

$g_k$  = soma das ações permanentes características;

$\psi_{2i}$  = coeficientes de combinação;

$q_{ki}$  = ações variáveis características;

$W_\infty$  = flecha final;

$\varphi$  = coeficiente de fluência;

$W_o$  = flecha inicial;

$\nu$  = coeficiente de Poisson do concreto;

$E_{cs}$  = módulo de deformação longitudinal secante;

$h$  = espessura da laje.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA .....</b>	<b>16</b>
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	16
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	16
<b>2.2.1 Objetivo Principal .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.2 Objetivos Secundários .....</b>	<b>16</b>
2.3 HIPÓTESE .....	17
2.4 DELIMITAÇÕES .....	17
2.5 LIMITAÇÕES .....	17
2.6 DELINEAMENTO .....	17
<b>3 CONCEITOS BÁSICOS.....</b>	<b>19</b>
3.1 PRÉ-FABRICAÇÃO .....	19
3.2 PROTENSÃO.....	21
3.3 LAJES ALVEOLARES.....	22
<b>4 DEFORMAÇÕES .....</b>	<b>24</b>
4.1 RETRAÇÃO .....	24
<b>4.1.1 Conceituação .....</b>	<b>24</b>
<b>4.1.2 Valor da retração .....</b>	<b>28</b>
4.2 DEFORMAÇÃO LENTA (FLUÊNCIA) .....	31
<b>4.2.1 Conceituação .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2.2 Valor da deformação lenta (fluência) .....</b>	<b>36</b>
4.3 CÁLCULO DAS FLECHAS .....	38
<b>5 VERIFICAÇÃO DE FLECHA MÁXIMA: CRITÉRIOS PREVISTOS NA NBR 6118/2007 .....</b>	<b>44</b>
<b>6 LAJES ALVEOLARES ESTUDADAS .....</b>	<b>48</b>
6.1 DIMENSÕES DAS LAJES .....	48
6.2 CARREGAMENTO .....	51
<b>7 ROTEIRO PARA O CÁLCULO DE DEFORMAÇÕES EM LAJES ALVEOLARES .....</b>	<b>54</b>
<b>8 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>58</b>
<b>9 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>69</b>

**Referências .....**

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, o concreto pré-moldado vem, gradativamente, ampliando seu campo de aplicação e, conseqüentemente, conquistando um espaço significativo na área da construção civil. Pode-se dizer que isso ocorre devido às facilidades de sua execução quando comparado a estruturas moldadas no local. Dentre essas facilidades, salienta-se a maior produtividade da mão de obra, o maior controle de qualidade e o melhor aproveitamento dos materiais utilizados, o que possibilita uma redução no tempo da construção das edificações.

Na pré-moldagem de elementos estruturais, assim como na moldagem *in loco*, devem ser consideradas as deformações decorrentes da aplicação de cargas a que as estruturas estarão submetidas, a fim de evitar futuras manifestações patológicas nas edificações como, por exemplo, fissuras em elementos da estrutura, em paredes de vedação ou problemas no contrapiso devido às diferenças de flechas entre lajes paralelas. Existem várias opções de elementos pré-moldados, para a construção de lajes e paredes, sendo que os mais utilizados são os painéis alveolares, “TT”, “U” e maciços. Para a estruturação de vigas e pilares, os formatos mais comuns são os de seção retangulares, “I”, “T” invertido e quadrada vazada.

Neste estudo, dentre as opções de concreto pré-moldado, analisa-se o comportamento relativo a deformações das lajes alveolares de concreto protendido, as quais são comumente empregadas em obras de grande porte, por vencerem vãos de grandes dimensões. Para realizar essa análise, dividiu-se o trabalho em seis capítulos, que, numericamente, correspondem aos Capítulos 3, 4, 5, 6, 7 e 8 – observa-se que os Capítulos 1 e 2 correspondem, respectivamente, à Introdução e às Diretrizes da Pesquisa. Já o Capítulo 9 foi dedicado às Considerações Finais –.

No Capítulo 3, primeiro da análise, são apresentados os conceitos básicos da pré-fabricação, da protensão e das lajes alveolares para o melhor entendimento dos elementos que compõem o trabalho.

No Capítulo 4, a análise recai sobre o conceito das deformações ocasionadas pela retração e fluência do concreto. Neste mesmo capítulo, são apresentados alguns conceitos e fórmulas para o cálculo das flechas em estruturas de concreto armado.



No Capítulo 5, são abordados os critérios da NBR 6118/2007 para a verificação de flecha máxima em elementos de concreto armado. Esses critérios são utilizados para o cálculo aproximado das flechas nas lajes alveolares, objeto do presente estudo.

No Capítulo 6, são apresentadas as características físicas, tais como dimensões e peso específico, das lajes alveolares estudadas. Também é apresentado a relação de vãos para determinados carregamentos e demais dados necessários para os cálculos das flechas.

O Capítulo 7, por sua vez, tem o objetivo de demonstrar, de forma detalhada, os cálculos para a obtenção dos valores das flechas em lajes alveolares. Para a realização desses cálculos são utilizados os dados apresentados nos capítulos anteriores e, com base neles, são realizadas as estimativas das flechas para as lajes estudadas

No Capítulo 8, último da análise, são apresentados os resultados dos cálculos das flechas das lajes alveolares estudadas, realizados no programa Microsoft Excel e obtidos com base nos capítulos anteriores. Em seguida, é feita a análise dos resultados comparando-os com os limites estipulados pela NBR 6118/2007, para estabelecer se as lajes estão de acordo com as especificações da Norma.

Oportuno referir que, ao longo do trabalho, foram consideradas as deformações ocasionadas por cargas de curta e longa duração, ou seja, o comportamento da estrutura, em função do tempo, em decorrência das cargas associadas ao peso próprio da estrutura e às cargas de projeto. Também foi avaliado o desempenho da estrutura, variando-se as dimensões das lajes para, posteriormente, comparar os resultados obtidos.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho estão descritas nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: as lajes alveolares de concreto protendido, disponíveis no mercado da região de Porto Alegre (RS), respeitam as especificações de flecha máxima estipulada na NBR 6118/2007?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo Principal**

O objetivo principal do trabalho é a verificação teórica, por meio de cálculos, das lajes alveolares disponíveis no mercado da cidade de Porto Alegre (RS), quanto ao respeito às deformações previstas na NBR 6118/2007 para as cargas e vãos analisados.

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) apresentação dos critérios para a verificação de deformações em lajes alveolares protendidas;
- b) apresentação dos resultados das deformações instantâneas e diferidas no tempo (fluência e retração) obtidos a partir de cálculos realizados considerando-se as diferentes lajes alveolares protendidas estudadas.

## 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que as lajes alveolares de concreto protendido, disponíveis no mercado da região de Porto Alegre (RS), respeitam os critérios, referente às flechas máximas instantâneas e diferidas no tempo, estipulados pela Norma da ABNT.

## 2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo de flecha máxima em lajes alveolares protendidas disponíveis no mercado na região de Porto Alegre (RS).

## 2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

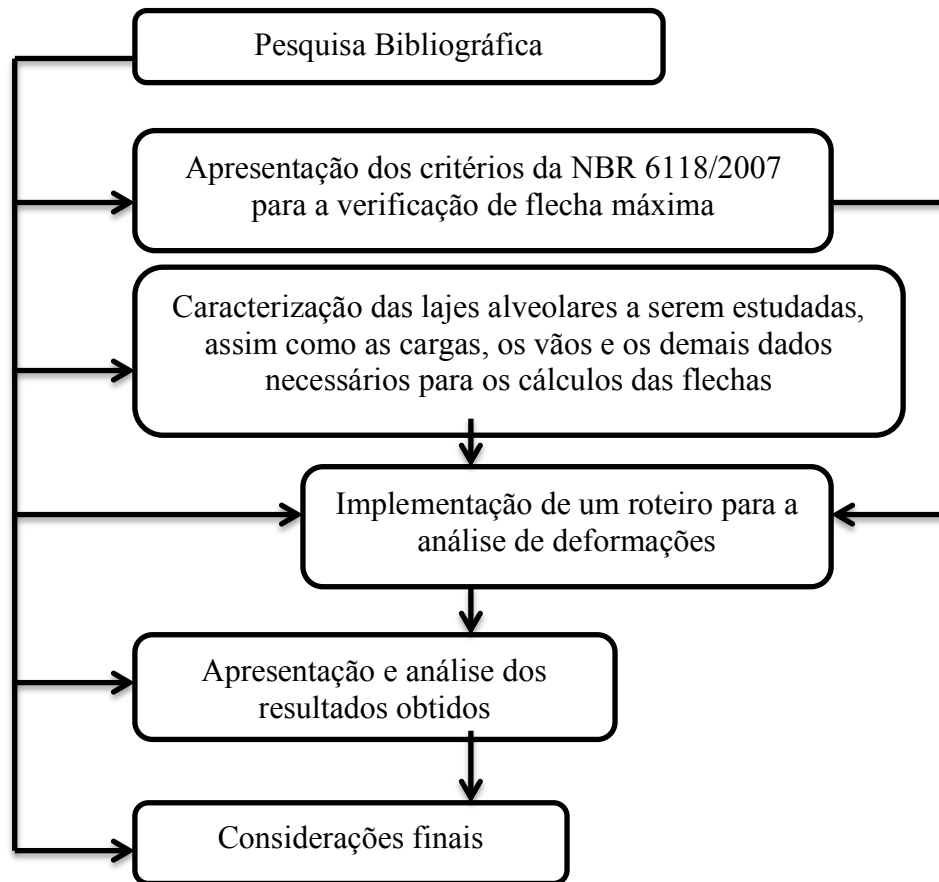
- a) análise de vãos de lajes alveolares típicas de edificações residenciais e comerciais;
- b) obtenção de resultados por meio de fórmulas e critérios apresentadas pela Norma da ABNT;
- c) realização dos cálculos com o auxílio do programa Microsoft Excel.

## 2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) apresentação dos critérios da NBR 6118/2007 para a verificação de flecha máxima;
- c) caracterização das lajes alveolares a serem estudadas, assim como as cargas, os vãos e os demais dados necessários para os cálculos das flechas;
- d) implementação de um roteiro para a análise de deformações utilizando o programa *Microsoft Excel*;
- e) apresentação e análise dos resultados obtidos;
- f) considerações finais.

Figura 1 – Representação esquemática do estudo



(fonte: elaborado pelo autor)

Primeiramente, realizou-se a **pesquisa bibliográfica**, na qual foi obtido todo conhecimento para o embasamento da pesquisa. Em seguida, realizou-se a **apresentação dos critérios da NBR 6118/2007 para a verificação de flecha máxima**, quando foram especificadas as fórmulas e as considerações para a determinação das deformações nas estruturas.

Posteriormente, foi realizada a **caracterização das lajes alveolares a serem estudadas** e, com a utilização dos dados das etapas passadas, a **implementação de um roteiro para a análise de deformações**. Com o auxílio desse roteiro e com o emprego do programa *Microsoft Excel*, foram feitos os cálculos, sendo variadas as dimensões dos vãos e os valores das cargas aplicadas com base em catálogo de vendas de um fornecedor credenciado no mercado de Porto Alegre para a obtenção da flecha máxima das lajes alveolares estudadas. Assim, após a realização dos cálculos, foi feita a **apresentação e a análise dos resultados obtidos**, chegando-se às **considerações finais**.

### 3 CONCEITOS BÁSICOS

Neste capítulo são caracterizados os processos de pré-fabricação e protensão, assim como as características das lajes alveolares, a fim de destacar as vantagens e desvantagens de utilização desses elementos.

#### 3.1 PRÉ-FABRICAÇÃO

De acordo com El Debs (2000, p. 5, grifo do autor), “A **pré-moldagem** é caracterizada como um processo de construção em que a obra, ou parte dela, é moldada fora de seu local de utilização definitivo. Frequentemente, a pré-moldagem é relacionada a outros dois termos: a pré-fabricação e a industrialização da construção.”.

A pré-fabricação e a pré-moldagem, embora estejam relacionadas, são conceitos distintos. A pré-fabricação resulta da pré-moldagem, quando esta é aplicada à produção em grandes escalas, e a pré-fabricação é uma forma de buscar a industrialização da construção. Pode-se destacar que a industrialização da construção abrange todas as partes da obra e independe dos materiais empregados, enquanto a pré-fabricação e a pré-moldagem estão relacionadas às estruturas, fechamentos ou elementos em concreto (EL DEBS, 2000, p. 11).

Rodrigues e Agopyan (1991, p. 2), por sua vez, definem pré-fabricados e pré-moldados da seguinte maneira:

Pré-fabricados: elemento que é executado fora do local de utilização definitivo da estrutura, produzido em usina ou instalações laboratoriais permanentes para o controle de qualidade, que deve abranger pelo menos as seguintes etapas da produção: fôrmas, armadura, mistura e lançamento do concreto, armazenamento, transporte e montagem.

Pré-moldados: elemento que é executado fora do local de utilização definitivo da estrutura, produzido em condições menos rigorosas de controle de qualidade, sem a necessidade de pessoa, laboratório e instalações congêneres próprias.

Algumas das vantagens do emprego de elementos pré-moldados, citadas por El Debs (2000, p. 27), são as facilidades da produção dos elementos e da eliminação ou redução do cimbramento devido à execução de parte da estrutura fora do seu local de utilização

definitivo. Outras vantagens, também decorrentes das facilidades de execução, são ainda citadas por esse autor para o caso da produção em grandes séries, em fábricas, tais como “[...] grande reutilização das fôrmas, emprego da protensão com armadura pré-tracionada, emprego de seções com melhor aproveitamento dos materiais, maior produtividade da mão de obra e maior controle de qualidade.”.

