

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



**“ESTUDO EXPERIMENTAL DA DEFORMAÇÃO AO LONGO DO
TEMPO DE LAJES CONTÍNUAS E SIMPLEMENTE APOIADAS
EXECUTADAS COM VIGOTAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO”**

**ORIENTADOR: PROF. DR. ROBERTO CHUST CARVALHO
MESTRANDA: LUCIANA TIEMI KATAOKA**

São Carlos, 2005

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

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA DEFORMAÇÃO AO LONGO DO
TEMPO DE LAJES CONTÍNUAS E SIMPLEMENTE APOIADAS
EXECUTADAS COM VIGOTAS PRÉ-MOLDADAS DE
CONCRETO**

Luciana Tiemi Kataoka

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. Roberto Chust
Carvalho

São Carlos

2005

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

K19ee

Kataoka, Luciana Tiemi.

Estudo experimental da deformação ao longo do tempo de lajes contínuas e simplesmente apoiadas executadas com vigotas pré-moldadas de concreto / Luciana Tiemi Kataoka. -- São Carlos : UFSCar, 2005.
189 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2005.

1. Construção civil. 2. Fissuração. 3. Fluência. 4. Lajes de concreto. 5. Concreto pré-moldado. 6. Concreto armado. I. Título.

CDD: 690 (20^a)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

Ao Professor Dr. Roberto Chust Carvalho, pela dedicada orientação, ensinamentos e amizade demonstrada.

Aos meus pais Yoshihiro e Maria e minha irmã Débora pelo amor, compreensão, apoio e honra de tê-los como minha família.

Ao meu namorado Leandro pelo amor, compreensão, apoio e honra de tê-lo como parte da minha vida.

Aos verdadeiros amigos que sempre me apoiaram.

Aos professores, funcionários e colegas do Mestrado e da Graduação.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudos concedida.

A todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Capítulo 1. Introdução.....	1
<i>1.1. Objetivos</i>	<i>2</i>
<i>1.2. Justificativas.....</i>	<i>3</i>
<i>1.3. Metodologia.....</i>	<i>5</i>
<i>1.4. Apresentação da Dissertação.....</i>	<i>10</i>
Capítulo 2. Conceituação da Fluência e Retração do Concreto.....	12
<i>2.1. Causas da Retração por Secagem e Fluência.....</i>	<i>12</i>
<i>2.2. Reversibilidade.....</i>	<i>13</i>
<i>2.3. Fatores que Afetam a Retração por Secagem e a Fluência.....</i>	<i>14</i>
<i>2.3.1. Materiais e dosagens.....</i>	<i>14</i>
<i>2.3.2. Tempo e Umidade.....</i>	<i>16</i>
<i>2.3.3. Geometria do Elemento de Concreto.....</i>	<i>18</i>
<i>2.3.4. Fatores Adicionais que Afetam a Fluência.....</i>	<i>18</i>
<i>2.4. Modelos Analíticos para Representação da Retração por Secagem e Fluência</i> <i>209.....</i>	<i>20</i>

2.4.1. Modelo Analítico para Representação da Retração.....	20
2.4.2. Modelo Analítico Para Determinação do Coeficiente de Fluência do Concreto Segundo a NBR 6118:2003.....	23
2.4.3. Modelo Numérico Para Determinação do Coeficiente de Fluência do Concreto segundo CEB-FIP Model Code 1978 (MC-78).....	27
2.4.4. Modelo Analítico Para Determinação do Coeficiente de Fluência do Concreto segundo ACI Committee 209.....	28
2.5. Valores simplificados de Coeficiente de fluência e de Retração na tração no tempo infinito.....	29
Capítulo 3. Deformação de Lajes Pré-Fabricadas.....	31
3.1. Deslocamentos Limites.....	31
3.2. Características Geométricas das Seções Transversais de Concreto.....	33
3.2.1. Características Geométricas de Seções no Estádio I.....	33
3.2.2. Características Geométricas de Seções no Estádio II.....	37
3.3. Rigidez Equivalente.....	39
3.4. Cálculo da Flecha Imediata.....	40
3.4.1. Cálculo de Flechas Imediatas em Peças com Seções Fissuradas ou Não.....	41
3.5. Deformação ao Longo do Tempo Devido a Retração.....	42
3.6.1.1. Modelo da NBR 6118:2003 (α_f).....	45
3.6.1.2. Modelo da NBR 6118:1978 Relação entre as curvaturas (R_t/R_{t0}).....	46
3.6.1.3. Modelo da NBR6118:2003 – para Peças não Fissuradas.....	47
3.6.1.4. Modelo de SAMRA [1997].....	48
Capítulo 4. Materiais, Modelos e Equipamentos Utilizados.....	53
4.1. Considerações Iniciais.....	53
4.2. Ensaio de Dosagem.....	54
4.2.1. Caracterização dos Materiais.....	54

4.2.1.1. Agregados.....	55
4.2.1.2. Água.....	56
4.2.1.3. Cimento.....	56
4.2.2. Dosagem.....	56
4.3. Definição dos modelos.....	61
4.4. Cálculo da Armadura Longitudinal.....	64
4.5. Câmara Climatizada.....	68
4.6. Equipamentos de Ensaio.....	71
Capítulo 5. Ensaios, Resultados e Análise dos Resultados.....	74
5.1. Continuação dos Ensaios Realizados.....	74
5.2. Descrição dos Novos Protótipos.....	75
5.2.1. Formas e Concretagem dos Protótipos.....	75
5.2.2. Instrumentação.....	78
5.2.2.1. Instrumentação com Extensômetros Elétricos de Resistência.....	79
5.2.2.2. Relógios Comparadores e Transdutores à Base de Extensômetros Elétricos de Resistência.....	81
5.3. Cálculos preliminares.....	82
5.4. Descrição dos Novos Ensaios.....	88
5.5. Resultados e Análises dos Ensaios.....	90
5.5.1. Resultados e Análises dos Protótipos de ROGGE [2001] e ROGGE [2002] (A, B, C e D).....	90
5.5.2. Resultados e Análises dos Novos Protótipos (I, J, K, L, M, N, O e P).....	93
5.5.2.1. Flechas Experimentais dos Novos Protótipos (I, J, K, L, M, N, O e P).....	93
5.5.2.2. Coeficiente de Fluência Experimental (CF).....	96
5.5.2.3. Deformação na Alvenaria de Apoio das Lajes.....	98
5.5.2.4. Efeito da Variação das Condições Climáticas sobre os Protótipos.....	99
5.5.2.5. Resultados e Análises das Tensões na Armadura	106

5.5.2.6. Resultados e Análises da Variação da Reação de Apoio.....	113
5.6. Previsão da Flecha Inicial para os Novos Protótipos (I, J, K, L, M, N e O).....	116
5.7. Previsão ao Longo do Tempo para os Protótipos de ROGGE [2001] e ROGGE [2002] (A, B, C e D).....	119
5.7.1. Modelo da NBR 6118:2003 para Cálculo do Coeficiente de Fluência (φ).....	120
5.7.2. Modelo da NBR 6118:2003 (α_F).....	124
5.7.3. Modelo da NBR 6118:2003 (φ) Peças não Fissuradas.....	125
5.7.4. Modelo da NBR 6118:1978 (R_t/R_{t0}).....	126
5.7.5. Modelo de SAMRA [1997].....	127
5.7.6. Comparação entre os Resultados Teóricos e Experimentais.....	131
5.8. Previsão ao Longo do Tempo para os Protótipos Novos (I, J, K, L, M, N e O).....	135
5.8.1. Modelo da NBR 6118:2003 para Cálculo do Coeficiente de Fluência (φ).....	135
5.8.2. Comparação entre os Resultados Teóricos e Experimentais de Flecha.....	137
Capítulo 6. Conclusões Finais e Sugestões.....	145
6.1. Protótipos de ROGGE [2001] e ROGGE [2002] (A, B, C e D).....	146
6.2. Novos Protótipos (I, J, K, L, M, N e O).....	147
6.2.1. Protótipos Isostáticos.....	147
6.2.2. Protótipos Hiperestáticos.....	148
6.2.3. Comparação entre os Sistemas Isostático e Hiperestático.....	149
6.3. Coeficiente de Fluência (CF) de Lajes Pré-fabricadas.....	149
6.4. Condições Climáticas.....	150
6.5. Precisão na Determinação da Flecha Inicial.....	151
6.6. Intensidade do Carregamento.....	153
6.7. Variação de Esforços Solicitantes devido á Fluência.....	154
6.8. Processos Numéricos de Avaliação de Flecha.....	154
6.8.1. Modelo da SAMRA [1997].....	154
6.8.2. Modelo da NBR:6118:2003 (α_p).....	155

<i>6.8.3. Modelo da NBR6118:2003 (ϕ - para peças não fissuradas)</i>	156
<i>6.8.4. Modelo da Relação entre Curvaturas (NBR6118:1978)</i>	158
Referências Bibliográficas	160
Anexo A - Valores Experimentais das Flechas ao Longo do Tempo das Lajes I, J, K, L, M, N e O	164
Anexo B – Deformação das Paredes de Apoio das Lajes L e M	180
Anexo C – Valores Experimentais das Temperaturas e Umidades dentro e fora da Câmara Climatizada	182
Anexo D – Dimensionamento da Armadura Longitudinal Utilizando Método Adimensional	185

RESUMO

KATAOKA, L. T. Estudo Experimental da Deformação ao Longo do Tempo de Lajes Contínuas e Simplesmente Apoiadas Executadas com Vigotas Pré-Moldadas de Concreto. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP. 2005

Esta pesquisa visa determinar experimentalmente a evolução da deformação ao longo do tempo de lajes com vigotas pré-moldadas unidirecionais de concreto através da medição de flechas de protótipos com dimensões reais.

Trata-se de uma continuação dos estudos de sistemas estruturais de lajes pré-moldadas realizados na Universidade Federal de São Carlos. Além de prosseguir o acompanhamento de quatro protótipos já existentes, com idades de três anos e meio, são estudados oito novos protótipos construídos aos pares. Quatro protótipos estão localizados em uma sala climatizada, de maneira que se mantenha o valor constante tanto de temperatura como de umidade e outros quatro protótipos, com características idênticas, estão localizados dentro de área coberta em que tanto a temperatura e quanto a umidade variam. As variações climáticas são medidas e analisadas na avaliação das flechas ao longo do tempo para lajes pré-moldadas. Nestes novos protótipos também são acompanhadas as variações de deformações no concreto e na armadura, assim como suas influências nas deformações ao longo do tempo.

Simultaneamente ao estudo experimental, são testados modelos para avaliação da flecha ao longo do tempo, inclusive os contidos na nova versão da NBBR6118:2003.

O projeto também estabelece uma relação entre a deformação ao longo tempo (infinito) com a deformação imediata e avalia como evolui a deformação em peças com taxa de armadura e condições de apoio diferentes. Estudam-se peças simplesmente apoiadas e contínuas.

Nesta pesquisa, assim como em outros trabalhos do grupo já realizados, fica confirmado que a deformação da peça é um fator determinante no dimensionamento da peça e que a fissuração do concreto amplia este efeito.

ABSTRACT

This research deals with the experimental investigation of time dependent deformations in partially precast floors with composite beam-and-block floor systems made with reinforced concrete lattice joist through the measurement of deflections of prototypes with real dimensions.

It is a continuation of several researches of composite beam-and-block floor systems done in Universidade Federal de São Carlos. Besides the accompanied measurement deflections of four already existents prototypes, with ages of three and a half years, it was studied eight new prototypes built in pairs. Four prototypes are localized in an acclimatized room in order to keep the values of temperature and humidity constant, and the other four prototypes, with identical characteristics, localized inside of a covered area where the temperature and humidity vary. The climatic variations were measured and analyzed in the evaluation of time dependent deformation. In the new prototypes the strain were also accompanied in the concrete and in the reinforcement, as well as their influences in time dependent deformation.

Simultaneously to the experimental study, models for predicting creep are tested for prediction of deflections along the time, including the new version of Brazilian Code for Structural Concrete (NBR6118:2003).

The research also establishes the ratio of long-term deflections (infinite) to the instantaneous deformation and it evaluates how the deformation develops in composite beam-and-block floor systems of different supports, wherein statically and hyperstatically structures were studied.

As a conclusion in this research, conforming in others already done by the study group, it has been found the results give strongly indication that the composite beam-and-block floor systems deformations are a decisive factor in design and that the shrinkage of the concrete increases this effect.

A necessidade de construções que utilizem mais racionalmente os terrenos, devido ao alto custo destes nos centros urbanos, de modo a tirar o maior proveito de sua ocupação, exige soluções estruturais de menor custo, com execução simples, boa qualidade e comportamento seguro, de acordo com as normas brasileiras e de acordo com as possibilidades econômicas, sociais, culturais e regionais do país.

Por essa razão, o uso de pavimentos executados com lajes com vigotas pré-fabricadas é cada vez mais difundido em nosso país. Esse tipo de sistema costuma, em diversas situações, apresentar menor custo que os similares, pois dispensa o uso de fôrmas, economiza concreto (pois na parte tracionada é colocado um material para enchimento), e o custo com a mão-de-obra empregada é em geral menor, pois o sistema é de fácil manuseio e montagem, requerendo pouco treinamento e especialização para executá-lo. Também não depende de grandes investimentos em capitais, tais como o emprego de guas ou guindastes. Além disso, se bem dimensionados, apresentam desempenho compatível com as necessidades previstas e com segurança, e dependendo do tipo de material escolhido para enchimento, o isolamento térmico e acústico pode melhorar consideravelmente (no caso de utilizar-se EPS – poliestireno expandido – como material de enchimento, por exemplo).

Em geral, essas lajes são formadas por vigotas pré-fabricadas, com vigotas de concreto armado ou treliça, onde se encontra a armadura principal; por um material de enchimento (lajotas cerâmicas ou EPS) que fica na parte tracionada da laje; e uma capa de concreto moldada no local, que tem espessura variável dependendo do tipo de carregamento ao qual a laje será submetida, tendo como função de resistir aos esforços de compressão. Neste trabalho serão consideradas apenas as lajes pré-fabricadas com armadura positiva sem protensão.