El Debs (2000, p. 3) reforça algumas vantagens:

Com a utilização do concreto pré-moldado pode-se atuar no sentido de reduzir o custo dos materiais das estruturas de concreto, basicamente o concreto e armadura. Entretanto, é na parcela relativa às fôrmas e ao cimbramento, normalmente de maior peso no custo do concreto armado, que ela é mais significativa.

Rodrigues e Agopyan (1991, p. 1) descrevem outras vantagens do emprego de elementos pré-moldados:

[...] permite otimizar a mão de obra, trazendo para a construção civil os conceitos das linhas de montagem das modernas indústrias de base e bens de consumo, racionalizando o uso dos materiais e, o que é mais importante, trazendo consigo a necessidade de controlar e garantir a qualidade.

Segundo El Debs (2000, p. 27), as desvantagens, que desfavorecem o uso da pré-moldagem, “[...] são aquelas decorrentes da colocação dos elementos nos locais definitivos de utilização e da necessidade de prover a ligação entre os vários elementos que compõem a estrutura.”, no qual, El Debs (2000, p. 23) menciona que “As ligações entre os elementos pré-moldados se constituem em uma das principais diferenças entre as estruturas formadas por elementos pré-moldados e as estruturas de concreto moldado no local.”.

A área de utilização do concreto pré-moldado é bastante amplo. Ele abrange praticamente todos setores da construção civil, como, por exemplo, edificações, construção pesada (pontes de grande porte, túneis, obras portuárias, etc.) e infraestrutura urbana e de estradas (muros de arrimo, pontes de pequeno porte, canais, reservatórios) (EL DEBS, 2000).

## 3.2 PROTENSÃO

Segundo Moraes<sup>1</sup> (1999 apud EMERICK, 2005, p. 2):

[...] as normas atuais definem como peças estruturais de concreto protendido aquelas que, por meio de aplicação de forças, tornam-se comprimidas de forma a eliminar total ou parcialmente as tensões de tração quando colocadas em serviço. A eliminação das tensões de tração que podem dar origem à formação de fissuras representava o principal objetivo da protensão, obtendo-se uma construção de maior qualidade, reduzindo-se, por meio da protensão completa, o perigo da corrosão. Modernamente, com o desenvolvimento da teoria de fissuração, tornou-se possível conviver com o controle da abertura de fissuras, obtendo-se construções satisfatórias com custos menores, admitindo-se os Estados Limites de Serviço.

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 4) define elementos de concreto protendido:

Aqueles nos quais parte das armaduras é previamente alongada por equipamentos especiais de protensão com a finalidade de, em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura e propiciar o melhor aproveitamento de ações de alta resistência no estado limite último (ELU).

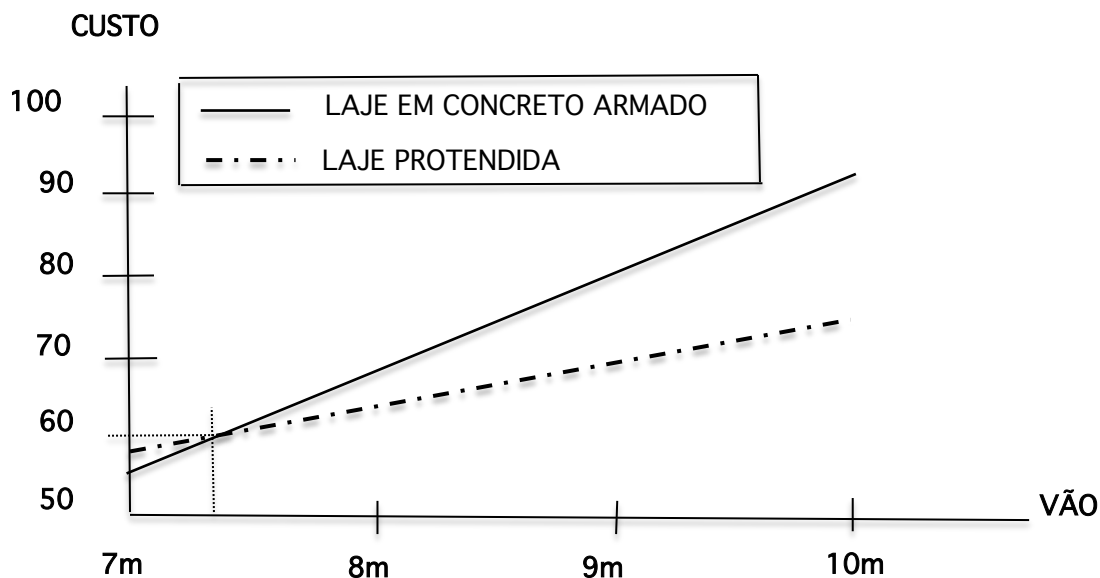
Emerick (2005, p. 1) explicita algumas vantagens do emprego de elementos protendidos:

- a) possibilidade de vencer vãos maiores com lajes mais esbeltas, o que permite maior liberdade arquitetônica e redução do número de pilares, com consequente aumento na área útil e no número de vagas em estacionamentos;
- b) possibilidade de trabalhar com lajes de menor espessura, suprimindo o uso de vigas o que permite redução na altura total da edificação, e consequente diminuição da carga nas fundações e/ou maior número de pavimentos para uma altura fixa;
- c) maior velocidade na desforma e retirada de escoramentos, possibilitando ganhos significativos no tempo de execução da estrutura;
- d) redução de flechas e fissuração nas lajes;
- e) economia, em relação às estruturas em concreto armado em vãos superiores a 7 metros conforme ilustra a [...] [figura 2].

---

<sup>1</sup> MORAES, M. C. **Concreto protendido**: introdução ao uso de cordoalha engraxada plastificada. Brasília: [s. n.], 1999. Caderno de Estrutura n. 14.

Figura 2 – Comparação de custos entre lajes protendidas e convencionais em concreto armado



(fonte: EMERICK, 2005, p. 3)

Para o controle de qualidade da armadura protendida, Rodrigues e Agopyan (1991, p. 12) indicam:

- a) verificação quanto à limpeza e oxidação;
- b) verificação de tipos, quantidades, dimensões e locações de fios e cordoalhas e respectivas tolerâncias;
- c) tolerâncias das dimensões, locações, tolerâncias e estanqueidade dos isolamentos de cordoalhas especificados no projeto;
- d) verificação dos dispositivos de ancoragem e tração de fios ou cordoalha;
- e) verificação das dimensões e posição dos calços e outros dispositivos de manutenção da pré-tração dos fios ou cordoalha;
- f) verificação da força de tração aplicada e do alongamento dos fios e cordoalhas de acordo com as especificações de projeto e respectivas tolerâncias; e,
- g) verificação das condições de alívio da fixação das ancoragens.

### 3.3 LAJES ALVEOLARES

Entre os tipos de elementos de concreto pré-moldado, os painéis alveolares são os elementos mais utilizados no mundo. Sua produção é de aproximadamente de 150 milhões de metros



cúbicos por ano. Os painéis alveolares tiveram origem na Alemanha e vem continuamente evoluindo ao longo dos anos, com relação à altura e ao vão, em termos de dimensões (EL DEBS, 2000, p. 384).

As lajes alveolares, que também podem ser chamadas de lajes vazadas ou ocas, recebem estas denominações por apresentarem alvéolos (vazios) longitudinais, que podem ser com seção transversal de forma circular, oval, **pseudoelíptica**, retangular, etc. Estes tipos de lajes podem, ou não, ter previsão do uso de uma capa de concreto moldado no local para formar uma seção composta (EL DEBS, 2000, p. 254).

Quanto a produção desses elementos, podem ser produzidos em fôrmas fixas, embora, geralmente, sejam executados por extrusão ou por fôrmas deslizantes, em pistas de concretagem. Após serem produzidos ao longo da pista, os elementos são serrados para se obter os comprimentos desejados (EL DEBS, 2000, p. 254). A produção das lajes alveolares em pistas de concretagem garantem um maior controle do concreto utilizado, assegurando uma maior uniformidade do concreto (SILVA, 1994, p. 121).

As dimensões dos vãos para os quais as lajes alveolares são empregados variam entre 5 e 15 metros. Geralmente, a largura é de 1,0 ou 1,20 metros podendo chegar a 2,50 metros. Quanto às alturas, normalmente variam entre 15 até 30 centímetros podendo, em casos especiais, chegar a valores de até 50 centímetros (EL DEBS, 2000, p. 254).

Geralmente, as lajes alveolares são constituídas apenas por armadura ativa, presentes na parte inferior da laje e, muitas vezes, na mesa superior. A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 4) define armadura ativa de protensão como “Constituída por barra, fios isolados ou cordoalhas, destinada à produção de forças de protensão, isto é, na qual se aplica um pré-alongamento inicial.”.

El Debs (2000, p. 255) demonstra algumas particularidades sobre a armação de lajes alveolares:

Em geral, não há armadura para resistir à força cortante e nem para solicitações na direção transversal, o que obriga a contar com a resistência à tração do concreto para resistir a essas solicitações. Destaca-se também que, devido ao processo de execução, a colocação de armaduras adicionais é praticamente inviável e a colocação de conectores metálicos é utilizada em situações particulares.

## 4 DEFORMAÇÕES

Neste capítulo, são abordados os conceitos e métodos matemáticos para a obtenção dos valores de retração, fluência e flechas.

### 4.1 RETRAÇÃO

Neste item são apresentados o conceito e o método de cálculo da retração no concreto.

#### 4.1.1 Conceituação

Segundo Sússekind (1983, p. 18), a retração é um fenômeno no qual ocorre à expulsão da água que não foi quimicamente associada ao concreto, quando este material sofre o processo de cura, ocasionando uma redução no volume da peça de concreto. A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 192) estabelece que o valor da retração do concreto depende da:

- a) umidade relativa do ambiente;
- b) consistência do concreto no lançamento;
- c) espessura fictícia da peça<sup>2</sup>.

Segundo Sússekind (1983, p. 18):

No processo da retração, a água é inicialmente expulsa das fibras externas o que, criando condições de deformação diferenciais entre a periferia e o miolo, gera tensões (auto-equilibradas em seu conjunto) capazes de provocar fissuração (fissuração = ruptura localizada por tração) do concreto, no caso de não ser colocada uma armação visando a prevenir esta ocorrência.

Sússekind (1983, p. 18-19) apresenta um fenômeno inverso ao de retração, denominado inchamento do concreto, no qual o estudo de tal fenômeno visa a neutralizar os efeitos da retração:

---

<sup>2</sup> Espessura fictícia da peça, definida pela NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 195) com a fórmula 6, apresentada adiante.

Fenômeno inteiramente análogo ao da retração, só que inverso, sendo por este motivo citado no presente tópico, é aquele que ocorrerá se mergulharmos na água a peça de concreto: neste caso, a mesma absorverá parte desta água, sofrendo aumento de volume, a que denominamos “inchamento”. Isto nos dá, *a priori*, a noção de que, mantendo-se encharcada durante algum tempo a peça recém concretada, poderemos estar neutralizando os efeitos da retração (ao menos em parte); esta ideia gera uma etapa fundamental na execução de estruturas de concreto, que é sua “cura” após a concretagem, comentada nos próximos parágrafos.

A retração e o inchamento do concreto foram bastante analisados experimentalmente nos últimos tempos, sendo seus valores numéricos obtidos a partir da [...] [fórmula 1], calcada nos ábacos (de origem de experimental) apresentados nas figuras [...] [3 à 6].

Tais ábacos explicitam ser a retração tanto mais intensa quanto mais seco for o meio ambiente, menos espessa a peça, maior o fator água-cimento e o consumo de cimento no concreto. Deles chegamos à definição, através de [...] [fórmula 1], da deformação específica  $\varepsilon_{cs}$  que a retração imporá à peça de concreto [...]

A fórmula 1 é dada por:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_r \cdot k_b \cdot k_e \cdot k_p \cdot k_t \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

$\varepsilon_{cs}$  = deformação específica, num instante genérico, devida à retração, ao nível do centro de gravidade da armadura (da área) da peça;

$\varepsilon_r$  = depende das condições climáticas (função da umidade do meio ambiente) sendo dado pela figura 3;

$k_b$  = coeficiente que depende da composição do concreto, fornecido pela figura 4 (em função do consumo de cimento por m<sup>3</sup> de concreto e do fator água-cimento);

$k_e$  = coeficiente que depende da espessura fictícia  $h_{fic}$  da peça, definida a seguir, e dado pela figura 5 (define-se como “espessura fictícia  $h_{fic}$ ” de uma peça o quociente da área  $A$  de sua seção por seu semiperímetro  $p/2$  em contato com a atmosfera. É fácil verificar que, quando uma das dimensões da seção considerada é muito grande, a espessura fictícia é praticamente igual à real, daí tal definição);

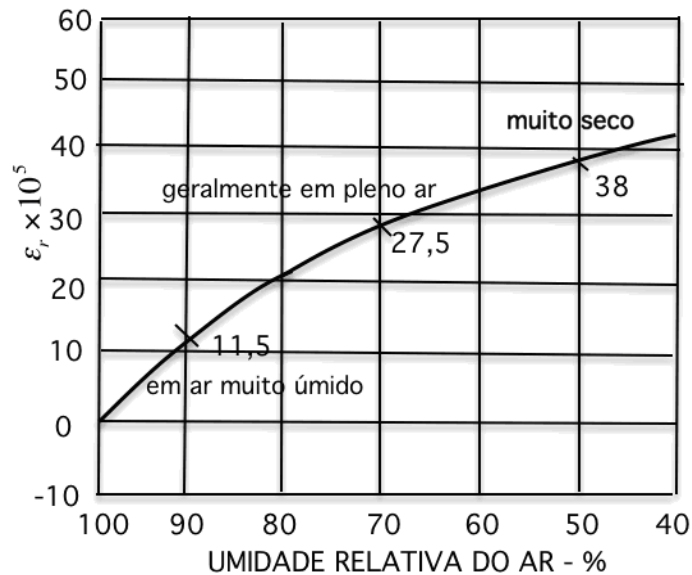
$k_p$  = coeficiente que depende da percentagem geométrica  $p = \frac{100A_s}{A}$  da armadura longitudinal (de área  $A_s$ ) em relação à seção da peça (de área  $A$ ), dado pela fórmula 2:

$$k_p = \frac{100}{100 + np} \quad (\text{fórmula 2})$$

sendo  $n$  a relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto, podendo seu valor, numa primeira aproximação, ser tomado igual a 20, já levada em consideração a influência da deformação lenta;

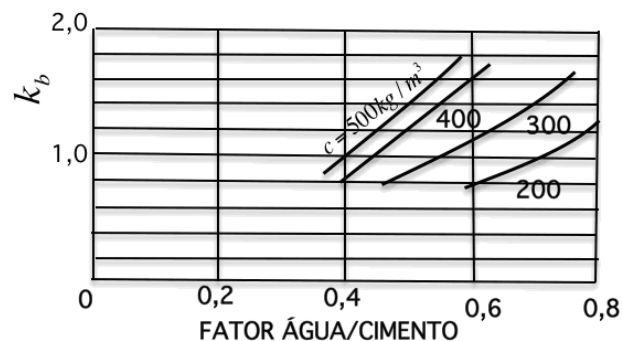
$k_t$  = coeficiente que quantifica o desenvolvimento da retração com o tempo figura 6.

Figura 3 – Valor de  $\varepsilon_r$  (umidade)

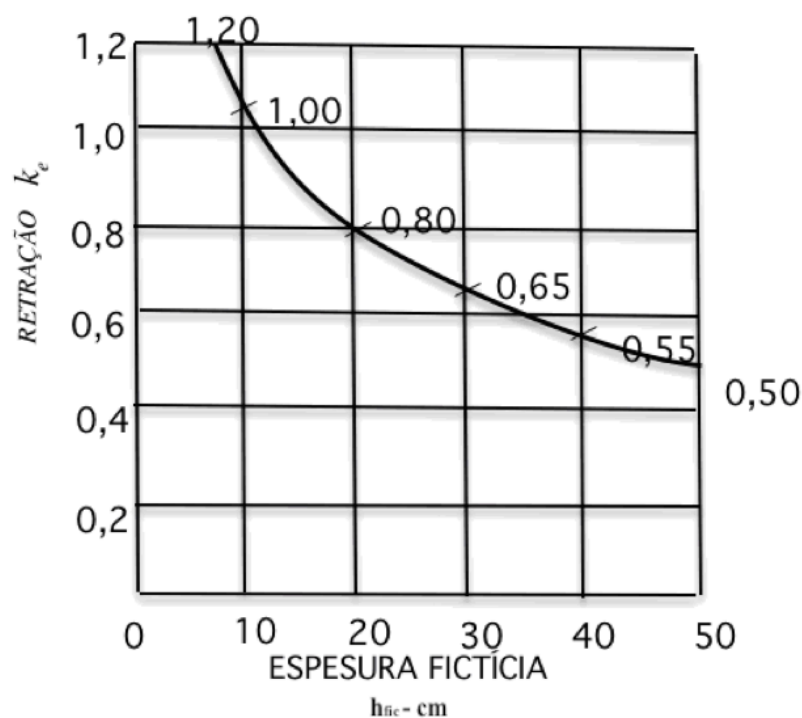


(fonte: SÜSSEKIND, 1983, p. 20)

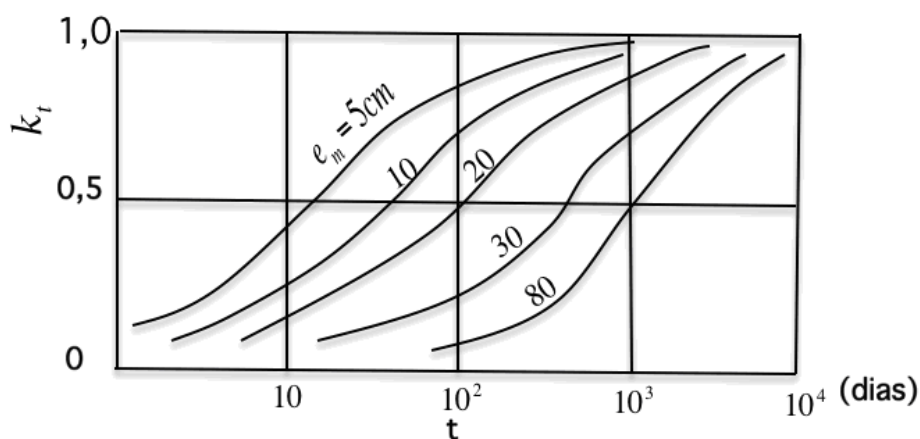
Figura 4 – Coeficiente  $k_b$  (composição do concreto)



(fonte: SÜSSEKIND, 1983, p. 21)

Figura 5 – Coeficiente  $k_e$  (espessura fictícia)

(fonte: SÜSSEKIND, 1983, p. 21)

Figura 6 – Coeficiente  $k_t$  (tempo)

(fonte: SÜSSEKIND, 1983, p. 22)

Segundo Sússekind (1983, p. 20):

[...] quanto mais pudermos retardar o início da retração através de uma boa cura (manutenção da umidade do concreto fresco, usando-se, para tal, cobrir a peça com panos ou sacos encharcados, visando evitar a expulsão prematura da água quimicamente inerte), menor será o valor  $\Delta \epsilon_{cs}$  da deformação específica efetiva que teremos devido à retração. Em muitos casos aplica-se, com esta finalidade, sobre as superfícies em contato com o ar uma emulsão à base de parafina (denominada anti-sol).

### 4.1.2 Valor da retração

Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 193-194), o cálculo para obtenção do valor da retração é dado da seguinte maneira. Entre os instantes  $t_0$  e  $t$ , a retração é dada pela fórmula 3:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs\infty} [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

$\varepsilon_{cs\infty}$  = valor final da retração (fórmula 4);

$\beta_s(t)$  (fórmula 8) ou  $\beta_s(t_0)$  = coeficiente relativo à retração, no instante  $t$  ou  $t_0$  (figura 7);

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

$t_0$  = idade fictícia do concreto no instante em que o efeito da retração na peça começa a ser considerado, em dias.

Assim o valor final da retração é dado por:

$$\varepsilon_{cs\infty} = \varepsilon_{1s} \varepsilon_{2s} \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

$\varepsilon_{1s}$  = coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente e da consistência do concreto (tabela 1);

$\varepsilon_{2s}$  = coeficiente dependente da espessura fictícia da peça dada pela fórmula 5:

$$\varepsilon_{2s} = \frac{33 + 2h_{fic}}{20,8 + 3h_{fic}} \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

$h_{fic}$  é a espessura fictícia, em centímetros, calculada com a fórmula 6:

$$h_{fic} = \gamma \frac{2A_c}{u_{ar}} \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

$\gamma$  = coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente ( $U\%$ ) (tabela 1), calculado pela fórmula 7:

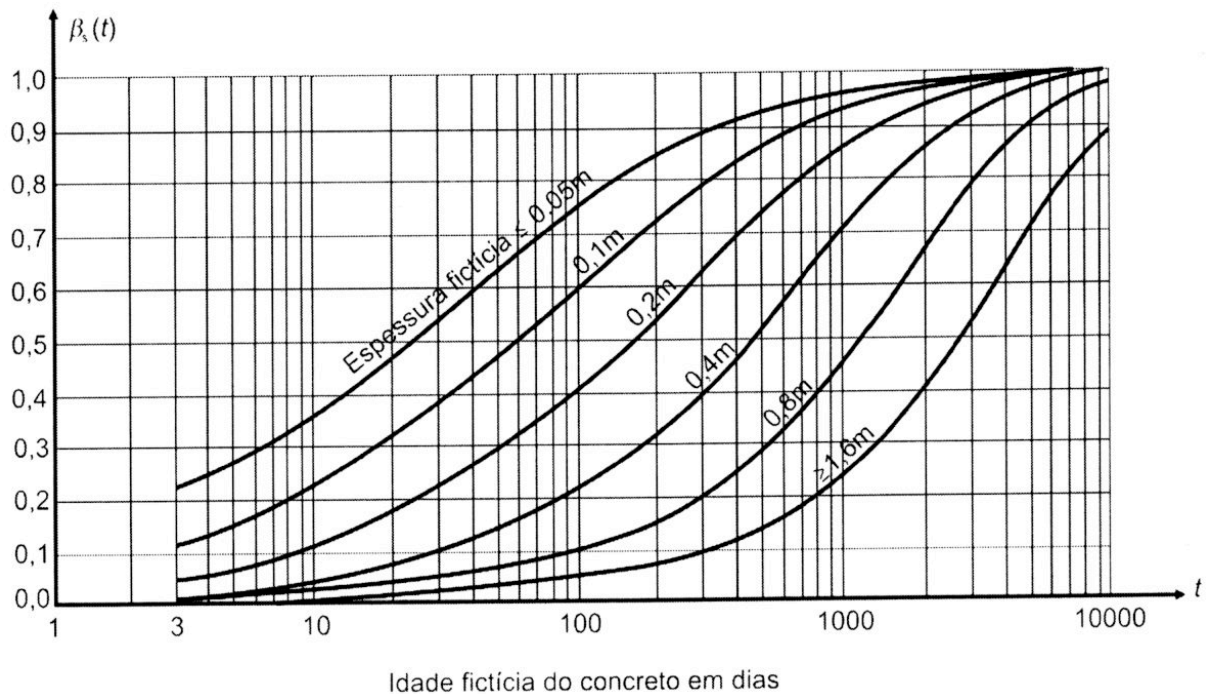
$$\gamma = 1 + \exp(-7,8 + 0,1U) \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

$A_c$  = área da seção transversal da peça;

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

Figura 7 – Variação de  $\beta_s(t)$



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 193)

Tabela 1 – Valores numéricos usuais para a determinação da fluência e da retração

Ambiente	Umidade U %	Fluência $\varphi_{1c}$ <sup>2)3)</sup>			Retração $10^4 \varepsilon_{1s}$ <sup>2)3)</sup>			$\gamma$ <sup>4)</sup>
		Abatimento de acordo com a ABNT NBR NM 67 cm						
		0 - 4	5 - 9	10-15	0 - 4	5 - 9	10 - 15	
Na água	-	0,6	0,8	1,0	1,0	1	1	30
Em ambiente muito úmido imediatamente acima da água	90	1	1,3	1,6	-1	-1,3	-1,6	5
Ao ar livre, em geral	70	1,5	2	2,5	-2,5	-3,2	-4	1,5
Em ambiente seco	40	2,3	3	3,8	-4	-5,2	-6,5	1

<sup>1)</sup>  $\varphi_{1c} = 4,45 - 0,035$  para abatimento no intervalo de 5 cm a 9 cm e  $U \leq 90\%$ .

<sup>2)</sup>  $10^4 \varepsilon_{1s} = -6,16 - (U / 484) + (U^2 / 1590)$  para abatimentos de 5 cm a 9 cm e  $U \leq 90\%$ .

<sup>3)</sup> Os valores de  $\varphi_{1c}$  e  $\varepsilon_{1c}$  para  $U \leq 90\%$  e abatimento entre 0 cm e 4 cm são 25% menores e para abatimentos entre 10 cm e 15 cm são 25% maiores.

<sup>4)</sup>  $\gamma = 1 + \exp(-7,8 + 0,1U)$  para  $U \leq 90\%$ .

#### NOTAS

1 Para efeito de cálculo, as mesmas expressões e os mesmos valores numéricos podem ser empregados no caso de tração.

2 Para o cálculo dos valores de fluência e retração, a consistência do concreto é aquela correspondente à obtida com o mesmo traço sem a adição de superplastificantes e superfluidificantes.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 193)

E, finalmente, tem-se o coeficiente relativo à retração dado pela fórmula 8:

$$\beta_s(t) = \frac{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + A\left(\frac{t}{100}\right)^2 + B\left(\frac{t}{100}\right)}{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + C\left(\frac{t}{100}\right)^2 + D\left(\frac{t}{100}\right) + E} \quad (\text{fórmula 8})$$

Onde:

$$A = 40;$$

$$B = 116h^3 - 282h^2 + 220h - 4,8;$$

$$C = 2,5h^3 - 8,8h + 40,7;$$

$$D = -75h^3 - 585h^2 + 496h - 6,8;$$

$$E = -169h^4 + 88h^3 + 584h^2 - 39h + 0,8;$$



$h_{fic}$  = espessura fictícia, em metros; para valores de  $h_{fic}$  fora do intervalo ( $0,05 \leq h_{fic} \leq 1,6$ ), adotam-se os extremos correspondentes;

$t$  = tempo, em dias ( $t \geq 3$ ).