A diferença entre os tipos de vigotas consiste basicamente na armadura. A armadura da vigota de concreto armado é composta de barras de aço retas colocadas na parte inferior da mesma, e treliçada constitui em uma treliça espacial de aço composta de três banzos paralelos e diagonais laterais na forma de senóides, soldadas aos banzos. A Figura 1.1. ilustra os dois tipos de vigotas.

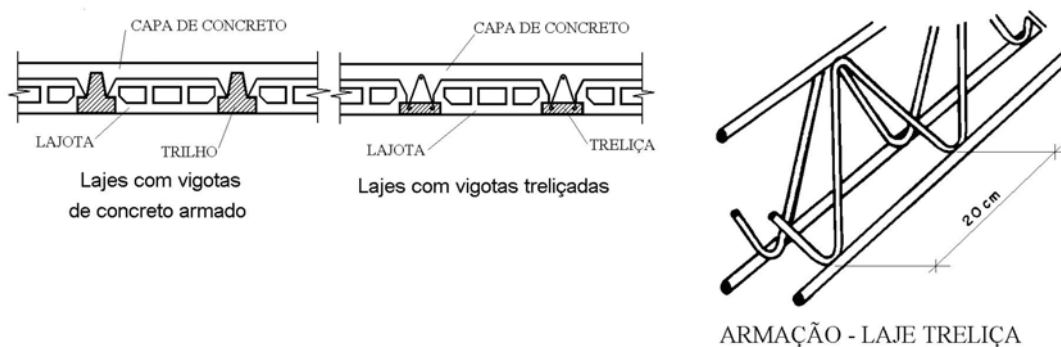


Figura 1.1. Seções transversais de lajes pré-fabricadas com vigotas de concreto armado, com vigotas treliçadas e perspectiva esquemática da armadura em treliça.

Durante a concretagem, a função das vigotas é resistir à ação do peso próprio, do material de enchimento (lajotas ou EPS), da capa de concreto e dos equipamentos utilizados. Durante o processo de cura utilizar-se-á escoras transversais às vigotas, para evitar deformação excessiva da mesma.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal estudar o fenômeno da evolução das flechas em lajes pré-fabricadas ao longo do tempo caracterizando padrões de sua variação como velocidade e estimando valores finais, bem como avaliar a variação da deformação nas armaduras tracionadas ao longo do tempo. Dentro deste objetivo principal podem-se dividir os seguintes objetivos:

Avaliar a diferença de comportamento de deformação ao longo do tempo nas lajes pré-fabricadas isostáticas e hiperestáticas.

Estudar a variação da relação entre a deformação em um longo tempo (infinito) com a deformação imediata.

Verificar se os processos simplificados da Norma Brasileira para avaliação de flecha ao longo do tempo apresentam bons resultados para o sistema de laje pré-fabricada.

Outros objetivos complementares estão previstos tais como:

Disponibilizar dados para calibração de modelos de cálculo analíticos, uma vez que os experimentos deste tipo são poucos e de difícil acesso, embora exista uma quantidade razoável de programas usados para prever flechas ao longo do tempo. Neste caso é necessário além de fornecer a variação das flechas propriamente dita, os valores de todas as outras variáveis de real significância no fenômeno, além da descrição e características dos materiais empregados.

Descrição, avaliação e comentários das técnicas empregadas para obtenção dos resultados com o intuito de ajudar o planejamento de novos ensaios.

Finalmente como objetivo inerente ao trabalho acadêmico há o avanço no conhecimento científico da fluência no material concreto armado que necessita, além do conhecimento do fenômeno da fluência do material, o conhecimento do comportamento do sistema estrutural de um material composto de concreto e aço.

1.2. Justificativas

Uma laje executada com vigotas pré-fabricadas apresenta deformações menores do que as executadas com elementos independentes, e maiores do que as lajes maciças, pois apresenta um comportamento estrutural intermediário entre estes dois sistemas. Por meio dos estudos teóricos desenvolvidos por diversos pesquisadores e confirmados por resultados experimentais, pode-se definir que a deformação excessiva é determinante para escolha da altura da laje. Os trabalhos de MESQUITA [1999], ROGGE [2002], TIRINTAN [2002], KATAOKA [2004] e SAMPAIO [2004] indicam que a flecha ao longo do tempo pode ser até quatro vezes maior que a flecha imediata, além de ser muito maior que aquela

obtida sem considerar a fissuração do concreto. Ocorrendo a fissuração há redistribuição de tensões na seção transversal. As tensões de compressão podem aumentar de valor e as tensões de tração no concreto diminuem. Assim, em princípio, é de se esperar que o comportamento de peças fissuradas e não fissuradas seja distinto. Considerando os coeficientes α_f (para peças fissuradas) e φ (para peças não fissuradas) da NBR6118:2003, pode-se concluir que as peças não fissuradas apresentam maior deformação diferida, pois o valor do coeficiente majorador α_f é no máximo 2 e o de φ chega até 4. A observação prática não permite, em princípio, chegar a esta conclusão. Assim, elege-se a fissuração como variável a ser estudada.

O fenômeno da fluência, que ocorre na prática junto com a retração do concreto, é o principal fator que influencia a deformação ao longo do tempo, sendo de difícil quantificação porque há muitas variáveis que intervêm no processo. Para a determinação do coeficiente de fluência do concreto segundo a NBR6118:2003 devem ser consideradas, as seguintes variáveis: umidade relativa do ar, temperatura do ambiente, idade do concreto na época da introdução do carregamento, espessura média da seção transversal de peça, tipo de cimento usado, trabalhabilidade do concreto empregado e intensidade do carregamento. Essa norma fornece alguns valores para o coeficiente de fluência para o concreto em função da espessura fictícia, da umidade relativa e da idade fictícia do concreto ao ser feito o carregamento. Entretanto, para cálculo de deslocamento de pontos de peças de concreto armado, onde a presença do aço e a fissuração passam a interferir, as informações disponíveis são poucas. A NBR6118:2003 apenas na sua última redação apresenta uma fórmula empírica para a determinação da flecha em um tempo t para vigas de concreto armado, que subestima e muito a flecha devido à fluência conforme pode ser visto em ROGGE [2001], considerando apenas como variáveis o tempo, a deformação imediata e a taxa de armadura comprimida. Além disso, é necessário ampliar o conhecimento de como a umidade relativa e a temperatura ambiente interferem no coeficiente de fluência, pois na prática a variação destes parâmetros pode ser muito significativa.

Em SAMRA [1997] foi encontrada uma metodologia relativamente simples de cálculo para previsão das deformações ao longo do tempo de vigas de concreto armado que considera a taxa de armadura, além de todas as outras variáveis descritas anteriormente, e

que apresentam, ao que tudo indica, valores para previsão de flechas no tempo infinito bem discrepantes aos da NBR6118:2003. Com os valores obtidos nos trabalhos realizados tem-se a oportunidade de verificar qual processo, o da NBR6118:2003 ou o de SAMRA [1997], apresenta melhor previsão de flecha ao longo do tempo.

Os ensaios de protótipos sob flexão simples podem fornecer informações sobre a ordem de grandeza das flechas inicial e final e da relação entre as mesmas (coeficiente de fluência da estrutura), velocidade do desenvolvimento da flecha, influência da fissuração da peça, entre outras variáveis. Devido ao número restrito de ensaios deste fenômeno, o relato com a posterior avaliação das técnicas empregadas também é muito importante para outros pesquisadores que irão trabalhar na área.

Existem uma série de processos numéricos e programas, como pode ser visto em GHALI e FAVRE [1986], que tentam levar em conta a fissuração e a fluência do concreto, porém poucos resultados experimentais que possam ser usados para parametrizar os programas.

1.3. Método

O método empregado para o desenvolvimento do estudo abrange, de uma forma geral: pesquisa bibliográfica, planejamento dos ensaios, previsão dos carregamentos e das deformações (imediatas e ao longo do tempo), medições das deformações, análises e compatibilização dos resultados teóricos e experimentais, e conclusões do trabalho. O projeto foi desenvolvido em duas etapas: uma teórica e outra experimental. Na parte teórica, além das pesquisas bibliográficas, fez-se o dimensionamento das lajes e preparação dos ensaios, previsão de deformações imediatas e analisaram-se as principais metodologias do cálculo de previsão de flechas ao longo do tempo.

Os trabalhos desenvolvidos pelo grupo da Universidade de São Carlos (onde são feitos os ensaios) abrangem três tipos de protótipos com: **uma vigota**, **duas vigotas** e **três vigotas**, embora esta dissertação se concentre no estudo dos protótipos com duas e três vigotas.

Inicialmente, foi executada apenas uma cobertura metálica que serviu para abrigar os protótipos com três vigotas (descritos mais adiante), conforme Fotografia 1.1. a) e b). Posteriormente, o laboratório foi concluído fazendo-se o fechamento lateral e demais instalações necessárias, conforme Fotografia 1.1.c) e d). Atualmente (15/02/2005), estão abrigados numa área de 70 m² dois grupos de protótipos: quatro protótipos com três vigotas (nomeados de A, B, C e D) e oito com duas vigotas (nomeados de I, J, K, L, M, N, O e P).

	
<p>a) Vista frontal do laboratório com os protótipos com três vigotas sem fechamento lateral</p>	<p>b) Vista lateral do laboratório com os protótipos com três vigotas sem fechamento lateral</p>
	
<p>c) Vista lateral do laboratório já com fechamento lateral pronto</p>	<p>d) Vista de protótipos com três vigotas após o fechamento lateral do laboratório</p>
<p>Fotografia 1.1. Laboratório de estruturas antes da execução do acabamento</p>	

As lajes com *três vigotas*, mais antigos, com 46 meses de idade (moldados em 02/2001), são isostáticos e têm cada um vão de 4 m. O esquema destes protótipos é apresentado na Figura 1.2. e sua seção transversal é constituída de três vigotas e lajotas cerâmicas.

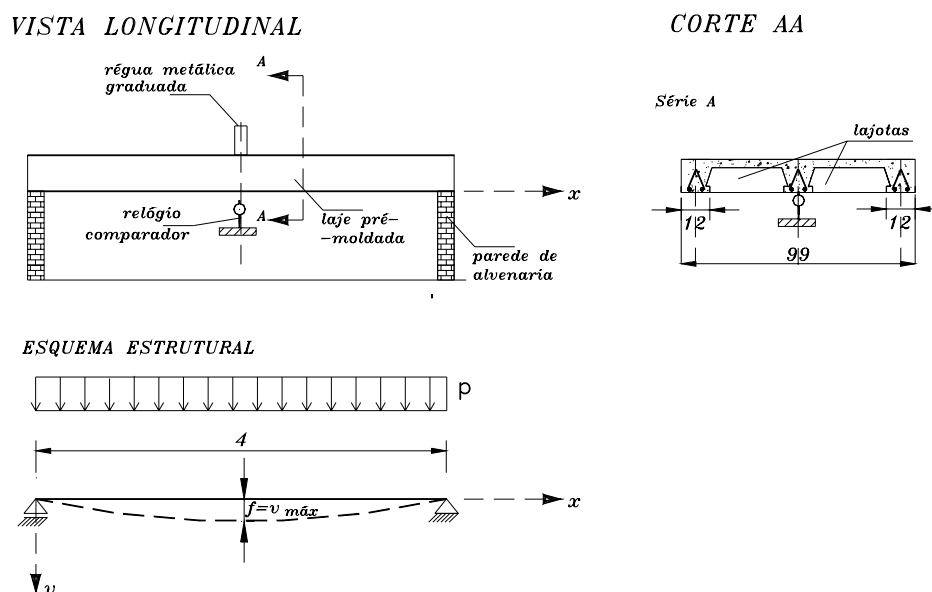


Figura 1.2. Protótipos com três vigotas - Vista longitudinal e corte transversal

Os protótipos com **uma vigota** (moldados em 11/2001 e 05/2002) foram executados ainda durante a pesquisa de ROGGE [2001], tendo como objetivo verificar a diferença do comportamento entre sistemas isostáticos e hiperestáticos. O esquema destes protótipos é apresentado na Figura 1.3. Posteriormente, estes protótipos foram demolidos para que fossem construídos os protótipos com duas vigotas.

Finalmente foram executados oito protótipos com **duas vigotas** (moldados em 09/2004 e 10/2004), sendo quatro isostáticos e quatro hiperestáticos, todos com dois metros de vão. Nesta fase do experimento, o laboratório já se apresentava concluído conforme Fotografia 1.2. a), inclusive com instalação interna de cortinas para proteção à incidência de raios solares, conforme Fotografia 1.2. b).

Dentre esses oito protótipos, quatro (dois isostáticos e dois hiperestáticos) foram construídos fora de uma sala climatizada e quatro protótipos (dois isostáticos e dois hiperestáticos) dentro da câmara. Nesta sala climatizada tanto a temperatura quanto a umidade relativa do ar permaneceram constantes ao longo do tempo.

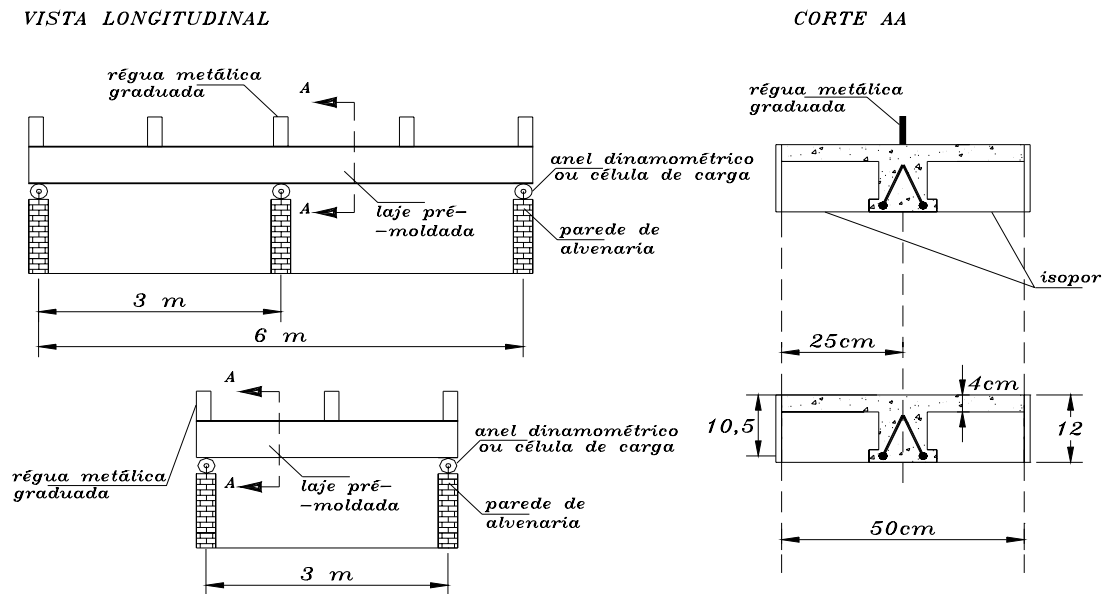


Figura 1.3. Protótipos com uma vigota – Vista longitudinal e corte transversal.