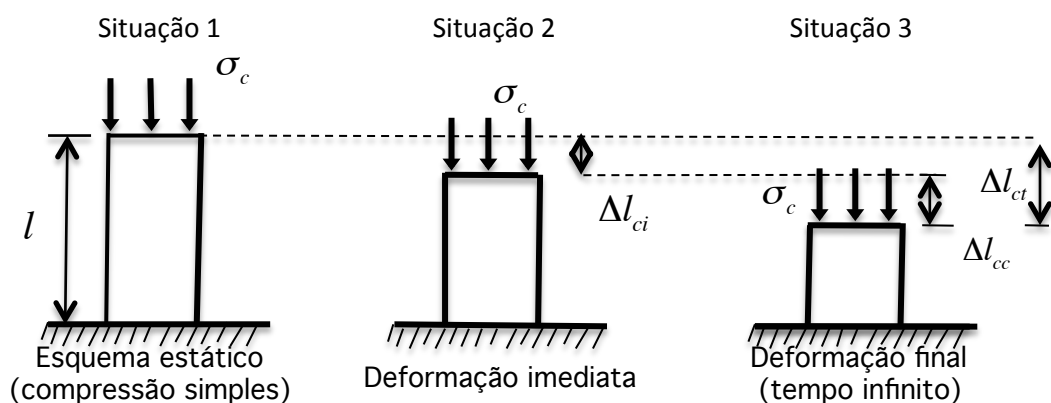
## 4.2 DEFORMAÇÃO LENTA (FLUÊNCIA)

Neste item são apresentados o conceito e o método de cálculo da deformação lenta causada pela aplicação de cargas nas estruturas de concreto.

### 4.2.1 Conceituação

Devido às constatações práticas de que elementos de concreto armado, após a retirada do escoramento, apresentavam um certo valor de flecha e com o passar do tempo, sem nenhum acréscimo de carga, esse valor tinha uma variação significativa, engenheiros e pesquisadores, principalmente os que trabalham com concreto protendido, no qual as consequências são maiores, fizeram experimentos para explicar esse fenômeno. Este fenômeno foi denominado deformação lenta (ou fluência) e se explica com o auxílio da figura 8 (SÜSSEKIND, 1983, p. 30).

Figura 8 – Deformação lenta



(fonte: SÜSSEKIND, 1983, p. 30)

Seja uma peça de concreto submetida a uma pressão de valor constante ao longo do tempo e igual a  $\sigma_c$  (figura 8). No instante em que é aplicado o carregamento, a peça sofrerá uma deformação imediata, reduzindo seu volume devido ao deslocamento de água quimicamente inerte, existente no concreto, para regiões nas quais sua evaporação já tenha ocorrido. Assim,

verifica-se que, ao longo do tempo, ocorre um processo análogo ao de retração, em que, mantendo-se constante o carregamento  $\sigma_c$  sobre a peça, há um crescimento da deformação inicial  $\Delta l_{ci}$  até um máximo  $\Delta l_{ct}$  no tempo infinito (SÜSSEKIND, 1983, p. 30-31).

Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 189), “A deformação rápida ( $\varepsilon_{cca}$ ) é irreversível e ocorre durante as primeiras 24 h após a aplicação da carga que a originou. A deformação lenta é por sua vez composta por duas outras parcelas: a deformação lenta irreversível ( $\varepsilon_{ccf}$ ) e a deformação reversível ( $\varepsilon_{ccd}$ ).”.

Usa-se a fórmula 9 para o cálculo da deformação específica e, da figura 8, situação 3, tem-se a fórmula 10 para o cálculo da deformação final no tempo infinito (SÜSSEKIND, 1983, p. 31):

$$\varepsilon_{ci} = \frac{\Delta l_{ci}}{\ell} = \frac{\sigma_c}{E_s} \quad (\text{fórmula 9})$$

Onde:

$\varepsilon_{ci}$  = deformação específica imediata do concreto devida à aplicação do carregamento;

$\Delta l_{ci}$  = deformação imediata (cm);

$\ell$  = altura da peça de concreto (cm);

$\sigma_c$  = valor do carregamento (kN/cm<sup>2</sup>);

$E_s$  = módulo de elasticidade secante do concreto (kN/cm<sup>2</sup>).

Assim, a deformação final no tempo infinito é dada por:

$$\Delta l_{ct} = \Delta l_{ci} + \Delta l_{cc} \quad (\text{fórmula 10})$$

Onde:

$\Delta l_{ct}$  = deformação máxima no tempo infinito (cm);

$\Delta l_{ci}$  = deformação imediata (cm);

$\Delta l_{cc}$  = deformação lenta (cm).

Dividindo a fórmula 10 por  $l$ , tem-se a fórmula 11:

$$\varepsilon_{ct} = \varepsilon_{ci} + \varepsilon_{cc} \quad (\text{fórmula 11})$$

Onde:

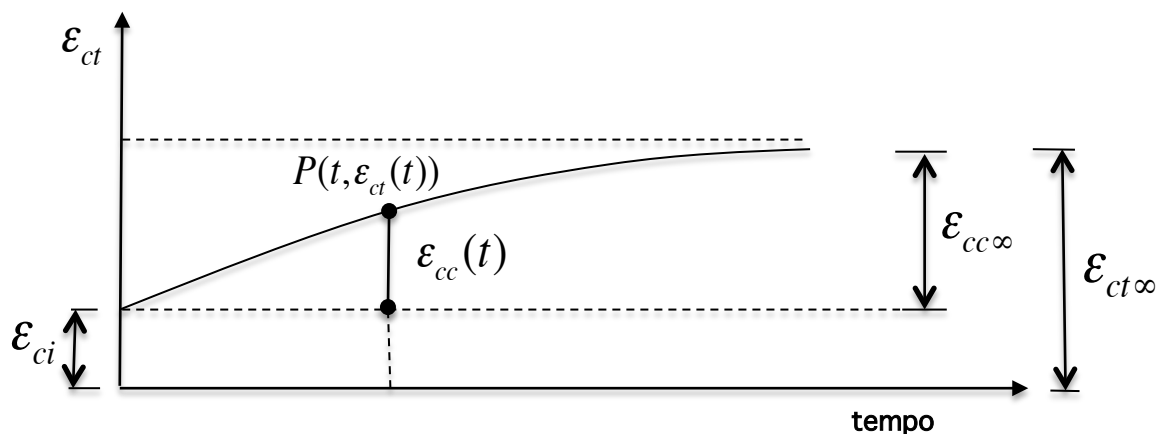
$\varepsilon_{ci}$  = deformação específica imediata do concreto devida à aplicação do carregamento;

$\varepsilon_{cc}$  = acréscimo de  $\varepsilon_{ci}$  ao longo do tempo, denominado deformação lenta (mantido constante o carregamento);

$\varepsilon_{ct}$  = deformação específica total observada, igual à soma da deformação imediata com a deformação lenta.

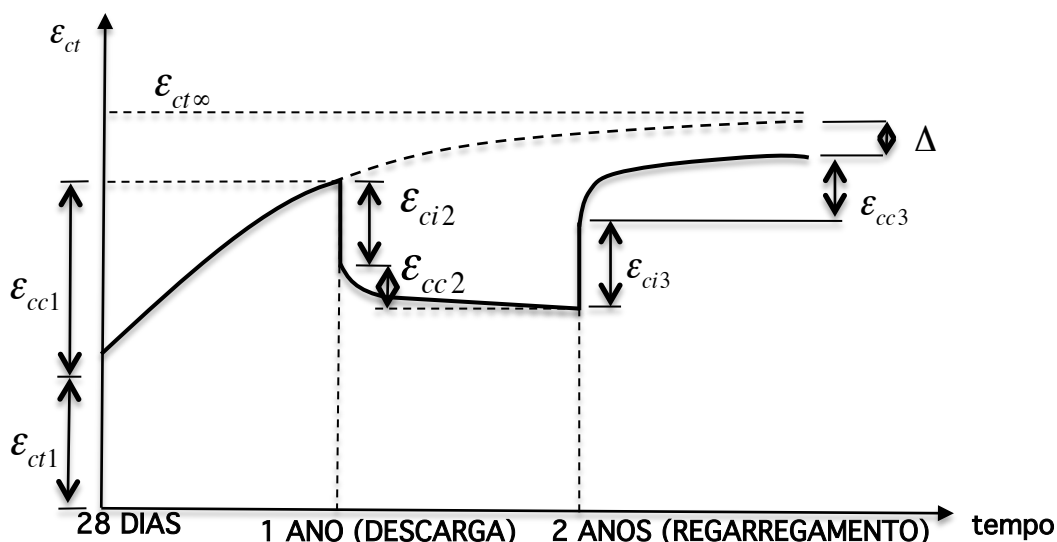
Semelhante ao caso de retração do concreto, a deformação lenta é mais rápida no início, movendo-se com tendência assintótica com o tempo, chegando à deformação final após um período de 2 a 3 anos. Na figura 9 é apresentada a variação da deformação específica total  $\varepsilon_{ct}$  ao longo do tempo. O experimento, representado na figura 10, demonstra o comportamento da deformação lenta caso haja uma descarga do carregamento e, após um ano, um recarregamento, comparando os resultados com as de uma peça com carregamento constante.

Figura 9 – Evolução da deformação total com o tempo



(fonte: SÜSSEKIND, 1983, p. 31)

Figura 10 – Ensaio de carga – descarga – recarga, para análise da deformação lenta



(fonte: SÜSSEKIND, 1983, p. 32)

Süssekind (1983, p. 32-33) explica o experimento (figura 10) da seguinte maneira:

Carregou-se uma peça como a da [...] [figura 8], aos 28 dias de idade, mantendo-se o carregamento constante até 1 ano após a execução da mesma. Conforme já visto anteriormente, no início do carregamento ocorreria a deformação imediata  $\varepsilon_{ci1}$ , atingindo-se, a um ano de idade, uma parcela de deformação lenta igual a  $\varepsilon_{cc1}$ . No caso de o carregamento ser mantido constante ao longo do tempo, a deformação seguiria a curva tracejada até atingir o total  $\varepsilon_{ct\infty}$ . Descarregando-se a peça à idade de um ano, ocorrerá um abaixamento imediato  $\varepsilon_{ci2}$  na deformação total (deformação imediata correspondente à retirada do carregamento) e, devido a ele, no tempo decorrido entre um e dois anos, a recuperação de uma parcela de deformação lenta  $\varepsilon_{cc2}$  (facilmente explicável como sendo a deformação lenta “negativa” provocada pela retirada do carregamento, que pode ser considerada um carregamento “negativo”).

Antes de continuar analisando o ensaio, cabe frisar que, se a peça não mais voltasse a ser carregada, a deformação final seria bem próxima daquela então existente à idade de dois anos, o que mostra **ser a deformação lenta uma deformação plástica**: cessada a causa, apenas uma pequena parcela ( $\varepsilon_{cc2}$ ) é “recuperada”, ficando uma deformação residual final apreciável, mesmo tendo-se retirado.

Recarregando a peça com a idade de dois anos, teremos uma deformação imediata  $\varepsilon_{ci3}$  (notar que  $\varepsilon_{ci3} < \varepsilon_{ci2} < \varepsilon_{ci1}$ , já que  $E_{S3} > E_{S2} > E_{S1}$ ), a partir daí ocorrendo a parcela final de deformação lenta, dada por  $\varepsilon_{cc3}$ . No caso, o valor da deformação final  $\varepsilon_{c1}$  será ligeiramente inferior àquele que teríamos se o carregamento não houvesse sido interrompido no período compreendido entre o primeiro e o segundo ano. Isso é de imediata explicação, já que, desta forma, poupou-se à peça o incremento de deformação lenta no período correspondente (“economizou-se” um ano de deformação lenta).

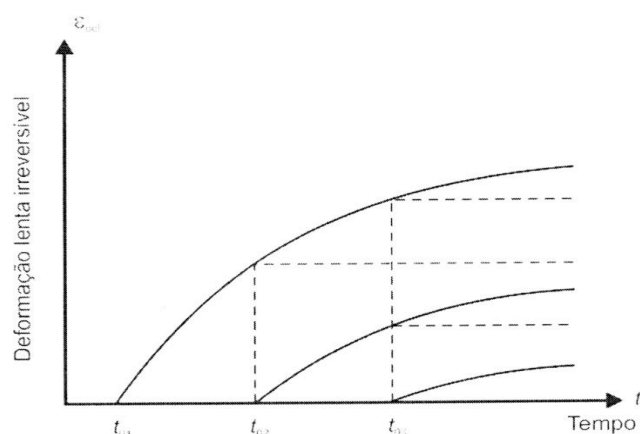
Convém finalmente, frisar que a diferença  $\Delta$  entre os valores de  $\varepsilon_{ct\infty}$  que teríamos caso o carregamento não fosse jamais interrompido e aquele referente à interrupção dada, será tanto maior quanto em mais jovem idade do concreto for feita a descarga, o que se explica pelo fato de a deformação lenta ser muito mais intensa nos primeiros tempos de existência da peça. É costume dizer-se, por isto mesmo, que o

concreto jovem tem excelente “memória” (sendo muito sensível a tudo que ocorre nesta época), diminuindo a mesma ao longo do tempo.

Para a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 190), deve-se admitir as seguintes hipóteses para o cálculo dos efeitos da fluência, quando as tensões no concreto são as de serviço:

- a) a deformação por fluência  $\varepsilon_{cc}$  varia linearmente com a tensão aplicada;
- b) para acréscimos de tensão aplicados em instantes distintos, os respectivos efeitos de fluência se superpõem;
- c) a deformação rápida produz deformações constantes ao longo do tempo; os valores do coeficiente  $\varphi_a$  são função da relação entre a resistência do concreto no momento da aplicação da carga e a sua resistência final;
- d) o coeficiente de deformação lenta reversível  $\varphi_d$  depende apenas da duração do carregamento; o seu valor final e o seu desenvolvimento ao longo do tempo são independentes da idade do concreto no momento da aplicação da carga;
- e) o coeficiente da deformação lenta irreversível  $\varphi_f$  depende de:
  - umidade relativa do ambiente (U);
  - consistência do concreto no lançamento;
  - espessura fictícia da peça
  - idade fictícia da peça no instante da aplicação da carga;
  - idade fictícia do concreto no instante considerado.
- f) para o mesmo concreto, as curvas de deformação lenta irreversível em função do tempo, correspondentes a diferentes idades do concreto no momento do carregamento, são obtidas, umas em relação às outras, por deslocamento paralelo ao eixo das deformações, conforme a [...] [figura 11].

Figura 11 – Variação de deformação lenta irreversível ( $\varepsilon_{ccf}$ )



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 190)

#### 4.2.2 Valor da deformação lenta (fluência)

Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 191-192), o cálculo para obtenção do valor da fluência é dado da seguinte maneira. No instante  $t$  a deformação devida à fluência é dada pela fórmula 12:

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varepsilon_{cca} + \varepsilon_{ccd} + \varepsilon_{ccf} = \frac{\sigma_c}{E_{c28}} \varphi(t, t_0) \quad (\text{fórmula 12})$$

Onde:

$\varepsilon_{cc}(t, t_0)$  = deformação específica imediata do concreto devida à aplicação do carregamento;

$\varepsilon_{cca}$  = deformação rápida irreversível;

$\varepsilon_{ccd}$  = deformação lenta reversível;

$\varepsilon_{ccf}$  = deformação lenta irreversível;

$\sigma_c$  = tensão à compressão no concreto ( $\text{kN}/\text{cm}^2$ );

$\varphi(t, t_0)$  = coeficiente de fluência;

$E_{c28}$  = módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias (MPa), calculado pela fórmula 13:

$$E_{c28} = E_{ci,28} = 5600 f_{ck}^{1/2} \quad (\text{fórmula 13})$$

O coeficiente de fluência, válido também para tração, é dado pela fórmula 14:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_a + \varphi_{f\infty} [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] + \varphi_{d\infty} \beta_d \quad (\text{fórmula 14})$$

Onde:

$t$  = idade fictícia do concreto no instante considerado (dias);

$t_0$  = idade fictícia do concreto ao ser feito o carregamento único (dias);

$\varphi_a$  = coeficiente de fluência rápida, determinado pela fórmula 15:

$$\varphi_a = 0,8 \left[ 1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_\infty)} \right] \quad (\text{fórmula 15})$$

Onde:

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

$\varphi_{f_\infty} = \varphi_{1c} \varphi_{2c}$  = é o valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível;

$\varphi_{1c}$  = coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente  $U$ , em porcentagem, e da consistência do concreto dada pelo tabela 1;

$\varphi_{2c}$  = coeficiente dependente da espessura fictícia  $h_{fic}$  da peça, definida pela fórmula 16:

$$\varphi_{2c} = \frac{42 + h_{fic}}{20 + h_{fic}} \quad (\text{fórmula 16})$$

Onde:

$h_{fic}$  = espessura fictícia, em centímetros, calculada pela fórmula 6;

$\beta_f(t)$  (fórmula 18) ou  $\beta_f(t_0)$  = coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto (figura 12);

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

$\beta_d(t)$  = coeficiente relativo à deformação lenta reversível função do tempo  $(t - t_0)$  decorrido após o carregamento calculado com a fórmula 17:

$$\beta_d(t) = \frac{t - t_0 + 20}{t - t_0 + 70} \quad (\text{fórmula 17})$$

$$\beta_f(t) = \frac{t^2 + At + B}{t^2 + Ct + D} \quad (\text{fórmula 18})$$

Onde:

$$A = 42h^3 - 350h^2 + 588h + 113;$$

$$B = 768h^3 - 3060h^2 + 3234h - 23;$$

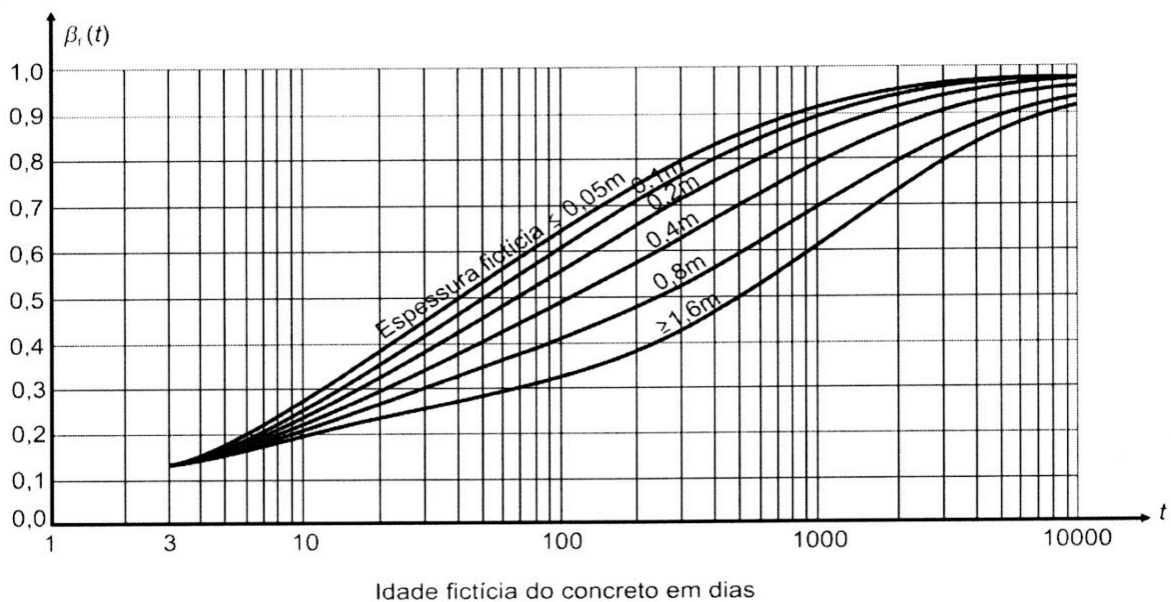
$$C = -200h^3 + 13h^2 + 1090h + 183;$$

$$D = 7579h^3 - 31916h^2 + 35343h + 1931;$$

$h$  = espessura fictícia, em metros; para valores de  $h$  fora do intervalo  $(0,05 \leq h \leq 1,6)$ , adotam-se os extremos correspondentes;

$t$  = tempo, em dias ( $t \geq 3$ ).

Figura 12 – Variação de  $\beta_f(t)$



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 192)

### 4.3 CÁLCULO DAS FLECHAS

De acordo com Araújo (2003, p. 125), “As lajes devem ser projetadas com a espessura mínima suficiente para limitar suas deformações, além de evitar vibrações que causem desconforto aos usuários da edificação.”. Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO



BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 67), as lajes maciças de concreto armado devem ter espessuras mínimas dependendo de sua utilização:

- a) 5 cm para lajes de cobertura não em balanço;
- b) 7 cm para lajes de piso ou de cobertura em balanço;
- c) 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- d) 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN;
- e) 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas,  $\frac{\ell}{42}$  para lajes de piso biapoiadas e  $\frac{\ell}{50}$  para lajes de piso contínuas;
- f) 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo.

Segundo Araújo (2003, p. 126-127):

A NBR-6118 estabelece diversos limites para os deslocamentos dos elementos estruturais. Esses limites são valores práticos determinados de modo a evitar que os deslocamentos da estrutura não causem sensações desagradáveis aos usuários, não impeçam a utilização adequada da construção, nem causem danos em elementos não estruturais. Além disso, esses limites devem garantir a validade da hipótese de pequenos deslocamentos, usualmente admitida na análise estrutural.

Assim, o limite a ser adotado para um deslocamento é função do dano que se quer evitar. Por exemplo, se o objetivo é evitar vibrações que podem ser sentidas no piso, a flecha à carga acidental não deve ultrapassar um determinado limite. Por outro lado, o objetivo pode ser evitar danos em paredes. Neste caso, a flecha da laje, ocorrida após a construção da parede, deve ser limitada.

No caso dos edifícios residenciais e comerciais, basta limitar a flecha provocada pela totalidade das cargas. Isto se deve ao fato de que a carga acidental é pequena em relação à carga permanente. Além disso, a fluência do concreto só é introduzida no cálculo da flecha quando são consideradas as cargas permanentes.

Assim, as flechas das lajes não devem ultrapassar o limite  $l / 250$ , onde  $l$  é o menor vão da laje. Para as lajes em balanço, como as marquises, a flecha na extremidade livre deve ser limitada em  $l / 125$ , onde  $l$  é o comprimento do balanço.

Araújo (2003, p. 127) demonstra as equações necessárias para o cálculo das flechas em lajes. Primeiramente, segundo o mesmo autor, “As flechas devem ser calculadas para a combinação quase permanente do carregamento [...]”, o cálculo do carregamento quase permanente é dado pela fórmula 19:

$$p = g_k + \sum_{i=1}^n \psi_{2i} q_{ki} \quad (\text{fórmula 19})$$

Onde:

$p$  = carregamento quase permanente;

$g_k$  = soma das ações permanentes características;

$\psi_{2i}$  = coeficientes de combinação;

$q_{ki}$  = ações variáveis características.

Araújo (2003, p. 127) simplifica a fórmula 19, do carregamento quase permanente, para o caso de edifícios residenciais. Essa simplificação é dada pela fórmula 20:

$$p = g + 0,3q \quad (\text{fórmula 20})$$

onde se subentende que a carga permanente,  $g$ , e a carga acidental,  $q$ , são tomadas com seus valores característicos.

Segundo o mesmo autor, a flecha final,  $W_{\infty}$ , incluindo a fluência do concreto, pode ser obtida através da relação apresentada pela fórmula 21:

$$W_{\infty} = (1 + \varphi)W_o \quad (\text{fórmula 21})$$

Onde:

$W_{\infty}$  = flecha final;

$\varphi$  = coeficiente de fluência;

$W_o$  = flecha inicial calculada com a carga  $p$  dada na fórmula 22.

Na fórmula 21, é admitido para o cálculo da flecha inicial e para a inclusão da fluência, a ocorrência do estágio I. Assim, para atender as exigências quanto ao estado limite de deformações excessivas, deve-se ter (ARAÚJO, 2003, p. 127):

a)  $W_{\infty} \leq L / 250$ , para lajes não em balanço;

b)  $W_{\infty} \leq L / 125$ , para lajes em balanço.

No caso das lajes em balanço,  $L$  é o comprimento teórico e nos outros casos,  $L$  é o menor vão da laje.

A flecha inicial,  $W_0$ , pode ser obtida com o emprego da fórmula 22 para os casos em que  $L$  é o menor vão da laje, tem-se:

$$W_0 = 0,001 w_c \frac{pL^4}{D} \quad (\text{fórmula 22})$$

Onde:

$W_0$  = flecha inicial;

$p$  = carregamento quase permanente dada na fórmula 19;

$w_c$  = coeficiente fornecido por tabelas;

$L$  = menor vão da laje;

$D$  = rigidez à flexão da laje dada pela fórmula 23:

$$D = \frac{E_{cs} h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (\text{fórmula 23})$$

Onde:

$\nu$  = coeficiente de Poisson do concreto, no qual, adota-se o valor 0,2;

$E_{cs}$  = módulo de deformação longitudinal secante, onde pode ser obtido em função da resistência característica à compressão do concreto;

$h$  = espessura da laje.

Para o cálculo de um carregamento típico de uma laje de edifício residencial, são consideradas as seguintes parcelas (em kN/m<sup>2</sup>) (ARAÚJO, 2003, p. 128):

- a) Carga permanente (*g*)
  - peso próprio:  $25 h$  (com *h* em metros)
  - revestimento: 0,8
- b) Carga acidental:  $q = 1,5$

Nessas condições, o carregamento quase permanente é calculado pela fórmula 24:

$$p = (25h + 0,8) + 0,3 \times 1,5 = 1,25 + 25h \quad (\text{fórmula 24})$$

Onde:

$p$  = carregamento quase permanente (kN/m<sup>2</sup>);

$h$  = espessura da laje (m).

É possível determinar a espessura da laje, considerando o carregamento dado pela fórmula 24, para atender as exigências quanto à flecha. Na tabela 2, estão indicados os resultados correspondentes a espessura das lajes retangulares simplesmente apoiadas nos quatro lados, considerando-se  $f_{ck} = 20$  MPa e  $\phi = 2,5$  (ARAÚJO, 2003, p. 129).

Tabela 2 – Espessuras mínimas das lajes retangulares simplesmente apoiadas nos quatro lados (cm)

$l_x / l_y$	$l_x = 2$	$l_x = 3$	$l_x = 4$	$l_x = 5$	$l_x = 6$
0,5	4,2	6,9	9,8	13,1	16,7
0,6	4	6,4	9,2	12,3	15,6
0,7	3,7	6	8,5	11,4	14,4
0,8	3,5	5,6	7,9	10,5	13,3
0,9	3,2	5,2	7,3	9,7	12,2
1	3	4,8	6,7	8,9	11,2

(fonte: ARAÚJO, 2003, p. 129)

A tabela 2 fornece os valores corretos da espessura se for considerado o mesmo carregamento utilizado na elaboração da laje e se seus apoios forem indeformáveis, caso contrário, a flecha

da laje será maior, devendo-se aumentar sua espessura. De qualquer forma, deve-se respeitar as espessuras mínimas indicadas pela NBR 6118 (ARAÚJO, 2003, p. 129).