Também foram colocados, nas armaduras dos novos protótipos, extensômetros elétricos (strain-gage) para acompanhamento das deformações da armadura tracionada e comprimida o longo do tempo. Um esquema dos protótipos com duas vigotas é apresentado na Figura 1.4.

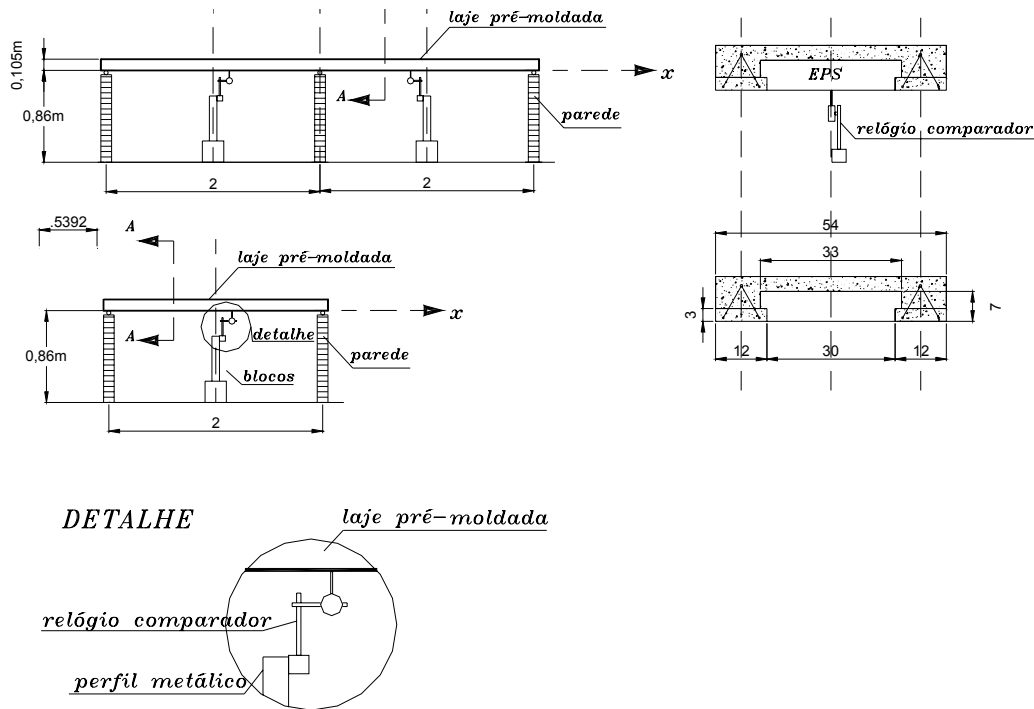


Figura 1.4. Protótipos com duas vigotas - Vista longitudinal e corte transversal

Os protótipos com duas vigotas têm como material de enchimento o EPS. A principal diferença entre estes últimos e os protótipos com três vigotas está no fato de que apenas uma laje com duas vigotas apresenta seção fissurada por flexão, enquanto que todos os protótipos com três vigotas estão fissurados.

São medidas e apresentadas às deformações dos protótipos com duas vigotas de um período de aproximadamente 120 dias por meio de defletômetros, metodologia empregada com sucesso em outros experimentos do grupo, e por meio de um nível de precisão topográfico e réguas metálicas usado somente para conferir as medidas.

Um termo-higrômetro digital foi utilizado para monitoramento da umidade e temperatura relativa do ar. Para que fossem possíveis a construção da câmara climatizada e os protótipos com duas vigotas, foi necessário demolir um protótipo com três vigotas e os com uma vigota.

Devido ao fato da velocidade de deformação nos primeiros dias ser elevada, na primeira semana as medidas foram realizadas de hora em hora. Nas duas semanas seguintes

as medições foram feitas diariamente em dois períodos do dia (manhã e à tarde) e posteriormente aumentou-se o intervalo de medidas para uma medida ao dia (manhã e/ou à tarde). Foi determinado um horário para realização das medições, a fim de que as variações devido à temperatura fossem minimizadas.

Todas as lajes com duas vigotas foram concretadas utilizando o mesmo material e traço, com os mesmos procedimentos na tentativa de garantir homogeneidade e mesmas características para o concreto dos protótipos.

Os resultados foram analisados de forma criteriosa, avaliando sua consistência e eventuais erros. Como exemplo pode-se citar a dúvida que existia na deformação vertical das paredes de apoio das lajes. Na pesquisa de ROGGE [2001] e ROGGE [2002], embora se utilizasse equipamento com menor precisão (nível ótico), foram lidas as deformações verticais das paredes que, diga-se de passagem, apresentaram variação insignificante. Para os protótipos com duas vigotas, como será descrito posteriormente, mediu-se durante uma semana, usando-se extensômetros mecânicos, os deslocamentos de diversos pontos das paredes a fim de certificar-se que não haveria influência dos mesmos nas medições das flechas das lajes.

Sempre que possível os resultados são apresentados em tabelas e gráficos para que facilitem a visualização e compreensão do leitor.

1.4. Apresentação da Dissertação

Além deste capítulo que contém a Introdução, os objetivos, as justificativas e a metodologia utilizada, esta dissertação é composta de mais cinco capítulos.

O segundo capítulo discorre sobre os fenômenos da fluência e retração do concreto. Mostram-se alguns modelos para representação teórica e numérica dos fenômenos. Descreve-se detalhadamente o modelo da NBR6118:2003 e para efeito de comparação apresenta-se sucintamente os modelos do CEB_FIP 78 (demonstrando que é o mesmo modelo da NBR6118:2003 multiplicado por um coeficiente) e do ACI Committee 209, sendo este último empregado por SAMRA [1997]. Mostra-se no final deste um resumo do que mais de importante se obteve na revisão bibliográfica do assunto.

No capítulo 3 – Deformação de Lajes pré-fabricadas – são mostrados os conceitos básicos empregados para o estudo da previsão de flechas em lajes pré-fabricadas. Mostram-se os deslocamentos limites previstos pela NBR6118:2003, como devem ser consideradas as características geométricas das seções transversais nos estádios I e II, definindo-se o conceito de rigidez equivalente. Conclui-se esta parte mostrando os procedimentos para o cálculo das flechas imediatas em lajes pré-fabricadas fissuradas ou não. O estudo das flechas neste capítulo é continuado considerando os efeitos da fluência e retração nas flechas ao longo do tempo e com a apresentação de quatro processos teóricos de cálculo bem simples: NBR6118:2003 para peças fissuradas (α_f); NBR66118:1978 em que se usa a relação entre as curvaturas da seção mais solicitada no tempo infinito e zero; NBR6118:2003 para peças não fissuradas e finalmente o processo de SAMRA [1997].

O capítulo quatro descreve os materiais, modelos e equipamentos utilizados. Inicialmente é descrito e o ensaio de dosagem do concreto para depois mostrar como foram definidos os modelos. Apresenta-se também o cálculo da armadura longitudinal dos modelos e como foi construída a câmara climatizada.

No capítulo cinco são apresentados os ensaios realizados, assim como os resultados e análises dos mesmos. Inicialmente descreve-se como foram continuadas as medições nos protótipos de ROGGE [2001] para em seguida serem descritos os ensaios para os novos protótipos. Também está apresentada toda a aparelhagem empregada nas medições das flechas e mostrado como foram feitos os cálculos preliminares de ações e armaduras a considerar. Finalmente apresentam-se os resultados das flechas medidas ao longo do tempo assim como a reação de apoio de um protótipo hiperestático, além de comparar o valor das flechas instantâneas medidas e as previstas por cálculo teórico.

No capítulo seis, último apresentado nesta dissertação, fazem-se as conclusões finais e sugestões. Para facilitar a leitura, as conclusões são agrupadas por tópicos tais como: idade do concreto, condições climáticas, sistema estrutural, intensidade do carregamento, precisão da determinação da flecha inicial, variação dos esforços solicitantes e finalmente a precisão do processo de cálculo comentados durante o trabalho.

CONCEITUAÇÃO DA FLUÊNCIA E RETRAÇÃO DO CONCRETO

2 Capítulo

Neste item, a retração por secagem e a fluência são discutidas juntamente, principalmente pelo fato de possuírem diversas semelhanças, tais como:

Origina-se da mesma fonte, a pasta endurecida de cimento;

As curvas de deformação-tempo são muito semelhantes;

Os fatores que influenciam a retração por secagem também influenciam a fluência e, geralmente, do mesmo modo;

A microdeformação no concreto de cada um deles é grande e não pode ser ignorada em projeto estrutural;

Ambos são parcialmente reversíveis.

Também são apresentados os modelos analíticos para representação da retração fluência do concreto.

2.1. Causas da Retração por Secagem e Fluência

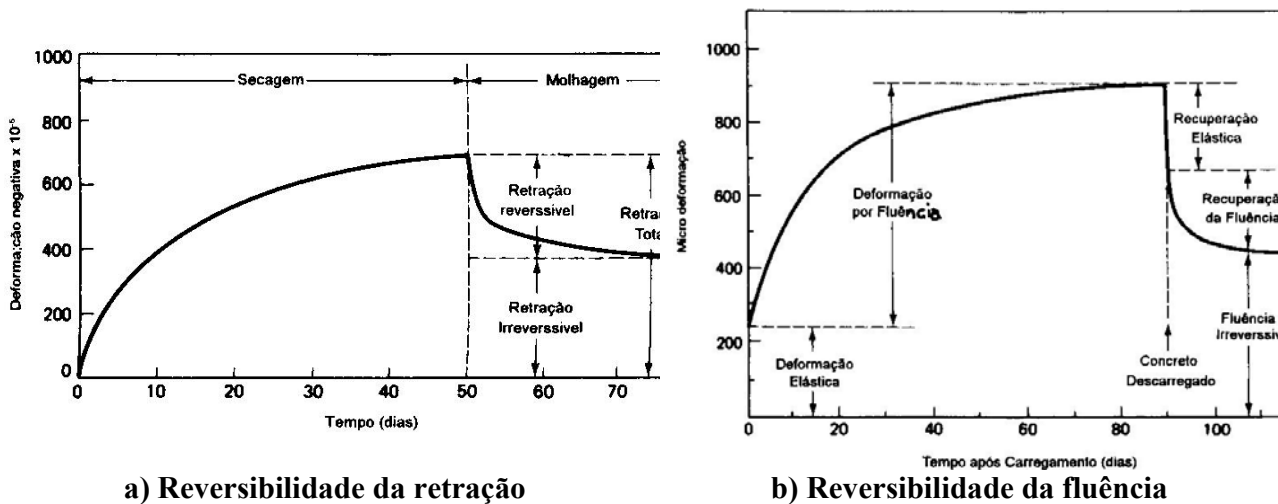
Segundo METHA e MONTEIRO [1994], presume-se que tanto a deformação por retração devido à secagem como por fluência no concreto estejam relacionadas principalmente à remoção da água adsorvida da pasta endurecida de cimento. A diferença está no fato de que na retração por secagem a umidade relativa diferencial entre o concreto e o ambiente é a força motriz, enquanto que, na fluência, é a tensão aplicada de forma constante.

Entretanto, além dos movimentos da umidade, há outras causas que contribuem para o fenômeno da fluência. A não linearidade da relação tensão-deformação no concreto, especialmente a níveis de tensão maiores que 30 a 40 % da tensão última, mostra claramente a contribuição das microfissuras da zona de transição à fluência.

A ocorrência de uma resposta elástica retardada no agregado é ainda outra causa da fluência no concreto. Uma vez que a pasta de cimento e o agregado estão aderidos, a tensão na primeira diminui gradualmente à medida que a carga é transferida para o último, que deforma elasticamente com o aumento da transferência de carga. Assim, a deformação elástica retardada no agregado contribui para a fluência total.

2.2. Reversibilidade

O comportamento típico do concreto na secagem, na molhagem ou no carregamento e descarregamento são mostrados na Figura 2.1.



a) Reversibilidade da retração

b) Reversibilidade da fluência

Figura 2.1. Reversibilidade da retração por secagem e fluência (de S. Mindess and J. F. Young, Concrete, 1981, pp. 486,501. Reeditado com a permissão de Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.)

Tanto o fenômeno de retração por secagem quanto o de fluência no concreto apresentam um grau de irreversibilidade que possui uma importância prática. A Figura 2.1, mostra que após a primeira secagem, o concreto não retornou à dimensão original após a molhagem. A retração por secagem, portanto, foi classificada em retração irreversível, que é a parte da retração total reproduzível em ciclos molhagem-secagem. A retração por secagem irreversível provavelmente se deve ao desenvolvimento de ligações químicas dentro da estrutura do silicato de cálcio hidratado como uma consequência da secagem. A melhoria na estabilidade dimensional do concreto como resultado da primeira secagem tem sido usada como vantagem na manufatura de produtos de concreto pré-moldados.

A curva de fluência para o concreto sujeito a uma compressão uniaxial constante durante 90 dias e, após, descarregado é mostrada na Figura 2.1.b). Quando a amostra é descarregada, a recuperação instantânea ou elástica é aproximadamente da mesma ordem da deformação elástica quando da primeira aplicação da carga. A recuperação instantânea é seguida por uma redução gradual da deformação chamada recuperação da fluência. Embora a recuperação da fluência ocorra mais rapidamente do que a fluência, a reversão da deformação por fluência não é total. Analogamente à retração por secagem (Figura 2.1.a)), este fenômeno é definido pelos termos correspondentes, fluência reversível e irreversível. Uma parte da fluência reversível pode ser atribuída à deformação elástica retardada do agregado, que é totalmente recuperável.