## 5 VERIFICAÇÃO DE FLECHA MÁXIMA: CRITÉRIOS PREVISTOS NA NBR 6118/2007

Neste capítulo, são abordados os critérios necessários para o cálculo aproximado das deformações em elementos de concreto armado. Esses critérios são utilizados para o cálculo das flechas nas lajes alveolares objeto do presente estudo.

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 112) estabelece que:

O modelo de comportamento da estrutura pode admitir o concreto e o aço como materiais de comportamento elástico e linear, de modo que as seções ao longo do elemento estrutural possam ter as deformações específicas determinadas no estágio I, desde que os esforços não superem aqueles que dão início à fissuração, e no estágio II, em caso contrário.

No que se refere ao cálculo de flechas, a citada NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 112), determina que se considera, obrigatoriamente, o efeito de fluência no valor do módulo de elasticidade secante  $E_{cs}$ . A Norma prevê que, para se obter o valor do módulo de elasticidade secante, devem ser realizados ensaios. Caso não haja resultados de ensaios e não existam dados precisos sobre o concreto utilizado na idade de 28 dias, se estima o valor do módulo de elasticidade com a fórmula 25 e, para as análises de projeto, o módulo de elasticidade secante utilizado deve ser calculado pela fórmula 26:

$$E_{ci} = 5.600 \cdot f_{ck}^{1/2} \quad (\text{fórmula 25})$$

Onde:

$E_{ci}$  = módulo de deformação tangente inicial (MPa);

$f_{ck}$  = resistência característica do concreto (MPa).

$$E_{cs} = 0,85 \cdot E_{ci} \quad (\text{fórmula 26})$$

Onde:

$E_{cs}$  = módulo de elasticidade secante (MPa);

$E_{ci}$  = módulo de deformação tangente inicial (MPa).

No cálculo da flecha imediata, a Norma utiliza, para uma avaliação aproximada, uma expressão de rigidez equivalente dada pela fórmula 27:

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \cdot \left\{ \left( \frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[ 1 - \left( \frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} \cdot I_c \quad (\text{fórmula 27})$$

Onde:

$I_c$  = momento de inércia da seção bruta do concreto (cm<sup>4</sup>);

$I_{II}$  = momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II (cm<sup>4</sup>), calculado com

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} ;$$

$M_a$  = momento fletor na seção crítica do vão considerado, momento máximo no vão para vigas biapoiadas ou contínuas e momento no apoio para balanços, para a combinação de ações considerada nessa avaliação (kN.cm);

$M_r$  = momento de fissuração do elemento estrutural, cujo valor deve ser reduzido à metade no caso de utilização de barras lisas (kN.cm);

$E_{cs}$  = módulo de elasticidade secante do concreto (kN/cm<sup>2</sup>).

Para o cálculo da flecha diferida no tempo, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 113) estabelece que “A flecha adicional diferida, decorrente das cargas de longa duração em função da fluência, pode ser calculada de maneira aproximada pela multiplicação da flecha imediata pelo fator  $\alpha_f$  dado pela [...] [fórmula 28]”:

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1 + 50\rho'} \quad (\text{fórmula 28})$$

Onde:

$$\rho' = \frac{A_s'}{bd} \quad (\text{fórmula 29})$$

$A_s'$  = área da armadura negativa (m<sup>2</sup>);

$b$  = base da seção transversal da laje (m);

$d$  = altura útil (m);

$\xi$  = coeficiente em função do tempo, que pode ser obtido diretamente na tabela 3 ou ser calculado pelas fórmulas 30, 31 e 32:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0) \quad (\text{fórmula 30})$$

$$\xi(t) = 0,68 \cdot (0,996^t) t^{0,32} \text{ parat } \leq 70 \text{ meses} \quad (\text{fórmula 31})$$

$$\xi(t) = 2 \text{ parat } > 70 \text{ meses} \quad (\text{fórmula 32})$$

Onde:

$t$  = tempo, quando se deseja o valor da flecha diferida (meses);

$t_0$  = idade relativa à data de aplicação da carga de longa duração (meses). No caso de parcelas da carga de longa duração serem aplicadas em idades diferentes, pode-se tomar o valor ponderado a seguir:



$$t_0 = \frac{\sum P_i t_{0i}}{\sum P_i} \quad (\text{fórmula 33})$$

Onde:

$P_i$  = representa as parcelas de carga (kN);

$t_{0i}$  = idade em que se aplicou cada parcela  $P_i$  (meses).

O valor da flecha total deve ser obtido multiplicando a flecha imediata por  $(1 + \alpha_f)$ .

Tabela 3 – Valores do coeficiente  $\xi$  em função do tempo

Tempo (t) meses	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	$\geq 70$
Coeficiente $\xi(t)$	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 113)

## 6 LAJES ALVEOLARES ESTUDADAS

Neste capítulo, são apresentadas as características físicas, tais como dimensões e peso específico, o desempenho com o acréscimo de sobrecarga das lajes alveolares estudadas e os demais dados necessários para os cálculos.

### 6.1 DIMENSÕES DAS LAJES

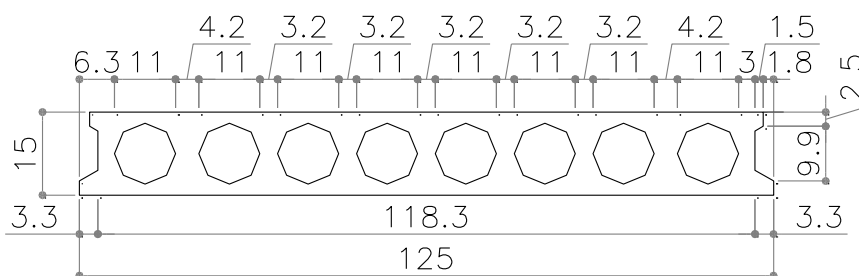
As características das lajes estudadas são apresentadas na tabela 4 e ilustradas nas figuras 13 à 17. Nas figuras 18 e 19 estão demonstradas as posições possíveis para a colocação das cordoalhas em cada uma das lajes. Esses dados foram retirados de um catálogo de um fornecedor de elementos pré-fabricados credenciado no mercado de Porto Alegre, aqui referido como “empresa estudada”.

Tabela 4 – Dados das lajes

LAJE	Altura (cm)	Largura (cm)	Área da seção (m <sup>2</sup> )	Peso (kgf/m <sup>2</sup> )
LP 15	15	125	0,125	240
LP 20	20	125	0,135	260
LP 26,5	26,5	125	0,177	340
LP 32	32	125	0,208	400
LP 40	40	125	0,224	430

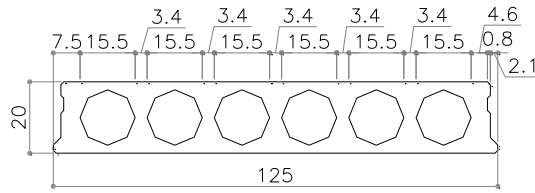
(fonte: empresa estudada)

Figura 13 – Seção transversal da laje LP 15



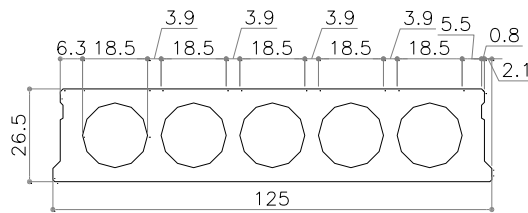
(fonte: empresa estudada)

Figura 14 – Seção transversal da laje LP 20



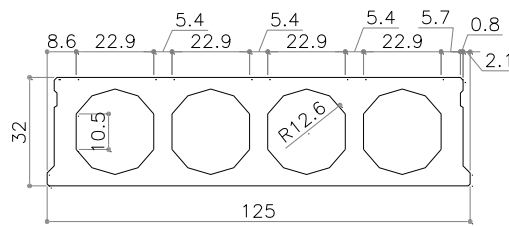
(fonte: empresa estudada)

Figura 15 – Seção transversal da laje LP 26,5



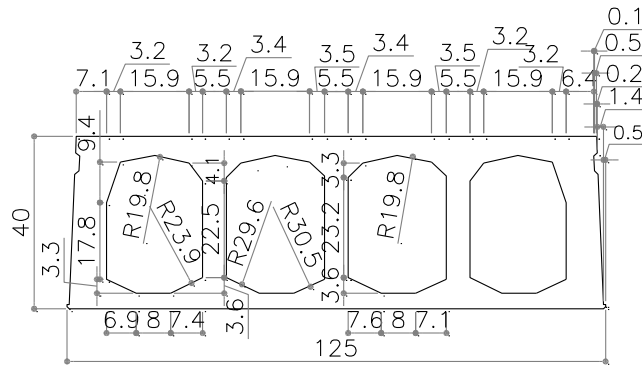
(fonte: empresa estudada)

Figura 16 – Seção transversal da laje LP 32



(fonte: empresa estudada)

Figura 17 – Seção transversal da laje LP 40



(fonte: empresa estudada)



O tipo de aço utilizado nas lajes estudadas é o CP 190 RB com 12,7 mm de diâmetro. As informações sobre o aço são descritas na tabela 5. Quanto às características do concreto utilizado, o valor de resistência considerado é de 35 MPa.

Tabela 5 – Dados das cordoalhas

Cordoalhas	Diâmetro Nominal (mm)	Área Nominal do Aço (mm <sup>2</sup> )	Massa Nominal	Carga de Ruptura Mínima (kN)	Carga Mínima a 1% de Alongamento (kN)	Relaxação Máxima após 1.000 h a 20 C p/ Carga Inicial de	
						70%	80%
						da Carga de Ruptura	
CP. 190 RB	12,7	98,7	775	187,3	168,6	2,5	2,5

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p. 7)

## 6.2 CARREGAMENTO

O catálogo do fabricante analisado apresenta, além das dimensões, uma relação de vãos admissíveis em função da sobrecarga que pode ser aplicada às diferentes lajes, indicadas na tabela 4. Esses dados são indicados na tabela 6 e são utilizados nos cálculos realizados neste estudo.

Tabela 6 – Relação dos vãos máximos com as sobrecargas

Sobrecargas (kn/m <sup>2</sup> )	L15	L20	L26,5	L32	L40
	Vãos livres máximos admissíveis (m)				
5	6,60	8,70	12,50	14,45	17,00
10	5,00	6,20	9,50	11,35	13,50
15	4,10	4,80	7,60	9,50	11,40
20	-	-	6,30	7,95	9,60
25	-	-	5,20	6,70	8,25
30	-	-	4,55	5,80	7,20
35	-	-	4,15	5,10	6,40
40	-	-	-	4,60	5,80

(fonte: empresa estudada)

Para a análise das deformações nas lajes alveolares estudadas são consideradas as sobrecargas apresentadas na tabela 6, multiplicadas por um fator de redução dado pela NBR 6118, apresentados na tabela 7, somados com o peso próprio das lajes. A situação analisada de

carregamento das lajes está ilustrada na figura 20 correspondendo a uma viga bi-apoiada, na qual o momento máximo é dado pela fórmula 34, que é utilizada para os cálculos das flechas nas lajes.

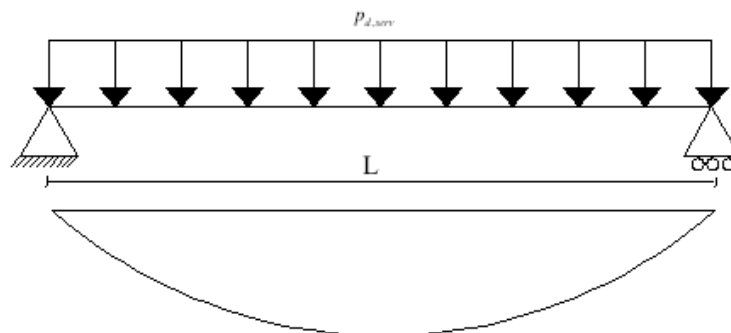
Tabela 7 – Valores do coeficiente  $\gamma_{f2}$

Ações		$\gamma_{f2}$
		$\psi_2$
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas <sup>1)</sup>	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas <sup>2)</sup>	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,6

<sup>1)</sup> Edifícios Residenciais  
<sup>2)</sup> Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 59)

Figura 20 – Situação de carregamento



(fonte: elaborado pelo autor)

Assim, o cálculo do momento máximo nas lajes é dado por:

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{p_{d, serv} \cdot l^2}{8} \quad (\text{f\`ormula 34})$$

Onde:

$M_{m\acute{a}x}$  = momento m\`axima (kN.m);

$p_{d, serv}$  = carregamento de servi\`co (kN/m);

$l$  = v\`ao da laje (m).

## 7 ROTEIRO PARA O CÁLCULO DE DEFORMAÇÕES EM LAJES ALVEOLARES

Este capítulo tem o objetivo de demonstrar, de forma detalhada, os cálculos para a obtenção dos valores das flechas em lajes alveolares. Para a realização desses cálculos são utilizados os dados apresentados nos capítulos anteriores e, com base neles, são realizadas as estimativas das flechas para as lajes estudadas.

Primeiramente, com o valor da resistência do concreto, neste estudo estipulado em 35 MPa, calcula-se o módulo de deformação tangente inicial ( $E_{ci}$ ), demonstrado pela fórmula 35, para a obtenção do módulo de elasticidades secante ( $E_{cs}$ ), fórmula 36. Com o mesmo valor de resistência do concreto calcula-se o valor médio da resistência à tração do concreto ( $f_{ctm}$ ) dado pela fórmula 37:

$$E_{ci} = 5.600 \cdot f_{ck}^{1/2} = 5.600 \cdot (35)^{1/2} = 33130 \text{ MPa} \quad (\text{fórmula 35})$$

Onde:

$E_{ci}$  = módulo de deformação tangente inicial do concreto (MPa);

$f_{ck}$  = valor da resistência do concreto (MPa).

$$E_{cs} = 0,85 \cdot E_{ci} = 0,85 \cdot 33130 = 28160 \text{ MPa} \quad (\text{fórmula 36})$$

Onde:

$E_{cs}$  = módulo de elasticidades secante do concreto (MPa);

$E_{ci}$  = módulo de deformação tangente inicial do concreto (MPa).

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 0,3 \cdot (35)^{2/3} = 3,21 \text{ MPa} \quad (\text{fórmula 37})$$



Onde:

$f_{ctm}$  = valor médio da resistência à tração do concreto (MPa);

$f_{ck}$  = valor da resistência do concreto (MPa).

Para o cálculo do momento de serviço máximo é considerado o caso de uma viga bi-apoiada calculada com a fórmula 34, sendo considerado os vãos e as cargas apresentadas na tabela 6 do capítulo anterior. Com o valor obtido, compara-se com o valor do momento de fissuração com o propósito de analisar se a seção está fissurada. Para essa comparação, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 114) estipula a seguinte condição:

Nos elementos estruturais com armaduras ativas é suficiente considerar  $(EI)_{eq} = E_{cs}I_c$ , desde que não seja ultrapassado o estado limite de formação de fissuras. Caso contrário, a expressão completa [...] [fórmula 27] pode ser aplicada desde que  $I_{II}$ ,  $M_r$  e  $M_a$  sejam calculados considerando o elemento estrutural de concreto submetido à combinação de ações escolhida, acrescida da protensão representada como ação externa equivalente (gerando força normal e momento fletor) [...].

Para a obtenção do valor do carregamento de serviço, utiliza-se a combinação apresentada no quadro 1, retirado da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 62). Essa combinação considera o peso próprio da laje somado com a sobrecarga, informados, respectivamente, nas tabelas 4 e 6 do capítulo anterior, multiplicada pelos coeficientes de ponderação das ações no estado de limite de serviço (ELS) para combinações quase permanente que dependem do tipo de utilização da estrutura, definidos pela NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 62). Tais coeficientes são aqueles que foram apresentados na tabela 7 do capítulo anterior.

Quadro 1 – Combinação de serviço

Combinações de serviço (ELS)	Descrição	Cálculo das solicitações
Combinações quase permanentes de serviço (CQP)	Nas combinações quase permanentes de serviço, todas as ações variáveis são consideradas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \sum \psi_{2j} \cdot F_{qj,k}$
<p>Onde:</p> <p><math>F_{d,ser}</math> é o valor de cálculo das ações para combinações de serviço;</p> <p><math>F_{qk}</math> é o valor característicos das ações variáveis principais diretas;</p> <p><math>\psi_2</math> é o fator de redução de combinação quase permanente para ELS.</p>		

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 62)

Em geral, o coeficiente de ponderação das ações para estados limites de serviço é dado pela expressão (fórmula 38):

$$\gamma_f = \gamma_{f2} \quad (\text{fórmula 38})$$

Onde:

$\gamma_{f2}$  tem valor variável conforme a verificação que se deseja fazer (tabela 7):

$\gamma_{f2} = 1$  para combinações raras;

$\gamma_{f2} = \psi_1$  para combinações frequentes;

$\gamma_{f2} = \psi_2$  para combinações quase permanentes.

A fórmula 39 serve para o cálculo da flecha de curta duração e o valor obtido é utilizado para o cálculo da flecha diferida no tempo dada pela fórmula 40 que depende de outro fator que considera os efeitos de fluência e retração dado pela fórmula 28. O valor da flecha de longa duração é comparado com o valor da flecha máxima admissível que, para os casos estudados, é dada pela fórmula 42, para analisar se a rigidez da laje é adequada:

$$f(t=0) = \frac{5}{384} \cdot \frac{p_{d, serv} \cdot l^4}{E_{cs} \cdot I_{eq}} \quad (\text{fórmula 39})$$

Onde:

$f(t=0)$  = flecha de curta duração (cm);

$p_{d, serv}$  = carga de serviço (combinação quase permanente) (kN/cm);

$l$  = vão da laje considerada (cm);

$E_{cs}$  = módulo de elasticidades secante do concreto (kN/cm<sup>2</sup>);

$I_{eq}$  = momento de inércia equivalente (cm<sup>4</sup>).

$$f(t=\infty) = (1 + \alpha_f) \cdot f(t=0) \quad (\text{fórmula 40})$$

Onde:

$f(t=\infty)$  = flecha de longa duração (cm);

$\alpha_f$  = fator de aproximação de flechas;

$f(t=0)$  = flecha de curta duração (cm).

$$f(t=\infty) \leq \frac{l}{250} \quad (\text{fórmula 41})$$

Onde:

$f(t=\infty)$  = flecha de longa duração (cm);

$l$  = vão da laje considerada (cm).

## 8 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos cálculos das flechas das lajes alveolares estudadas, realizados no programa Microsoft Excel e obtidos com base nos capítulos anteriores. Em seguida, é feita a análise dos resultados comparando-os com os limites estipulados pela NBR 6118, para estabelecer se as lajes estão de acordo com as especificações da Norma.

Os valores referentes ao esforço normal protensão e ao momento de protensão necessários para o cálculo do momento de fissuração de cada laje estudada é apresentado na tabela 8 e, em seguida, a tabela 9 apresenta os valores do momento de fissuração de cada laje para, posteriormente, comparar o valor obtido com o valor do momento de serviço ( $M_d$ ) apresentado nas tabelas 10 à 14 para cada laje.

Tabela 8 – Valores dos esforços de protensão das lajes

Laje	Área Nominal do aço (cm <sup>2</sup> )	$f_{pyd} = 0,90 \cdot 190 / 1,15$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$N_p = A_p \cdot f_{pyd}$ (kN)	$N_p$ (N)	$e_p$ (mm)	$M_p = E_p \cdot N_p$ (N.mm)
LP 15	0,987	148,70	1320,86	1320860	35	46230100
LP 20	0,987	148,70	1027,34	1027340	60	61640400
LP 26,5	0,987	148,70	2054,68	2054680	92,5	190057900
LP 32	0,987	148,70	1614,39	1614390	120	193726800
LP 40	0,987	148,70	1614,39	1614390	160	258302400

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 9 – Valores do momento de fissuração das lajes

Laje	$\alpha_t$	$f_{ctm}$ (MPa)	$N_p$ (N)	Área da seção (mm <sup>2</sup> )	$I_c$ (mm <sup>4</sup> )	$y_t$ (mm)	$M_p$ (N.mm)	$M_r$ (N.mm)
LP 15	1,2	3,21	1320860	125000	291400000	75	46230100	102252309,8
LP 20	1,2	3,21	1027340	135000	663330000	100	61640400	159320124,4
LP 26,5	1,2	3,21	2054680	177000	1651010000	132,5	190057900	374994573,5
LP 32	1,2	3,21	1614390	208000	2873360000	160	193726800	459614945,1
LP 40	1,2	3,21	1614390	224000	4580400000	200	258302400	595337467,6

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 10 – Valores do momento de serviço da laje LP 15

Laje	Peso próprio (kN/cm)	Sobrecarga (kN/cm)	$\psi_2$	$P_{d, serv}$ (kN/cm)	$M_d$ (kN.cm)	$M_r$ (kN.cm)
LP 15	0,00024	0,05	0,3	0,01524	829,81	10225,23
	0,00024	0,1	0,3	0,03024	945	10225,23
	0,00024	0,15	0,3	0,04524	950,60	10225,23
	0,00024	0,05	0,4	0,02024	1102,06	10225,23
	0,00024	0,1	0,4	0,04024	1257,5	10225,23
	0,00024	0,15	0,4	0,06024	1265,79	10225,23
	0,00024	0,05	0,6	0,03024	1646,56	10225,23
	0,00024	0,1	0,6	0,06024	1882,5	10225,23
	0,00024	0,15	0,6	0,09024	1896,16	10225,23

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 11 – Valores do momento de serviço da laje LP 20

Laje	Peso próprio (kN/cm)	Sobrecarga (kN/cm)	$\psi_2$	$P_{d, serv}$ (kN/cm)	$M_d$ (kN.cm)	$M_r$ (kN.cm)
LP 20	0,00026	0,05	0,3	0,01526	1443,78	15932,01
	0,00026	0,1	0,3	0,03026	1453,99	15932,01
	0,00026	0,15	0,3	0,04526	1249,74	15932,01
	0,00026	0,05	0,4	0,02026	1916,84	15932,01
	0,00026	0,1	0,4	0,04026	1934,49	15932,01
	0,00026	0,15	0,4	0,06026	1663,92	15932,01
	0,00026	0,05	0,6	0,03026	2862,97	15932,01
	0,00026	0,1	0,6	0,06026	2895,49	15932,01
	0,00026	0,15	0,6	0,09026	2492,30	15932,01

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 12 – Valores do momento de serviço da laje LP 26,5

Laje	Peso próprio (kN/cm)	Sobrecarga (kN/cm)	$\psi_2$	$P_{d, serv}$ (kN/cm)	$M_d$ (kN.cm)	$M_r$ (kN.cm)
LP 26,5	0,00034	0,05	0,30	0,02	2761,20	37499,46
	0,00034	0,10	0,30	0,03	3422,73	37499,46
	0,00034	0,15	0,30	0,05	3273,55	37499,46
	0,00034	0,20	0,30	0,06	2993,62	37499,46
	0,00034	0,25	0,30	0,08	2546,49	37499,46
	0,00034	0,30	0,30	0,09	2337,83	37499,46
	0,00034	0,35	0,30	0,11	2267,77	37499,46
	0,00034	0,05	0,40	0,02	3661,20	37499,46
	0,00034	0,10	0,40	0,04	4550,86	37499,46
	0,00034	0,15	0,40	0,06	4356,55	37499,46
	0,00034	0,20	0,40	0,08	3985,87	37499,46
	0,00034	0,25	0,40	0,10	3391,49	37499,46
	0,00034	0,30	0,40	0,12	3114,17	37499,46
	0,00034	0,35	0,40	0,14	3021,26	37499,46
	0,00034	0,05	0,60	0,03	5461,20	37499,46
	0,00034	0,10	0,60	0,06	6807,11	37499,46
	0,00034	0,15	0,60	0,09	6522,55	37499,46
	0,00034	0,20	0,60	0,12	5970,37	37499,46
	0,00034	0,25	0,60	0,15	5081,49	37499,46
	0,00034	0,30	0,60	0,18	4666,86	37499,46
0,00034	0,35	0,60	0,21	4528,23	37499,46	

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 13 – Valores do momento de serviço da laje LP 32

Laje	Peso próprio (kN/cm)	Sobrecarga (kN/cm)	$\psi_2$	$P_{d, serv}$ (kN/cm)	$M_d$ (kN.cm)	$M_r$ (kN.cm)
LP 32	0,0004	0,05	0,30	0,02	3773,00	45961,49
	0,0004	0,10	0,30	0,03	4878,02	45961,49
	0,0004	0,15	0,30	0,05	5121,69	45961,49
	0,0004	0,20	0,30	0,06	4771,79	45961,49
	0,0004	0,25	0,30	0,08	4230,88	45961,49
	0,0004	0,30	0,30	0,09	3801,32	45961,49
	0,0004	0,35	0,30	0,11	3426,82	45961,49
	0,0004	0,40	0,30	0,12	3184,58	45961,49
	0,0004	0,05	0,40	0,02	4998,00	45961,49
	0,0004	0,10	0,40	0,04	6482,63	45961,49
	0,0004	0,15	0,40	0,06	6813,88	45961,49
	0,0004	0,20	0,40	0,08	6351,85	45961,49
	0,0004	0,25	0,40	0,10	5633,70	45961,49
	0,0004	0,30	0,40	0,12	5062,82	45961,49
	0,0004	0,35	0,40	0,14	4564,76	45961,49
	0,0004	0,40	0,40	0,16	4242,58	45961,49
	0,0004	0,05	0,60	0,03	7448,00	45961,49
	0,0004	0,10	0,60	0,06	9691,85	45961,49
	0,0004	0,15	0,60	0,09	10198,25	45961,49
	0,0004	0,20	0,60	0,12	9511,98	45961,49
	0,0004	0,25	0,60	0,15	8439,32	45961,49
	0,0004	0,30	0,60	0,18	7585,82	45961,49
	0,0004	0,35	0,60	0,21	6840,63	45961,49
	0,0004	0,40	0,60	0,24	6358,58	45961,49

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 14 – Valores do momento de serviço da laje LP 40

Laje	Peso próprio (kN/cm)	Sobrecarga (kN/cm)	$\psi_2$	$P_{d, serv}$ (kN/cm)	$M_d$ (kN.cm)	$M_r$ (kN.cm)
LP 40	0,00043	0,05	0,3	0,01543	5574,08	59533,74
	0,00043	0,1	0,3	0,03043	6932,33	59533,74
	0,00043	0,15	0,3	0,04543	7380,10	59533,74
	0,00043	0,2	0,3	0,06043	6961,53	59533,74
	0,00043	0,25	0,3	0,07543	6417,44	59533,74
	0,00043	0,3	0,3	0,09043	5859,86	59533,74
	0,00043	0,35	0,3	0,10543	5398,01	59533,74
	0,00043	0,4	0,3	0,12043	5064,08	59533,74
	0,00043	0,05	0,4	0,02043	7380,33	59533,74
	0,00043	0,1	0,4	0,04043	9210,45	59533,74
	0,00043	0,15	0,4	0,06043	9816,85	59533,74
	0,00043	0,2	0,4	0,08043	9265,53	59533,74
	0,00043	0,25	0,4	0,10043	8544,39	59533,74
	0,00043	0,3	0,4	0,12043	7803,86	59533,74
	0,00043	0,35	0,4	0,14043	7190,01	59533,74
	0,00043	0,4	0,4	0,16043	6746,08	59533,74
	0,00043	0,05	0,6	0,03043	10992,83	59533,74
	0,00043	0,1	0,6	0,06043	13766,70	59533,74
	0,00043	0,15	0,6	0,09043	14690,35	59533,74
	0,00043	0,2	0,6	0,12043	13873,53	59533,74
	0,00043	0,25	0,6	0,15043	12798,30	59533,74
	0,00043	0,3	0,6	0,18043	11691,86	59533,74
	0,00043	0,35	0,6	0,21043	10774,01	59533,74
	0,00043	0,4	0,6	0,24043	10110,08	59533,74

(fonte: elaborado pelo autor)

Devido aos valores do momento de serviço de todas as lajes terem resultado em valores inferiores ao do momento de fissuração, as lajes não se encontram fissuradas e a inércia da seção de cada laje pode ser utilizada como a inércia equivalente, de acordo com as especificações da Norma, para o cálculo das flechas de curta duração, apresentando-se os resultados nas tabelas 15 a 19. Estas tabelas contém, também, os valores da flecha de longa duração e os limites para as flechas de acordo com os vãos utilizados.