2.3. Fatores que Afetam a Retração por Secagem e a Fluência

De acordo com MEHTA e MONTEIRO [1994], na prática, os movimentos da umidade na pasta endurecida de cimento, que essencialmente é que controla as deformações de retração por secagem e de fluência no concreto, são influenciados por numerosos fatores simultâneos inter-relacionados. As inter-relações entre estes fatores são bastante complexas e não são compreendidas facilmente. Os fatores são classificados e discutidos a seguir, a fim de compreender as suas importâncias.

2.3.1. Materiais e dosagens

A granulometria, dimensão máxima, forma e textura do agregado têm sido sugeridas como fatores que influenciam a retração por secagem e a fluência. Geralmente concorda-se que o módulo de deformação do agregado é o fator mais importante. As características do agregado podem ser indiretas, isto é, através do seu efeito no conteúdo de agregado do concreto ou na capacidade de adensamento da mistura de concreto.

As variações na finura e composição do cimento Portland afetam a taxa de hidratação, mas não o volume e as características dos produtos de hidratação. Portanto, muitos pesquisadores têm observado que mudanças normais na composição ou finura do cimento, que tendem a influenciar o comportamento por secagem de pequenos corpos-de-prova de pasta de cimento ou argamassa, têm um efeito desprezível sobre o concreto.

Obviamente, para um dado agregado e dosagem, se o tipo de cimento influencia a resistência do concreto no momento de aplicação, a fluência do concreto será afetada. Quando carregado nas primeiras idades, o concreto contendo cimento Portland comum geralmente apresenta fluência maior do que o concreto correspondente contendo cimento de alta resistência inicial, conforme Figura 2.2.b). Concretos de cimento Portland de alto forno e de cimento Portland pozolânico também apresentam fluência mais alta nas primeiras idades do que o concreto de cimento CPI correspondente.

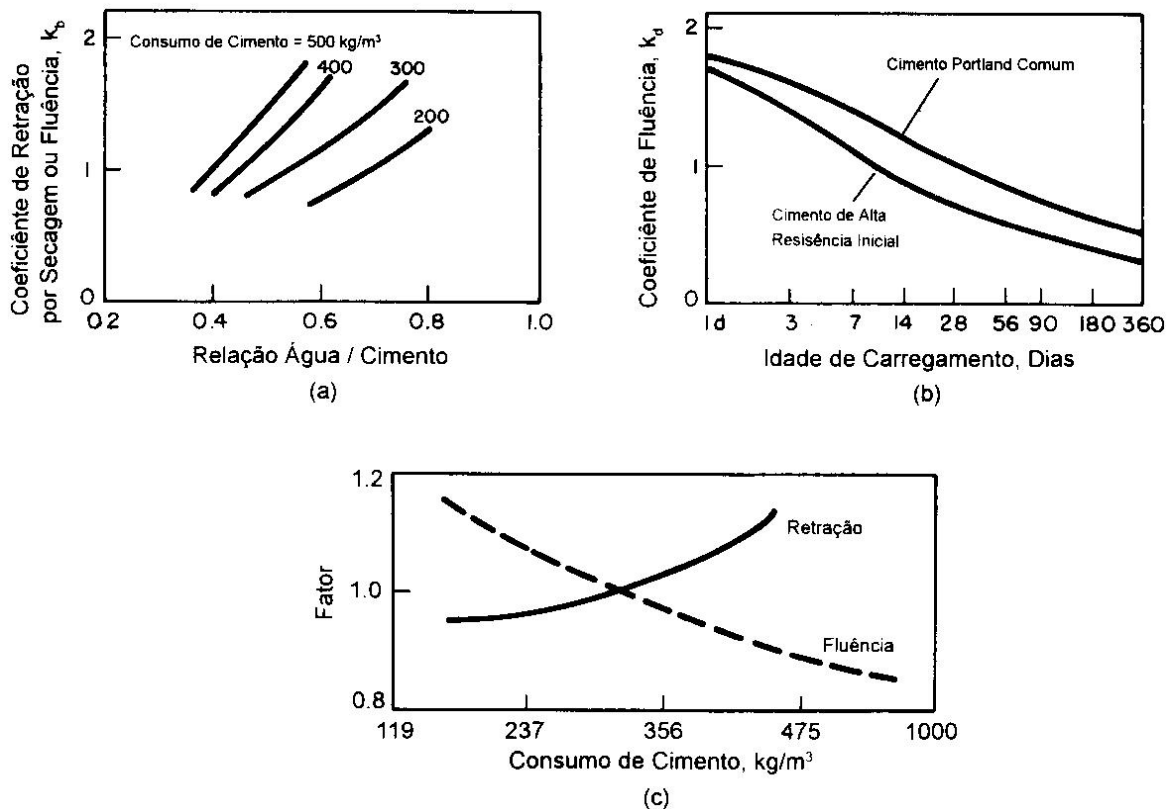


Figura 2.2. a) Efeito do consumo de água na retração; b) Efeito do tipo de cimento na fluência e c) Influência do consumo de cimento na retração por secagem [a) e b), de International Recommendations for the Design and Construction of Concrete Structures, CEB/FIP, 1970; c) de T.R. Jones, T. J. Hirsch and H. K. Stephenson, Texas Transportation Institute Report E52, 1959; e ACI Monograph 6, 1971, p. 178.]

Em geral, a influência do consumo de cimento e água no concreto sobre a retração por secagem e a fluência não é direta porque um aumento no volume na pasta de cimento significa um decréscimo na fração do agregado e, conseqüentemente, um acréscimo correspondente nas deformações do concreto dependentes da umidade. Para um dado

consumo de cimento, sabe-se que, com um aumento na relação água cimento, tanto a retração por secagem como a fluência aumentaram. Um decréscimo na resistência (portanto, no módulo de deformação) e um aumento na permeabilidade do sistema provavelmente são responsáveis por isto. Os dados na Figura 2.2.a) mostram que, para uma dada relação água cimento, tanto a retração por secagem como a fluência aumentaram com o aumento do consumo de cimento. Isto é esperado devido a um aumento no volume da pasta de cimento; entretanto, na prática, isto nem sempre acontece.

Os resultados de muitas pesquisas experimentais mostraram que a análise teórica precedente funciona bem para a retração por secagem, mas nem sempre para a fluência. Dados experimentais mostram que dentro de uma larga faixa de resistências de concreto, a fluência é inversamente proporcional à resistência do concreto no momento de aplicação da carga. Aparentemente, portanto, o efeito da diminuição do consumo de agregado sobre um possível acréscimo na fluência é mais do que compensado por uma redução da fluência, a qual é associada com o aumento na resistência do concreto. Curvas ilustrando o efeito do consumo de cimento na retração por secagem e na fluência, para uma relação água cimento constante, são mostradas na Figura 2.2.c).

Adições e aditivos para concreto tais como cloreto de cálcio, escória granulada e pozolanas tendem a aumentar o volume de poros finos no produto da hidratação do cimento. Uma vez que a retração por secagem e a fluência no concreto são associadas diretamente com a água contida em pequenos poros na faixa de 3 a 20nm, os concretos contendo adições capazes de refinar os poros normalmente apresentam retração por secagem e fluência maiores. Aditivos redutores de água e retardadores de pega, que são capazes de causar uma melhor dispersão de partículas de cimento anidro na água, também levam a um refinamento dos poros no produto da hidratação. Em geral, espera-se que aditivos e adições que aumentam a retração por secagem, aumentarão a fluência.

2.3.2. Tempo e Umidade

A difusão da água adsorvida e da água mantida por tensão capilar nos pequenos poros (abaixo de 50 mm) da pasta endurecida de cimento para grandes vazios capilares

dentro do sistema ou para atmosfera é um processo dependente do tempo que acontece ao longo de grandes períodos.

Através de testes de longa duração de fluência e retração por secagem, que levaram mais de 20 anos, TROXELL et al. Constataram que para uma larga faixa de dosagens de concreto, tipos de agregados e condições ambientais e de carregamento, somente 20 a 25 por cento da retração por secagem total dos 20 anos aconteceu em 2 semanas, 50 e 60 por cento em 3 meses e 75 a 80 por cento em 1 ano.

Espera-se que um aumento na umidade atmosférica torne mais lenta a taxa relativa do fluxo de umidade do interior para as superfícies externas do concreto. Para uma dada condição de exposição, os efeitos da umidade relativa do ar sobre a deformação de retração por secagem (Figura 2.3.a) e o coeficiente de fluência (Figura 2.3.b)) são ilustrados nos gráfico publicados pelo Comité Euro-Internacional du Béton (CEB). À umidade relativa de 100 por cento, admite-se que a retração por secagem (E_c) seja zero, aumentado para cerca de 200×10^{-6} à umidade relativa de 80 por cento e 400×10^{-6} à umidade relativa de 45 por cento. Do mesmo modo admite-se que o coeficiente de fluência, que é um dos cinco coeficientes parciais que contribuem para a fluência total, seja 1 à umidade relativa de 100 por cento, aumentado para cerca de 2 à umidade relativa de 80 por cento e 3 à umidade relativa de 45 por cento.

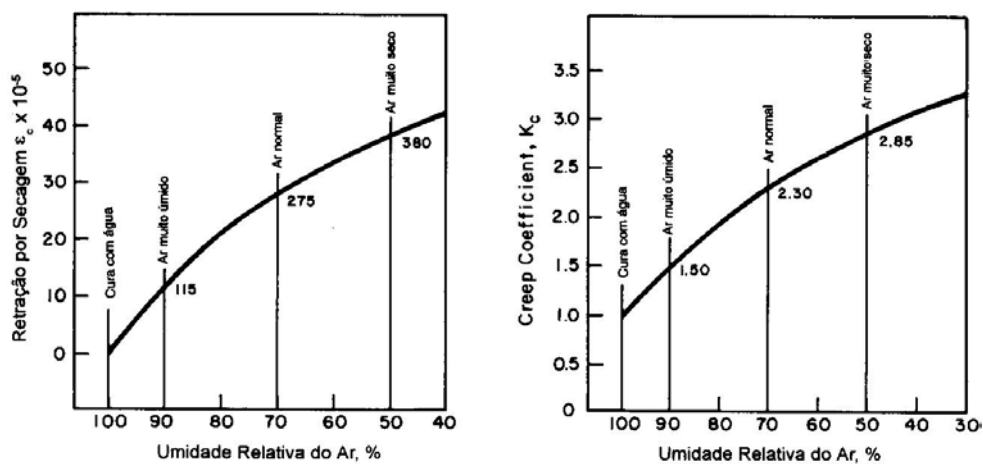


Figura 2.3. Influência da umidade relativa a) retração por secagem e b) fluência (International Recommendations for the Design and Construction of Concrete Structures, CEB/FIP, 1970)
2.3.3. Geometria do Elemento de Concreto

Devido à resistência ao transporte da água do interior do concreto para a atmosfera, a taxa de perda de água seria controlada, obviamente, pelo comprimento do caminho percorrido pela água, que está sendo expelida durante a retração por secagem e/ou fluência.

A umidade relativa constante, tanto o tamanho quanto a forma da peça de concreto determinam a magnitude da retração por secagem e da fluência. É conveniente expressar os parâmetros de tamanho e forma por uma única quantidade expressa em termos de espessura teórica ou efetiva, que é igual à área da seção dividida pelo semiperímetro em contato com a atmosfera. As relações entre as espessuras teóricas e os coeficientes de retração por secagem e fluência, conforme mostrados nos gráficos do CEB, são apresentados pelas Figuras 2.4.a) e b).

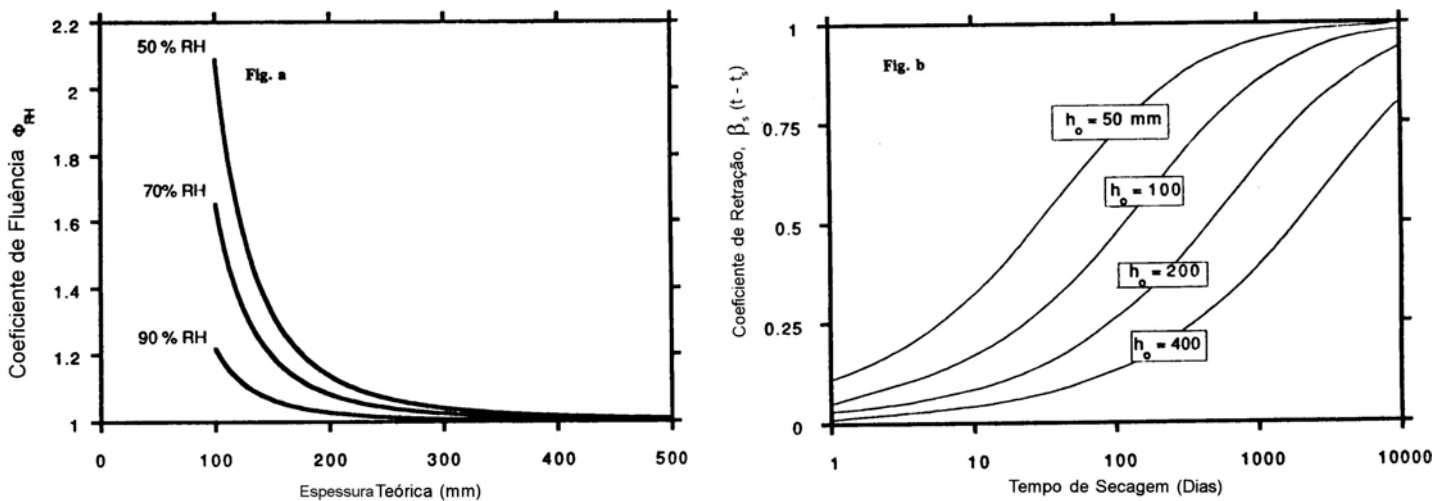


Figura 2.4. a) Influência do tamanho da peça e da umidade relativa (U%) no coeficiente de fluência b) Influência do tempo de exposição e do tamanho da peça sobre o coeficiente de retração por secagem (dados das equações do CEB-FIP Model Code, 1990)

2.3.4. Fatores Adicionais que Afetam a Fluência

Sabe-se que as condições de cura do concreto, a temperatura de exposição e a magnitude das tensões aplicadas afetam mais a fluência por secagem do que a retração por secagem, provavelmente devido a uma maior influência desses fatores sobre as características da zona de transição (ex.:porosidade, microfissuração e resistência). Dependendo das condições de cura de um elemento de concreto, as deformações por fluência podem ser, na prática, significativamente diferentes daquelas em um teste de

laboratório realizado sob umidade constante. Por exemplo, ciclos de secagem podem intensificar a microfissuração na zona de transição, aumentando assim a fluência.