Tabela 15 – Flechas na laje LP 15

Laje	Pd,serv	VÃO (cm)	f(t=0) (cm)	$\Delta\xi$	ft $\infty$ (cm)	Limite (cm)
LP 15	0,01524	660	0,45	1,16	0,98	2,64
	0,03024	500	0,29	1,16	0,64	2
	0,04524	410	0,20	1,16	0,43	1,64
	0,02024	660	0,60	1,16	1,30	2,64
	0,04024	500	0,39	1,16	0,85	2
	0,06024	410	0,26	1,16	0,57	1,64
	0,03024	660	0,90	1,16	1,95	2,64
	0,06024	500	0,59	1,16	1,28	2
	0,09024	410	0,40	1,16	0,86	1,64

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 16 – Flechas na laje LP 20

Laje	Pd,serv	VÃO (cm)	f(t=0) (cm)	$\Delta\xi$	ft $\infty$ (cm)	Limite (cm)
LP 20	0,01526	870	0,61	1,16	1,31	3,48
	0,03026	620	0,31	1,16	0,67	2,48
	0,04526	470	0,15	1,16	0,33	1,88
	0,02026	870	0,81	1,16	1,74	3,48
	0,04026	620	0,41	1,16	0,89	2,48
	0,06026	470	0,20	1,16	0,44	1,88
	0,03026	870	1,20	1,16	2,61	3,48
	0,06026	620	0,62	1,16	1,34	2,48
	0,09026	470	0,30	1,16	0,66	1,88

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 17 – Flechas na laje LP 26,5

Laje	Pd,serv	VÃO (cm)	f(t=0) (cm)	$\Delta\xi$	f <sub>t∞</sub> (cm)	Limite (cm)
LP 26,5	0,01534	1200	0,89	1,16	1,92	4,8
	0,03034	950	0,69	1,16	1,49	3,8
	0,04534	760	0,42	1,16	0,91	3,04
	0,06034	630	0,26	1,16	0,57	2,52
	0,07534	520	0,15	1,16	0,33	2,08
	0,09034	455	0,11	1,16	0,23	1,82
	0,10534	415	0,08	1,16	0,19	1,66
	0,02034	1200	1,18	1,16	2,55	4,8
	0,04034	950	0,92	1,16	1,98	3,8
	0,06034	760	0,56	1,16	1,21	3,04
	0,08034	630	0,35	1,16	0,76	2,52
	0,10034	520	0,20	1,16	0,44	2,08
	0,12034	455	0,14	1,16	0,31	1,82
	0,14034	415	0,11	1,16	0,25	1,66
	0,03034	1200	1,76	1,16	3,80	4,8
	0,06034	950	1,37	1,16	2,97	3,8
	0,09034	760	0,84	1,16	1,82	3,04
	0,12034	630	0,53	1,16	1,14	2,52
	0,15034	520	0,30	1,16	0,66	2,08
	0,18034	455	0,21	1,16	0,46	1,82
0,21034	415	0,17	1,16	0,37	1,66	

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 18 – Flechas na laje LP 32

Laje	Pd,serv	VÃO (cm)	f(t=0) (cm)	$\Delta\xi$	f $_{t\infty}$ (cm)	Limite (cm)
LP 32	0,0154	1400,00	0,95	1,16	2,06	5,60
	0,0304	1133,00	0,81	1,16	1,74	4,53
	0,0454	950,00	0,60	1,16	1,29	3,80
	0,0604	795,00	0,39	1,16	0,84	3,18
	0,0754	670,00	0,24	1,16	0,53	2,68
	0,0904	580,00	0,16	1,16	0,36	2,32
	0,1054	510,00	0,11	1,16	0,25	2,04
	0,1204	460,00	0,09	1,16	0,19	1,84
	0,0204	1400,00	1,26	1,16	2,72	5,60
	0,0404	1133,00	1,07	1,16	2,31	4,53
	0,0604	950,00	0,79	1,16	1,71	3,80
	0,0804	795,00	0,52	1,16	1,12	3,18
	0,1004	670,00	0,33	1,16	0,70	2,68
	0,1204	580,00	0,22	1,16	0,47	2,32
	0,1404	510,00	0,15	1,16	0,33	2,04
	0,1604	460,00	0,12	1,16	0,25	1,84
	0,0304	1400,00	1,88	1,16	4,06	5,60
	0,0604	1133,00	1,60	1,16	3,46	4,53
	0,0904	950,00	1,18	1,16	2,56	3,80
	0,1204	795,00	0,77	1,16	1,67	3,18
	0,1504	670,00	0,49	1,16	1,05	2,68
	0,1804	580,00	0,33	1,16	0,71	2,32
	0,2104	510,00	0,23	1,16	0,49	2,04
	0,2404	460,00	0,17	1,16	0,37	1,84

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 19 – Flechas na laje LP 40

Laje	Pd,serv	VÃO (cm)	f(t=0) (cm)	$\Delta\xi$	ft $\infty$ (cm)	Limite (cm)
LP 40	0,01543	1700	1,30	1,16	2,81	6,8
	0,03043	1350	1,02	1,16	2,20	5,4
	0,04543	1140	0,77	1,16	1,67	4,56
	0,06043	960	0,52	1,16	1,12	3,84
	0,07543	825	0,35	1,16	0,76	3,3
	0,09043	720	0,24	1,16	0,53	2,88
	0,10543	640	0,18	1,16	0,38	2,56
	0,12043	580	0,13	1,16	0,29	2,32
	0,02043	1700	1,72	1,16	3,72	6,8
	0,04043	1350	1,35	1,16	2,93	5,4
	0,06043	1140	1,03	1,16	2,22	4,56
	0,08043	960	0,69	1,16	1,49	3,84
	0,10043	825	0,47	1,16	1,01	3,3
	0,12043	720	0,32	1,16	0,70	2,88
	0,14043	640	0,23	1,16	0,51	2,56
	0,16043	580	0,18	1,16	0,39	2,32
	0,03043	1700	2,56	1,16	5,54	6,8
	0,06043	1350	2,02	1,16	4,37	5,4
	0,09043	1140	1,54	1,16	3,33	4,56
	0,12043	960	1,03	1,16	2,23	3,84
	0,15043	825	0,70	1,16	1,52	3,3
	0,18043	720	0,49	1,16	1,05	2,88
	0,21043	640	0,35	1,16	0,77	2,56
	0,24043	580	0,27	1,16	0,59	2,32

(fonte: elaborado pelo autor)

Com base nos resultados, é possível perceber que as lajes estão de acordo com as especificações da NBR 6118 tendo suas flechas finais inferiores ao limite estipulado pela norma. As tabelas 20 a 24 mostram os carregamentos máximos para cada situação estudada em que a flecha de longa duração resulta no limite da Norma.

Tabela 20 – Carregamento máximo na laje LP 15

LAJE	VÃO (cm)	P <sub>d,serv</sub> , Máximo (kN/cm)	ft $\infty$ (cm)	LIMITE
LP 15	660,00	0,041	2,64	2,64
	500,00	0,094	2,00	2,00
	410,00	0,170	1,63	1,64

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 21 – Carregamento máximo na laje LP 20

<b>LAJE</b>	<b>VÃO (cm)</b>	<b><math>P_{d, serv}</math>, Máximo (kN/cm)</b>	<b><math>ft_{\infty}</math> (cm)</b>	<b>LIMITE</b>
LP 20	870,00	0,04	3,45	3,48
	620,00	0,11	2,45	2,48
	470,00	0,25	1,84	1,88

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 22 – Carregamento máximo na laje LP 26,5

<b>LAJE</b>	<b>VÃO (cm)</b>	<b><math>P_{d, serv}</math>, Máximo (kN/cm)</b>	<b><math>ft_{\infty}</math> (cm)</b>	<b>LIMITE</b>
LP 26,5	1200,00	0,04	4,79	4,80
	950,00	0,08	3,79	3,80
	760,00	0,15	3,03	3,04
	630,00	0,26	2,52	2,52
	520,00	0,47	2,08	2,08
	455,00	0,70	1,81	1,82
	415,00	0,92	1,65	1,66

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 23 – Carregamento máximo na laje LP 32

<b>LAJE</b>	<b>VÃO (cm)</b>	<b><math>P_{d, serv}</math>, Máximo (kN/cm)</b>	<b><math>ft_{\infty}</math> (cm)</b>	<b>LIMITE</b>
LP 32	1400,00	0,04	5,59	5,60
	1133,00	0,08	4,52	4,53
	950,00	0,13	3,79	3,80
	795,00	0,23	3,17	3,18
	670,00	0,38	2,68	2,68
	580,00	0,59	2,31	2,32
	510,00	0,86	2,02	2,04
	460,00	1,18	1,84	1,84

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 24 – Carregamento máximo na laje LP 40

<b>LAJE</b>	<b>VÃO (cm)</b>	<b><math>P_{d, serv, \text{Máximo}}</math> (kN/cm)</b>	<b><math>f_{t\infty}</math> (cm)</b>	<b>LIMITE</b>
LP 40	1700,00	0,04	6,79	6,80
	1350,00	0,07	5,40	5,40
	1140,00	0,12	4,53	4,56
	960,00	0,21	3,83	3,84
	825,00	0,33	3,30	3,30
	720,00	0,49	2,87	2,88
	640,00	0,70	2,56	2,56
	580,00	0,94	2,32	2,32

(fonte: elaborado pelo autor)

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou o comportamento teórico quanto às deformações sofridas em razão dos esforços recebidos e ao efeito de fluência das lajes alveolares protendidas distribuídas por um fabricante cadastrado no mercado de Porto Alegre.

Para isso, apresentaram-se os conceitos básicos para o melhor entendimento desse tipo de laje e, também, para a obtenção das premissas necessárias para a realização do presente trabalho. Para a análise das lajes, utilizando-se dos critérios e fórmulas apresentados e considerando os limites estabelecidos pela NBR 6118/2007, identificou-se a flecha máxima para as cinco diferentes lajes estudadas com seus respectivos carregamentos informados pelo fornecedor, chegando aos valores teóricos finais.

A partir desse resultado, foi possível obter duas importantes conclusões.

Primeiro, que, para os carregamentos apresentados pelo fabricante, as lajes alveolares protendidas estudadas respeitam as especificações de flecha máxima estipulada pela NBR 6118/2007, obtendo-se valores bem inferiores aos limites da Norma.

Segundo, que, tendo-se identificado com quais valores de carregamento as flechas chegariam ao máximo indicado pela Norma, o fabricante informa valores de carregamento bastante inferiores àqueles que efetivamente as lajes estudadas suportariam a título de flecha máxima: os resultados obtidos são de aproximadamente 20 a 80 % maiores que os valores informados pelo fabricante.

Oportuno referir que, apesar de no presente estudo haverem sido analisadas 05 (cinco) tipos de lajes alveolares de um único fabricante, os cálculos aqui apresentados e a metodologia utilizada são plenamente aplicáveis a outros tipos de lajes alveolares, de qualquer fabricante, de modo que podem servir de ferramentas para verificação da compatibilidade entre os valores de flecha máxima para as sobrecargas informadas pelo respectivo fabricante e os valores previstos na NBR 6118/2007.

Cabe ressaltar, de qualquer forma, que esses cálculos foram realizados para o Estado de Limite de Serviço (ELS) das lajes, não sendo verificado se as mesmas estariam de acordo com a Norma para o Estado de Limite Último (ELU).



## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. M. de. **Curso de concreto armado**. 2. ed. Rio Grande: Dunas, 2003. v. 2.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.118**: projeto de estruturas de concreto – procedimentos. Rio de Janeiro, 2007.
- EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado**: fundamentos e aplicações. 1. ed. São Carlos: EESC-USP, 2000.
- EMERICK, A. A. **Projeto e execução de lajes protendidas**. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.
- RODRIGUES, P. P. F.; AGOPYAN, V. **Controle de qualidade na indústria de pré-fabricados**. São Paulo: EPUSP, 1991. Boletim Técnico PCC n. 49.
- SILVA, C. S. B. e. **Análise numérico-experimental de elementos protendidos tipo laje-Roth**. 1994. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- SÜSSEKIND, J. C. **Curso de concreto: concreto armado**. 3. ed. Porto Alegre: Globo, 1983. v. 1.