A temperatura a qual o concreto é exposto pode ter dois efeitos opostos sobre a fluência. Se uma peça de concreto é exposta a uma temperatura maior do que a normal como parte do processo de cura, antes de ser carregada, a resistência aumentará e a deformação por fluência será menor do que aquela de um concreto correspondente armazenado a uma temperatura mais baixa. Por outro lado, a exposição à alta temperatura, durante o período em que está carregada pode aumentar a fluência. NASSER et al. [1967] descobriram que na faixa de 21 a 71°C, a fluência aos 350 dias aumentou aproximadamente 3,5 vezes com a temperatura. A influência da temperatura sobre a fluência é de muito interesse para as estruturas pré-moldadas de concreto para reatores nucleares porque a atenuação dos nêutrons e a absorção dos raios-gama fazem com que a temperatura do concreto aumente.

Com relação à intensidade das tensões TROXELL et al. encontram uma proporcionalidade direta entre a intensidade da tensão aplicada e a fluência do concreto com uma relação água cimento de 0,69 (2 MPa de resistência à compressão nominal). Por exemplo, corpos-de-prova curados por 90 dias e depois de carregados por 21 anos apresentam deformações por fluência de 680 , 1000 e 1450 x 10⁻⁶, correspondentes a níveis de tensões constantes de 4, 6 e 8 MPa, respectivamente (Figura 2.5). A proporcionalidade é válida enquanto a tensão aplicada está na faixa linear da relação tensão-deformação (ex.: relação tensão-deformação de 0,4 para uma tensão de compressão).

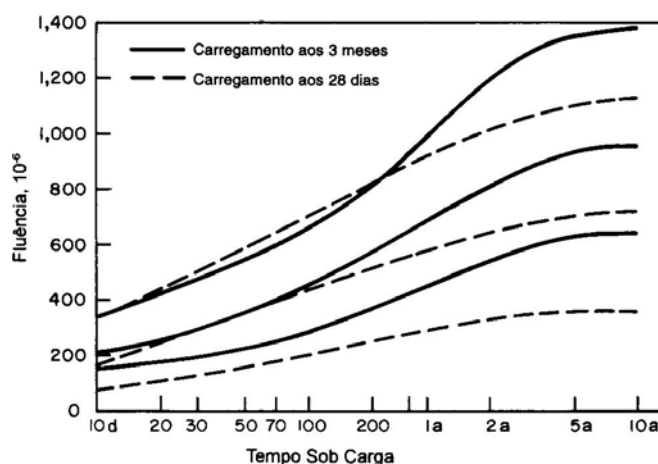


Figura 2.5. Efeito da magnitude da tensão aplicada na fluência (de G.E. Troxell et al., Proc. ASTM, Vol. 58, 1958. Reeditado com permissão de ASTM, 1916 Race Street, Philadelphia PA 19103)

2.4. Modelos Analíticos para Representação da Retração por Secagem e Fluência

A tensão e deformação em concreto armado estão sujeitas às variações ao longo do tempo, durante as quais a fluência e a retração do concreto aumentam gradualmente. Para analisar a variação da tensão e deformação ao longo do tempo, é necessário utilizar modelos analíticos que empreguem funções de tempo para deformação e tensão levando em consideração os materiais envolvidos.

Existe uma série de variáveis a se considerar quando se trata da fluência e retração, tais como: o módulo de elasticidade do concreto que aumenta com a idade deste; a idade do concreto quando carregado e do período decorrido após este carregamento; a qualidade do concreto e do ambiente onde este se encontra e a espessura da seção transversal do concreto.

Para prever analiticamente a fluência e retração do concreto, são utilizadas duas formas diferentes de aproximação:

1-) Aproximação empírico-experimental, na qual funções de tempo são determinadas a partir de um número de ensaios por aproximação da curva;

2-) aproximação analítica, na qual funções de tempo são obtidas por soluções de equações diferenciais de processos postulados administrando o comportamento da fluência e retração. Em ambos os casos, os parâmetros do modelo são obtidos por melhor aproximação da média dos resultados de vários ensaios. Há diversos modelos analíticos para determinação do coeficiente de fluência e retração do concreto sendo que, nesta pesquisa, será sempre que possível usado o da NBR:6118:2003 como referência. Entretanto, até como comparação para mostrar as diferenças que existe entre este e os outros modelos, são apresentados também para cálculo da fluência os modelos do CEB Model Code de 1978 [1978] e o do ACI Committee 209 [1982].

2.4.1. Modelo Analítico para Representação da Retração

Segundo a NBR6118:2003, o valor da retração do concreto depende da:

- a) umidade relativa do ambiente;
- b) consistência do concreto no lançamento;
- c) espessura fictícia da peça.

Dessa forma, a deformação devido à retração entre os instantes t_0 e t pode ser expressa por:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{s\infty} \cdot [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)]$$

Sendo:

$\varepsilon_{s\infty}$ – deformação total devido à retração depois do endurecimento do concreto até o tempo infinito, dada por:

$$\varepsilon_{s\infty} = \varepsilon_{s1} \cdot \varepsilon_{s2}$$

Sendo:

ε_{s1} - coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente e da consistência do concreto (vide tabela A.1 da NBR6118:2003) apresentado na tabela 2.1;

ε_{s2} – coeficientes que depende da espessura fictícia da peça, dadas por:

$$\varepsilon_{s2} = \frac{33 + 2 \cdot h_{fic}}{20,8 + 3 \cdot h_{fic}}$$

Tabela 2.1 Valores usuais para a determinação da fluência e da retração (tabela A.1 da NBR6118:2003)

Ambiente	Umidade U %	Fluência φ_{1c} ^{1) 3)}			Retração $10^4 \varepsilon_{1s}$ ^{2) 3)}			γ ⁴⁾
		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	+ 1,0	+ 1,0	30,0
Em ambiente muito úmido imediatamente acima da água	90	1,0	1,3	1,6	- 1,0	- 1,3	- 1,6	5,0
Ao ar livre, em geral	70	1,5	2,0	2,5	- 2,5	- 3,2	- 4,0	1,5
Em ambiente seco	40	2,3	3,0	3,8	- 4,0	- 5,2	- 6,5	1,0

¹⁾ $\varphi_{1c} = 4,45 - 0,035U$ para abatimento no intervalo de 5 cm a 9 cm e $U \leq 90\%$.
²⁾ $10^4 \varepsilon_{1s} = -6,16 - (U/484) + (U^2/1590)$ para abatimentos de 5 cm a 9 cm e $U \leq 90\%$.
³⁾ Os valores de φ_{1c} e ε_{1s} 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.
⁴⁾ $\gamma = 1 + \exp(-7,8 + 0,1 U)$ 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.

Sendo:

h_{fic} - espessura fictícia, em centímetros dada por:

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

Sendo:

γ - coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente. Coeficiente dado na tabela A1 da NBR6118:2003, dado por:

$$\gamma = 1,25 \cdot [1 + \exp(-7,8 + 0,1 \cdot U)]$$

A_c - área da seção transversal da peça;

u_{ar} - perímetro externo da seção transversal em contato com o ar;

$\beta_s(t)$ ou $\beta_s(t_0)$ - coeficiente relativo à retração, no instante t ou t_0 (figura A.3 da NBR:6118:2003) dado pela figura 2.3;

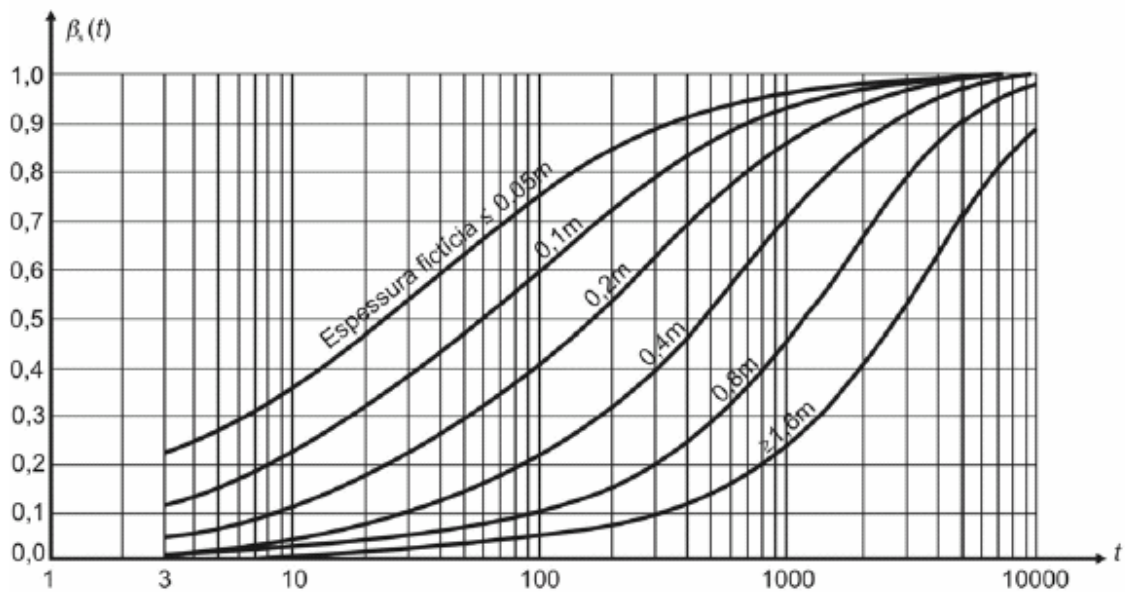


Figura 2.3. Ábaco de variação de $\beta_s(t)$ em relação ao tempo em dias (figura A.3 da NBR:6118:2003)

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;

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

Sendo:

t- idade fictícia (dias)

α - coeficiente dependente da velocidade de endurecimento do cimento. Coeficiente dado pela tabela A2 da NBR6118:2003 ou pela tabela 2.2

T_i - temperatura média diária do ambiente (°C)

$\Delta t_{ef,i}$ - período em que a temperatura média diária do ambiente se manteve constante (dias)

Tabela 2.2. Valores da fluência e da retração em função da velocidade de endurecimento do cimento (A2 da NBR6118:2003)

Cimento Portland (CP)	α	
	Fluência	Retração
De endurecimento lento (CP III e CP IV, todas as classes de resistência)	1	1
De endurecimento normal (CP I e CP II, todas as classes de resistência)	2	
De endurecimento rápido (CP V-ARI)	3	
<p>Onde:</p> <p>CP I e CP I-S - Cimento Portland comum;</p> <p>CP II-E, CP II-F e CP II-Z - Cimento Portland composto;</p> <p>CP III - Cimento Portland de alto forno;</p> <p>CP IV - Cimento Portland pozolânico;</p> <p>CP V-ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial;</p> <p>RS - Cimento Portland resistente a sulfatos (propriedade específica de alguns dos tipos de cimento citados).</p>		

2.4.2. Modelo Analítico Para Determinação do Coeficiente de Fluência do Concreto Segundo a NBR 6118:2003

Entre os diversos modelos para representar o coeficiente de fluência escolheu-se comentar mais profundamente o da NBR 6118:2003 que tem sido empregado há quase vinte anos.

O modelo descrito nesta norma divide a deformação por fluência do concreto (ϵ_{cc}), em duas partes, sendo uma delas chamada de fluência rápida (ϵ_{cca}) e a outra de fluência lenta. A primeira parte é dita irreversível e seu efeito é significativo durante as primeiras vinte e

quatro horas após a aplicação da carga de origem. A segunda parte é composta por duas outras parcelas, uma lenta e irreversível (ε_{ccf}) e a outra lenta e reversível (ε_{ccd}). Assim, a deformação total é definida por:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{cca} + \varepsilon_{ccf} + \varepsilon_{ccd}$$

E:

$$\varepsilon_{c' \text{ total}} = \varepsilon_c + \varepsilon_{cc} = \varepsilon_c (1 + \varphi)$$

Sendo:

$$\varphi = \varphi_a + \varphi_f + \varphi_d$$

Onde:

φ_a - coeficiente de fluência rápida;

φ_f - coeficiente de deformação lenta irreversível;

φ_d - coeficiente de deformação lenta reversível.

Este método apresenta algumas hipóteses de simplificação para aplicação no cálculo dos efeitos da fluência para concreto submetido às tensões de serviço. Estas hipóteses são descritas abaixo:

- a deformação por fluência ε_{cc} varia linearmente com a tensão aplicada;
- para acréscimos de tensão aplicados em instantes distintos, os respectivos efeitos de fluência se superpõem;
- a fluência rápida produz deformações constantes ao longo do tempo;
- os valores do coeficiente φ_a são função da relação entre a resistência do concreto no momento da aplicação da carga e a sua resistência final;
- o coeficiente de deformação lenta reversível φ_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;
- o coeficiente de deformação lenta irreversível φ_f depende da:
 - umidade relativa do ambiente (U);

- consistência do concreto no lançamento (abatimento);
- espessura fictícia da peça (h_{fic});
- idade fictícia do concreto no instante (t_0) da aplicação da carga;
- idade fictícia do concreto no instante considerado (t);
- 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 Figura 2.5.

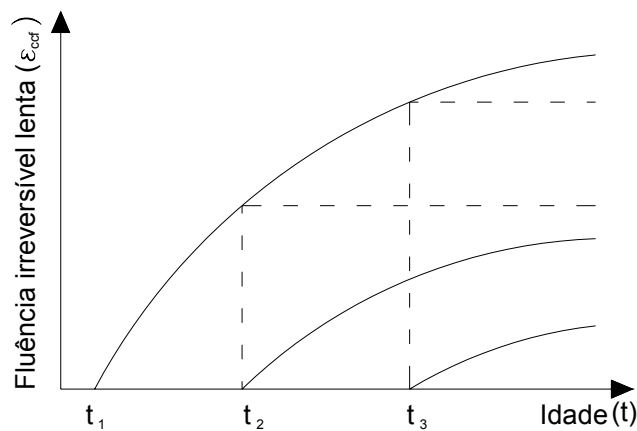


Figura 2.5. Curvas de $\epsilon_{ccf}(t)$ – NBR 6118:2003

Assim o valor da deformação específica do concreto devido à fluência é dado por:

$$\epsilon_{cc}(t, t_0) = \epsilon_{cca} + \epsilon_{ccd} = \frac{\sigma_c}{E_{c28}} \cdot \varphi(t, t_0)$$

Com E_{c28} calculado conforme equação:

$$E_{c28} = 5600 \sqrt{f_{cj}} \quad (\text{valores em MPa})$$

Para $j = 28$ dias. O coeficiente de fluência $\varphi(t, t_0)$, válido também para a tração, é dado por:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_a + \varphi_{f00} [\beta_f(t) - [\beta_f(t_0)]] + \varphi_{d00} \beta_d$$

Onde:

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

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

ϕ_a - coeficiente de fluência rápida, determinado pela expressão

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

$\frac{f_c(t_0)}{f_c(t_{00})}$ = função de crescimento da resistência do concreto com a idade,

$$\frac{f_c(t_0)}{f_c(t_{00})} = \frac{9t \cdot (t + 42)}{(9t + 40) \cdot (t + 61)}$$

$\phi_{f00} = \phi_{1c} \cdot \phi_{2c}$ = valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível;

ϕ_{1c} - coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente U% e da consistência do concreto dado pela tabela 5.2 da NBR6118:2003;

ϕ_{2c} - coeficiente dependente da espessura fictícia h_{fic} da peça:

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

Com h_{fic} em centímetros;

$\beta_f(t)$ ou $\beta_f(t_0)$ = coeficiente relativo à deformação lenta irreversível, função da idade do concreto (Figura 2.6);

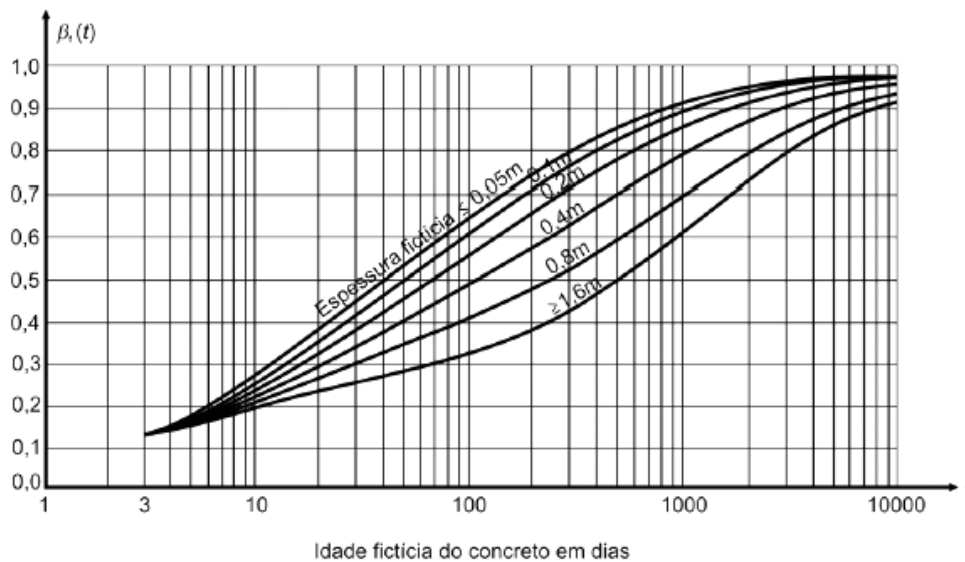


Figura 2.6. Ábaco da variação $\beta_f(t)$ em relação à idade fictícia do concreto em dias (figura A.2 da NBR:6118:2003)

φ_{doo} - valor final do coeficiente de deformação lenta reversível que é considerado igual a 0,4;

β_d - coeficiente relativo à deformação lenta reversível função do tempo ($t - t_0$) decorrido após o carregamento, definido por:

$$\beta_d = \frac{t - t_0 + 20}{t - t_0 + 70}$$

2.4.3. Modelo Numérico Para Determinação do Coeficiente de Fluência do Concreto segundo CEB-FIP Model Code 1978 (MC-78)

Este modelo apresenta as mesmas hipóteses para aplicação no cálculo dos efeitos da fluência para concreto submetido às tensões de serviço da NBR 6118:2003, citadas no item 2.3.2.1. Entretanto, emprega o símbolo φ (coeficiente de fluência) de forma diferente, portanto será adotado o símbolo φ_{CEB} para o coeficiente de fluência do MC-78. Para o MC-78 a equação que expressa a deformação total no tempo t , deformação instantânea somada à deformação ao longo do tempo, devido à tensão constante $\sigma_i(t_0)$ aplicada no tempo t_0 é dada por:

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_i(t_0)}{E_c(t)} \cdot \left(1 + \frac{E_c(t_0)}{E_c(28)} \cdot \varphi_{\text{CEB}}(t, t_0) \right)$$

Onde:

$E_c(28)$ – é o módulo de elasticidade na idade de 28 dias

Como pode ser visto no MC-78, φ_{CEB} deve ser multiplicado pela razão entre o módulo de elasticidade em t_0 e o módulo de elasticidade a 28 dias $\left(\frac{E_c(t_0)}{E_c(28)} \right)$ para obter o valor do coeficiente de fluência utilizado na NBR 6118:2003. Esta razão pode ser calculada através de:

$$\frac{E_c(t_0)}{E_c(28)} = \left(\frac{t_0}{4,2 + 0,85 \cdot t_0} \right)^{1/2}$$

2.4.4. Modelo Analítico Para Determinação do Coeficiente de Fluência do Concreto segundo ACI Committee 209

Este modelo apresenta equações válidas para “condições padrão”. “Condições padrão” são definidas como valores limites para uma série de variáveis relacionadas às propriedades do material, às condições climáticas e dimensão das peças.

O coeficiente de fluência no tempo t_0 de carregamento até o tempo t qualquer é dado segundo ACI por:

$$\varphi(t, t_0) = \frac{(t - t_0)^{0,6}}{10 + (t - t_0)^{0,6}} \cdot \varphi_u$$

Onde:

$$\varphi_u = \varphi(t_\infty, t_0)$$

φ_u – fluência última desde a data de carregamento t_0 até tempo no infinito (10000 dias), dada por:

$$\varphi_u = 2,35 \cdot \gamma_c$$

Onde:

γ_c – fator de correção, produto de uma série de multiplicadores dependentes da umidade relativa, média de espessuras das peças ou razão entre volume e superfície e da temperatura.

Dessa forma, é considerada como “condições padrão”:

- Umidade relativa: 40%
- Média das espessuras das peças: 15cm
- Razão entre volume e superfície: 3,75cm
- Temperatura: 21°C

Considerando essas “condições padrão”, γ_c pode ser calculada como função da idade de carregamento:

$$\gamma_c = 1,25 \cdot t_0^{-0,118}$$

ou

$$\gamma_c = 1,13 \cdot t_0^{-0,094}$$

As expressões são respectivamente aplicáveis para cura úmida do concreto e para cura a vapor do concreto de um a três dias. As duas equações apresentam valores de γ_c próximos a um quando t_0 igual a sete e três dias, respectivamente.

2.5. Valores simplificados de Coeficiente de fluência e de Retração na tração no tempo infinito

A NBR6118:2003 também prescreve valores médios finais dos coeficientes de fluência e retração através de uma tabela (tabela 2.3).

Tabela 2.3. Valores característicos superiores para a deformação específica de retração $\epsilon_{cs}(\infty, t_0)$ e o coeficiente de fluência $\phi(\infty, t_0)$ (Tabela 8.1 da NBR6118:2003)

Umidade ambiente %		40		55		75		90		
Espessura fictícia $2A_c/u$ cm		20	60	20	60	20	60	20	60	
$\phi(t_\infty, t_0)$	t_0 dias	5	4,4	3,9	3,8	3,3	3,0	2,6	2,3	2,1
		30	3,0	2,9	2,6	2,5	2,0	2,0	1,6	1,6
		60	3,0	2,6	2,2	2,2	1,7	1,8	1,4	1,4
$\epsilon_{cs}(t_\infty, t_0)$ ‰	t_0 dias	5	-0,44	-0,39	-0,37	-0,33	-0,23	-0,21	-0,10	-0,09
		30	-0,37	-0,38	-0,31	-0,31	-0,20	-0,20	-0,09	-0,09
		60	-0,32	-0,36	-0,27	-0,30	-0,17	-0,19	-0,08	-0,09

Com os valores da tabela, pode-se notar como varia o coeficiente de fluência em função da idade do concreto no carregamento (t_0) e da umidade relativa ($U_r(\%)$) por meio dos Gráficos 2.1 e 2.2.

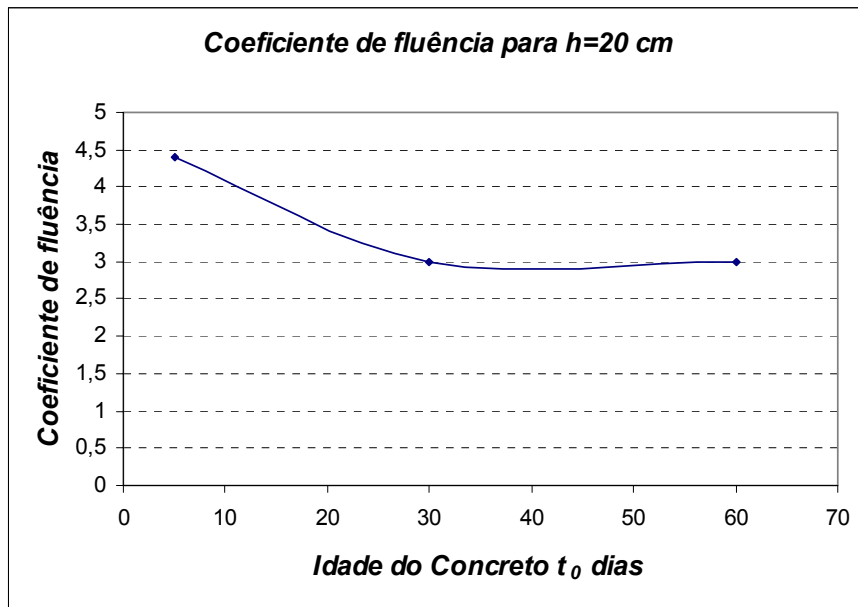


Gráfico 2.1. Variação do coeficiente de fluência com a idade do concreto t_0

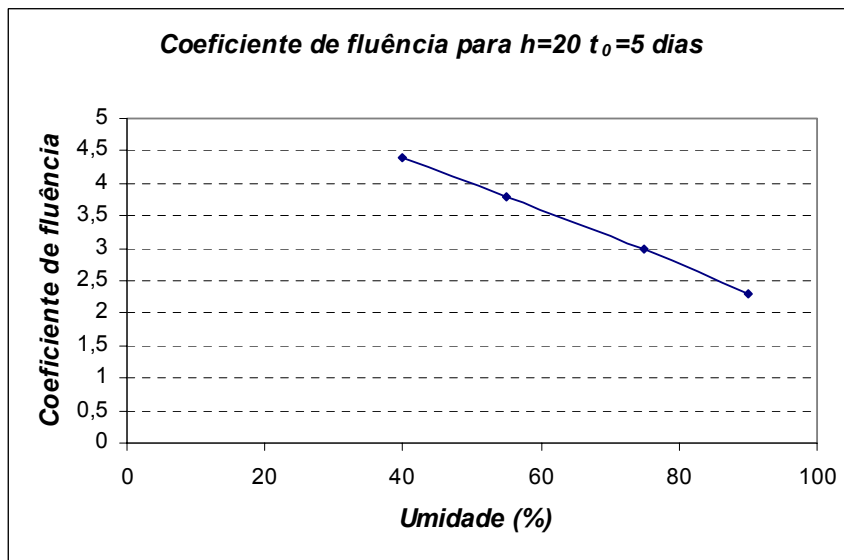


Gráfico 2.2. Variação do coeficiente de fluência com a umidade relativa

DEFORMAÇÃO DE LAJES PRÉ-FABRICADAS

3

Capítulo

Um pavimento composto por laje com nervuras pré-moldadas apresenta um comportamento estrutural intermediário entre os executados com elementos independentes e aqueles com lajes maciças, apresentando deformações maiores que estas últimas.

Como mostra o trabalho de MESQUITA [1999] a condição determinante para a escolha da altura de elementos desse tipo, na maioria dos casos, é a deformação excessiva. Sabe-se que a flecha aumenta ao longo da vida da estrutura (ou do elemento estrutural), principalmente, devido à fluência do concreto.

Estado limite de deformações excessivas, segundo o item 13.4.1 da NBR6118:2003, é o estado em que as deformações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal da construção.

Para a verificação dos estados limites de deformações excessivas, devem ser analisadas além das combinações de ações apropriadas, as características geométricas das seções, os efeitos da fissuração e fluência do concreto e as flechas limites. Antecipa-se já que a parcela de deformação ao longo do tempo é em geral maior que a deformação imediata assim, o que torna importante a sua determinação com mais propriedade.

Basicamente, como será visto, há três fatores que precisam ser definidos: 1) a destinação da estrutura, 2) a combinação de ações que deve ser empregada e 3) o valor limite de deslocamento, ou seja, flecha limite.

Na NBR6118:2003 não existe altura útil, como era estabelecido nas versões anteriores, a partir da qual é dispensado o cálculo dos deslocamentos, ou seja, sempre será necessário avaliar as flechas nos elementos estruturais.

Os valores de flechas limites para o estado de deformação excessiva estão elencados no item 17.3.2 da NBR6118:2003, que estabelece critérios para a verificação dos

valores limites para a deformação da estrutura, mais propriamente rotações e deslocamentos em peças lineares, analisadas isoladamente e submetidas à combinação de ações (combinações de serviço). Os valores limites são aqueles prescritos no item 13.2 da NBR6118:2003.

O valor dos deslocamentos e rotações deverá ser determinado através de modelos que considerem a rigidez efetiva das seções da peça estrutural, ou seja, levem em consideração a presença da armadura, a existência de fissuras ao longo daquela e as deformações diferidas no tempo.

Portanto, no próximo item serão apresentados os critérios de cálculo da flecha em vigas de concreto armado, tanto para flecha imediata quanto para flecha ao longo do tempo, usando como fonte principal CARVALHO E FIGUEIREDO [2004], dentro dos princípios e conceitos estabelecidos na NBR6118:2003.

3.1. Deslocamentos Limites

De acordo com o item 13.3 da NBR6118 “deslocamentos limites são valores práticos utilizados para verificação do estado limite de deformações excessivas da estrutura”. Os deslocamentos excessivos e tendência à vibração dos elementos estruturais podem ser indesejáveis por diversos motivos. Esses motivos podem ser classificados em quatro grupos básicos:

aceitabilidade sensorial: o limite é caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável. A limitação da flecha para prevenir essas vibrações, em situações especiais de utilização, deve ser realizada como estabelecido na seção 23 da norma. Limites para esses casos são apresentados na tabela 13.2, NBR6118:2003;

efeitos específicos: os deslocamentos podem impedir a utilização adequada da construção; limites para esses casos são apresentados na tabela 13.2, NBR6118:2003;

efeitos em elementos não estruturais: deslocamentos estruturais podem ocasionar o mau funcionamento de elementos que, apesar de não fazerem parte da estrutura, estão a ela ligados. Limites para esses casos são apresentados na tabela 13.2, NBR6118:2003;

efeitos em elementos estruturais: os deslocamentos podem afetar o comportamento

do elemento estrutural, provocando afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas. Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-se ao modelo estrutural adotado.

3.2. Características Geométricas das Seções Transversais de Concreto

Antes de calcular os deslocamentos das vigas é necessário conhecer as características geométricas, em específico, o valor da inércia da seção no estágio I e II, submetidas às ações de serviço. Desta forma, será desenvolvida, nos próximos itens, a teoria para o cálculo da inércia e demais propriedades geométricas das seções em concreto armado no estágio I e II.

3.2.1. Características Geométricas de Seções no Estádio I

Nas peças de concreto armado todo o detalhamento da armadura é feito no sentido de se garantir a aderência das barras de aço com o concreto, de modo que os dois materiais trabalhem solidariamente. Assim, o centro de rotação da seção e a rigidez da mesma são afetados pelo posicionamento da armadura e, neste caso, deve ser feita a homogeneização da seção, que consiste em considerar no lugar da área de aço existente A_s , uma área de concreto equivalente. Nesta situação supõe-se que há linearidade entre tensão e deformação (vale a Lei de Hooke, pois as deformações são pequenas) e, como as deformações específicas do aço e do concreto são iguais ($\varepsilon_c = \varepsilon_s$), devido a aderência, tem-se:

$$R_s = A_s \cdot \sigma_s = A_s \cdot \varepsilon_s \cdot E_s \quad \text{ou}$$

$$R_s = A_s \cdot \varepsilon_c \cdot E_s$$

sendo R_s , A_s e E_s a força e a área da armadura e o módulo de deformação longitudinal do aço respectivamente.

Para homogeneizar a seção, é preciso encontrar uma área de concreto (área equivalente) que suporte uma força igual à da armadura, ou seja:

$$R_s = A_{c,eq} \cdot \varepsilon_c \cdot E_c$$

onde E_c é o módulo de deformação longitudinal do concreto; igualando as duas expressões de R_s é possível encontrar a relação entre a área de concreto e da armadura:

$$A_s \cdot \varepsilon_c \cdot E_s = A_{c,eq} \cdot \varepsilon_c \cdot E_c \quad \rightarrow \quad A_{c,eq} = \frac{A_s \cdot E_s}{E_c} = A_s \cdot \frac{E_s}{E_c}$$

e chamando de α_e a relação entre os módulos de deformação longitudinal do aço e do concreto ($\alpha_e = \frac{E_s}{E_c}$), a área equivalente de concreto fica dada por:

$$A_{c,eq} = A_s \cdot \alpha_e$$

Imaginando agora uma retangular seção transversal de concreto armado como a indicada na figura 3.1.a) pode ser mostrado que a seção final é composta por uma área de concreto igual a $b \cdot h$ e uma seção de concreto equivalente devido ao aço de $A_s \cdot (\alpha_e - 1)$. O valor igual a 1 dentro dos parêntesis é para considerar que na verdade a área original de concreto teria que ser descontada de A_s .

Na figura 3.1b mostram-se as reações que ocorrem no concreto e armadura gerando as forças C_c , T_c e T_s que são iguais a :

$$C_c = \frac{\sigma_c b x_i}{2}; \quad T_c = \frac{\sigma_c^* b \cdot (h - x_i)}{2} \quad \text{e} \quad T_s = A_s \cdot (\alpha_e - 1) \cdot \varepsilon_s$$

Colocando todas as forças em função da tensão de compressão no concreto σ_c :

$$C_c = \frac{\sigma_c b x_i}{2}; \quad T_c = \frac{\sigma_c b \cdot (h - x_i)^2}{x_i 2} \quad \text{e} \quad T_s = A_s (\alpha_e - 1) \frac{\sigma_c}{x_i} (d - x_i).$$

Como se trata de flexão simples então há o equilíbrio entre as três forças:

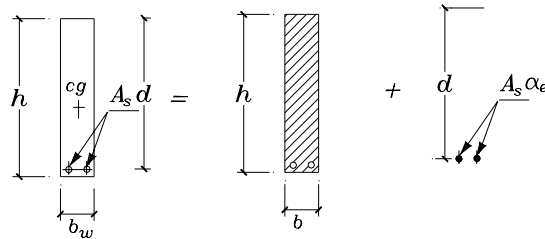
$$C_c = T_c + T_s$$

$$\frac{b x_i}{2} = \frac{b \cdot (h - x_i)^2}{x_i 2} + A_s \cdot (\alpha_e - 1) \frac{(d - x_i)}{x_i}$$

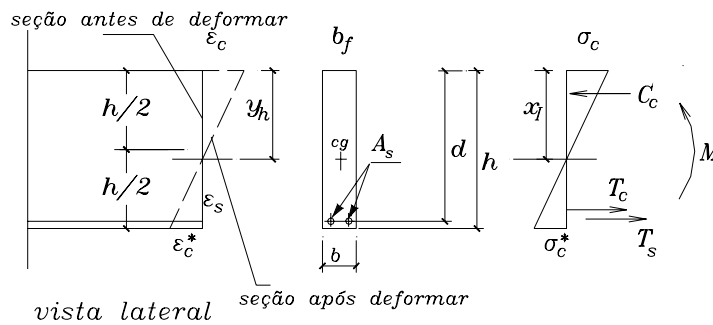
$$\frac{b x_i^2}{2} = \frac{b \cdot (h - x_i)^2}{2} + A_s \cdot (\alpha_e - 1) (d - x_i)$$

A expressão anterior corresponde ao momento estático de cada área (a de concreto comprimido, a de concreto tracionado e a do aço tracionado) em relação ao eixo de giro da

seção, mostrando que se trata realmente do cg da seção homogeneizada. Desta forma pode-se concluir que após a homogeneização da seção, ou seja, da transformação do aço em concreto equivalente pode-se calcular normalmente todas as características geométricas que será feito para a seção em forma de T mais adiante.



a) seção transversal composta de seção de concreto e de aço transformada em área equivalente de concreto



b) seção transversal no estágio I com reações

Figura 3.1. Seção retangular homogeneizada trabalhando no estágio I

Quando se efetua o detalhamento de uma estrutura de concreto armado, em princípio não se conhecem nem as dimensões e muito menos as áreas das armaduras. Desta forma, arbitram-se, inicialmente, dimensões para os diversos elementos para determinar as ações e em seguida proceder ao cálculo dos esforços solicitantes. Nas estruturas hiperestáticas, tais como vigas contínuas, grelhas e pórticos, são necessários definir as características geométricas dos diversos elementos para a determinação dos esforços solicitantes, mesmo que se esteja empregando programa de computador. É usual escolher inicialmente as características das seções considerando-as compostas somente por concreto, ou seja, desconsiderando a presença da armadura.

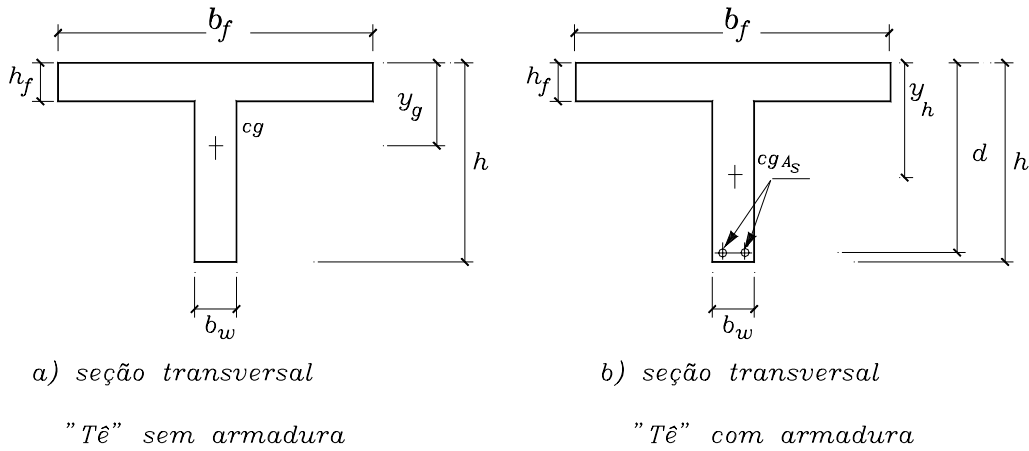


Figura 3.2. Elementos de seção transversal em forma de "T"

As expressões para uma seção em forma de "T" (figura 3.2) estão apresentadas na tabela 3.1.

Uma vez determinada a quantidade de armadura necessária, pode-se agora trabalhar com a seção composta por aço e concreto usando o procedimento de homogeneização. Para uma seção "T", as expressões são as da Tabela 3.2.

As fórmulas relacionadas nas Tabelas 3.1 e 3.2 aplicam-se também às seções retangulares, bastando igualar os valores de b_f e h_f a zero.

Tabela 3.1. Características geométricas de seções transversais em "T", no estágio I, sem considerar a presença da armadura

	Expressão
Área (seção geométrica)	$A_g = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h$
Centro de gravidade	$y_{cg} = \frac{(b_f - b_w) \cdot \left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w \cdot \frac{h^2}{2}}{A_g}$
Momento de inércia à flexão	$I_g = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(y_{cg} - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w \cdot h \cdot \left(y_{cg} - \frac{h}{2}\right)^2$

É interessante destacar que as características geométricas da seção de concreto sem armadura, chamada de bruta pela norma de concreto, em diversas situações pouco diferem

daquelas em que se considera a armadura (seções homogeneizadas), podendo-se em alguns casos calcular apenas as referentes à seção bruta, ao invés da homogeneizada.

Tabela 3.2. Características geométricas de seções transversais em "T", no estágio I, com armadura longitudinal A_s .

	Expressão
Área (seção homogeneizada)	$A_h = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h + A_s \cdot (\alpha - 1)$
Centro de gravidade	$y_h = \frac{(b_f - b_w) \cdot \left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w \cdot \frac{h^2}{2} + A_s (\alpha - 1) \cdot d}{A_h}$
Momento de inércia à flexão	$I_h = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(y_h - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w \cdot h \cdot \left(y_h - \frac{h}{2}\right)^2 + A_s \cdot (\alpha - 1) \cdot (y_h - d)^2$

3.2.2. Características Geométricas de Seções no Estádio II

Se Aumentado o valor do momento fletor atuante na seção, as tensões de tração na maioria dos pontos abaixo da linha neutra (LN) terão valores superiores ao da resistência característica do concreto à tração (f_{tk}) conduzindo ao estágio II (estado de fissuração) em que se admite ainda:

- os esforços de tração são resistidos apenas pela armadura localizada abaixo da linha neutra;
- há uma relação linear entre tensão e deformação específica no concreto para todos os pontos da seção transversal.

Cabe destacar que esta é uma situação limite do estágio II, pois todo o concreto da região fissurada está sendo desprezado, e, portanto é usual, neste caso, para diferenciar, nomeá-la como estágio II puro.

O estágio II puro compreende a situação em que atua na seção um momento maior que o momento de fissuração, até à situação em que começa a ocorrer o escoamento da seção, e apresenta as seguintes características:

a distribuição das tensões de compressão no concreto é triangular;

concreto não trabalha à tração, sendo este esforço resistido apenas pela armadura presente abaixo da linha neutra;

não ocorre escoamento do aço nem plastificação do concreto.

Na figura 3.3 indica-se o que ocorre em uma seção do tipo “T” quando atua um momento maior que o de fissuração.

Para o cálculo do momento de inércia no estágio II puro é necessário que se conheça a posição x_{II} da linha neutra, obtida fazendo o momento estático da seção homogeneizada igual a zero. O cálculo de x_{II} pode ser encontrado em GHALI e FAVRE (1986), que em casos de vigas com seção em forma de “T” é obtido da equação do segundo grau:

$$a_1 \cdot x_{II}^2 + a_2 \cdot x_{II} + a_3 = 0$$

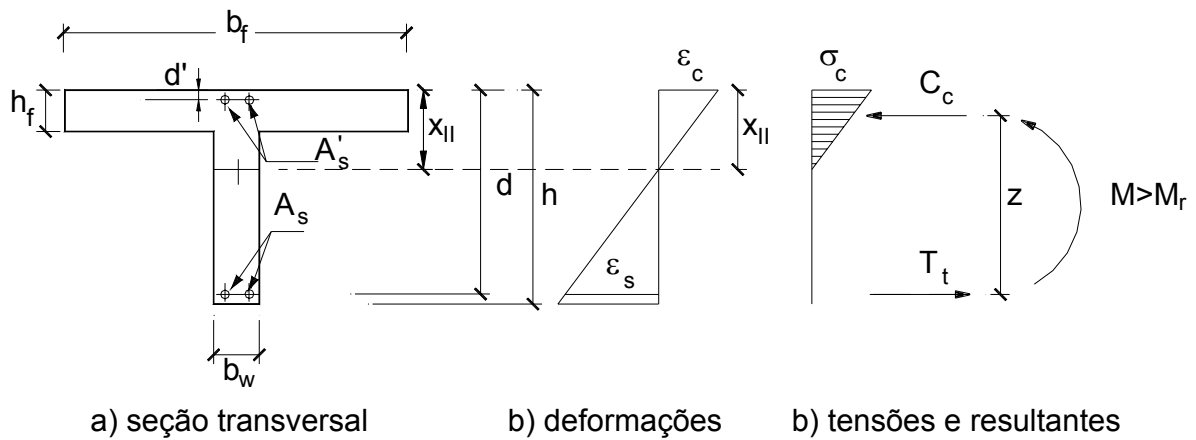


Figura 3.3. Seção transversal em forma de “T” no estágio II puro

cuja solução é

$$x_{II} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1}$$

com os coeficientes a_1 , a_2 e a_3 iguais a:

$$a_1 = b_w / 2$$

$$a_2 = h_f \cdot (b_f - b_w) + (\alpha_e - 1) \cdot A'_s + \alpha_e \cdot A_s$$

$$a_3 = -d' \cdot (\alpha_e - 1) \cdot A'_s - d \cdot \alpha_e \cdot A_s - \frac{h_f^2}{2} \cdot (b_f - b_w)$$

sendo d' sendo a distância do centro de gravidade da armadura comprimida A'_s até a borda comprimida de concreto.

Para situações em que a viga tem seção transversal retangular e não existe armadura negativa, as equações também são válidas, bastando fazer $b_w = b_f$, $h_f = 0$ e $A'_s = 0$.

É possível agora calcular o momento de inércia da seção no estágio II puro (I_{x,II_0}), em relação à linha neutra, cuja posição x_{II} foi determinada considerando o valor da profundidade da linha neutra inferior a espessura da mesa ($x_{II} < h_f$):

$$I_{x,II_0} = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(y_h - \frac{h_f}{2} \right)^2$$

$$I_{x,II_0} = \frac{b_w \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (x - d)^2$$

As características das seções tanto no Estádio I como no estágio II puro pode ser obtido por um programa desenvolvido por MOLINA [1999].

3.3. Rigidez Equivalente

Até aqui se discorreu apenas sobre as características de uma seção transversal, porém numa estrutura, dependendo do diagrama de esforços solicitantes poderá ter trechos fissurados e não fissurados sendo assim prática usual adotar valor proposto por BRANSON [1963] e já contido na NBR 6118:2003, dada a seguir:

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

Onde:

- I_c – Momento de inércia da seção bruta de concreto;
- I_{II} – momento de inércia da seção fissurada de concreto no Estádio II, calculado com o coeficiente $\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}}$;
- 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, na combinação de ações considerada nessa avaliação;
- M_r – é o momento de fissuração da peça; para barras lisas, deve ser reduzido à metade; e dado pela expressão: $M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct,imf} \cdot I_c}{y_t}$
- α - igual a 1,2 para seções em forma de T ou duplo T e 1,5 para seções retangulares;
- I_c – momento de inércia da seção bruta;
- $f_{ct,inf}$ – resistência à tração direta do concreto, conforme item 8.2.5 da norma:
- $$f_{ct,imf} = 0,21 f_{ck}^{2/3}$$
- y_t – distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada;
- E_{cs} – módulo de elasticidade secante do concreto.

3.4. Cálculo da Flecha Imediata

O cálculo da flecha imediata ou instantânea, devido à variabilidade do módulo de elasticidade do concreto, até das condições de vínculos entre os elementos da estrutura que nem sempre são tão simples como os utilizados em laboratório, pode-se dizer que é na verdade apenas uma previsão. Estabelecido este raciocínio ainda é necessário dizer que o cálculo da flecha dependerá fundamentalmente se as seções da estrutura apresentam fissuração ou não. Quando a peça não possuir seção fissurada, pode-se admitir a inércia da

peça como sendo da seção bruta no estágio I, e caso contrário usa-se de procedimentos de cálculo não-linear ou em caso de elementos simplesmente apoiados, como é em geral o caso de laje pré-fabricadas, considera-se uma inércia média entre os estádios I e II, como a da expressão de BRANSON [1968] dada no item anterior. Maiores detalhes de cálculos lineares podem ser vistos em CARVALHO [1994] e para pavimentos mais sofisticados com lajes pré-moldadas o modelo de grelha equivalente amplamente discutido em FLÓRIO [2003].

3.4.1. Cálculo de Flechas Imediatas em Peças com Seções Fissuradas ou Não

O cálculo da flecha imediata ou instantânea (deslocamento transversal máximo em um elemento sem levar em conta o efeito da fluência do concreto) em laje unidirecional considerando altura constante apresenta o modelo mais simples o de viga isolada. Este modelo pode ser feito a partir da equação da resistência dos materiais para seções retangulares, desde que o momento de fissuração não for ultrapassado em nenhuma seção:

$$a = \frac{\alpha \cdot p \cdot \ell^4}{E_c \cdot I}$$

Onde:

p – Carga definida por uma certa combinação (por exemplo freqüente);

ℓ – vão da viga;

$E_{cs} = 0,85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$ (f_{ck} em MPa): módulo de elasticidade secante do concreto;

I – inércia bruta;

α – coeficiente cujo valor depende da condição estática do sistema considerado (simplesmente apoiado, contínuo) e do tipo de ações atuantes; pode ser encontrado em livros de resistência dos materiais e de teoria das estruturas.

No caso de haver momentos fletores maiores que o de fissuração a expressão anterior pode ser usada considerando no lugar da rigidez EI a rigidez equivalente de BRANSON [1963] vista em 3.4.

3.5. Deformação ao Longo do Tempo Devido a Retração

Se a retração do concreto de um elemento fletido de concreto armado for uniforme e não houver impedimento por apoios ou armadura para o seu desenvolvimento o estado de deslocamento deste elemento não será afetado. Se a retração da borda superior de uma viga bi-apoiada ocorrer de maneira livre enquanto a relativa ao bordo inferior for restringida pela armadura de flexão surgirá uma curvatura que afetará o estado de deformação da mesma. De uma maneira geral, este efeito é desprezado.

De acordo com GHALI e FAVRE [1986], para uma viga simplesmente apoiada em concreto armado com seção constante, a retração não uniforme do concreto ocorrida em um determinado período produz em todas as seções uma curvatura de magnitude:

$$\frac{1}{r} = \varepsilon_{cs} \cdot \left(\frac{A_c \cdot y_c}{I} \right)$$

Sendo:

ε_c – deformação devido a retração livre;

A_c – área de concreto da seção transversal;

I – momento de inércia dado por:

$$I = \frac{I_g}{\kappa_s}$$

Sendo:

I_g – momento de inércia da seção bruta;

κ_s – coeficiente que leva em consideração o efeito da armadura na curvatura instantânea (vide FAVRE e GHALI [1986] e MACHADO [1989]);

y_c – centro de inércia da seção transversal, sendo a medida em relação as fibras inferiores.

Esta equação pode ser utilizada tanto para calcular a curvatura devido à retração para seções fissuradas quanto não fissuradas. Para as seções em que estão totalmente fissuradas, o concreto na região tracionada é desprezado e as propriedades geométricas da seção fissurada não altera o efeito da retração.

A curvatura ($1/r$) devido à retração depende principalmente da diferença entre a área de armadura existente na região tracionada e comprimida. Na seção de apoio de algumas vigas contínuas, há mais armadura na região superior tracionada da viga do que na inferior, sendo que no meio do vão ocorre o inverso. Neste caso, a curvatura devido à retração de qualquer vão, quando comparado a vigas biapoiadas, é positiva no meio do vão e negativa nos apoios, reduzindo o valor absoluto do momento positivo.

Para uma viga simplesmente apoiada de vão “ l ”, sem fissuração, a flecha no meio do vão devido à retração é dada por:

$$a_{cs} = \frac{1}{r} \cdot \frac{l^2}{8}$$

Para vigas simplesmente apoiadas de vão “ l ” fissuradas, a flecha devido à retração uniforme no meio do vão, pode ser determinada interpolando os valores de:

$$a_{cs} = -\varepsilon_{cs} \cdot k_1 \frac{l^2}{8 \cdot d}$$

$$a_{cs} = -\varepsilon_{cs} \cdot k_2 \frac{l^2}{8 \cdot d}$$

$$k_1 e k_2 = -\frac{A_c \cdot d}{I} \cdot y_c$$

Sendo:

k_1 e k_2 – coeficientes devido à retração para seção não fissurada e fissurada, respectivamente.

3.6. Deformação ao Longo do Tempo Devido à Fluência

Considera-se que as deformações de fluência sejam oriundas das ações permanentes. Porém, para calculá-las, é utilizada a combinação quase permanente, pois em edificações, parte da carga acidental atua em um longo período da vida da mesma.

Nas peças de concreto, a armadura comprimida inibe a deformação do concreto ao longo do tempo, tanto na retração como na fluência. Em peças fletidas, a armadura é normalmente posicionada na região tracionada, onde a contribuição do concreto na

resistência é pequena, sendo desprezada para efeito de cálculo; admite-se assim que não ocorre a fluência nessa região.

Verifica-se que para calcular a flecha em estruturas de concreto ao longo do tempo considerando a fluência é preciso considerar que a região de concreto comprimido sofra fluência e entender após esta hipótese o que ocorre. Há dois tipos de formulações para tanto: uma que considera o estado de deformação da peça, que pode ser obtido multiplicando-se os valores de deslocamentos por parâmetros que conduzirão ao deslocamento no tempo infinito, e outro em que se consideram as condições de equilíbrio na seção transversal, as condições de compatibilidade de deformação e necessariamente a posição da linha neutra nas diversas seções a cada instante. As formulações do primeiro tipo são mais simplistas e são prescritas pela NBR6118:1980, NBR6118:2003, e já para o segundo tipo a formulação descrita em SAMRA [1997].

Há um terceiro tipo de previsão de flechas que não será discutido nesta pesquisa que consiste em realizar a integração de tensões ao longo de diversas seções transversais e depois integrá-las ao longo da peça. Neste caso a solução precisa, em geral, de um processo numérico. A maior parte dos programas desenvolvidos com esta técnica utiliza o método dos elementos finitos. A grande dificuldade nesta situação seria aplicá-lo a um pavimento, por exemplo, constituído de vigas e lajes pré-fabricadas que requereria uma grande capacidade de memória de computador e um grande esforço de modelagem da estrutura.

3.6.1. Modelos Teóricos para Previsão de Flecha em Vigas

Existe uma série de modelos para a determinação da flecha ao longo do tempo, os quais foram desenvolvidas para prever o comportamento de vigas de concreto armado submetidas as cargas de serviço. Dentre os modelos existentes, resolveu-se separar quatro deles, sendo três, baseados nas normas brasileiras e um encontrado em artigo publicado:

- 1º) modelo da NBR 6118:2003 α_f ;
- 2º) modelo da NBR 6118:1978;
- 3º) modelo da NBR 6118: 2003 para peças não fissuradas;
- 4º) modelo de SAMRA [1997].

3.6.1.1. Modelo da NBR 6118:2003 (α_f)

Neste modelo, a flecha final diferida no tempo é definida de forma aproximada como sendo o produto da flecha imediata devido às cargas permanentes $a_{t,0}$ e um fator denominado α_f definido pela equação abaixo:

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1 + 50 \cdot \rho'}$$

Assim tem-se:

$$a_{t,\infty} = a_{t,0} \cdot (1 + \alpha_f)$$

Sendo:

$$\rho' = \frac{A'_s}{b \cdot d} \text{ (o valor de } \rho' \text{ será ponderado no vão);}$$

A'_s - área da armadura de compressão no trecho considerado;

ξ - coeficiente função do tempo, sendo $\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0)$;

$$\xi(t) = \begin{cases} 0,68 \cdot 0,996^t \cdot t^{0,32} & \text{para } t \leq 70 \text{ meses;} \\ 2 & \text{para } t \geq 70 \text{ meses} \end{cases};$$

t - tempo, em meses, quando se deseja o valor da flecha diferida;

t_0 - idade, em meses, relativa à data de aplicação da carga de longa duração; se as parcelas de cargas de longa duração forem adotadas em idades variadas, então

$$t_0 = \frac{\sum P_i \cdot t_{0i}}{\sum P_i};$$

P_i - parcelas de carga;

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

Como se pode notar a determinação da flecha neste modelo para vigas é totalmente desvinculado do modelo do coeficiente de fluência da mesma norma. Neste caso a flecha só depende da flecha inicial, da idade do concreto e da quantidade de armadura comprimida existente.

3.6.1.2. Modelo da NBR 6118:1978 - Relação entre as curvaturas (R_t/R_{t_0})

Este modelo de cálculo adota a hipótese de que a flecha inicial $a(t_0)$ é proporcional a relação entre as curvaturas (R_t/R_{t_0}) no tempo desejado t e no tempo inicial onde se dá o carregamento. Assim, tem-se a flecha diferida no tempo definida como:

$$a(t) = a(t_0) + a(t_0) \cdot \frac{R_t}{R_{t_0}}$$

Onde:

- $a(t)$ - deslocamento no tempo t ;
- $a(t_0)$ - deslocamento inicial no instante t_0 ;
- $R_t = \frac{(1 + \phi) \cdot |\varepsilon_c| + \varepsilon_s}{d}$: é a curvatura no instante t ;
- $R_{t_0} = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d}$: é a curvatura no instante t_0 ;
- ϕ - coeficiente de fluência;
- ε_c - deformação específica do concreto;
- ε_s - deformação específica do aço;
- d - altura útil da peça.

Para o cálculo das deformações no concreto e na armadura respectivamente, faz-se o equilíbrio de forças na seção igualando-se a força de compressão (F_c) com a força de tração (F_t). Assim calculam-se as deformações específicas em ambos (ε_c e ε_s) seguindo-se a seqüência de cálculo a seguir.

Em serviço, a distribuição das tensões de compressão no concreto pode ser tomada como linear, e dessa forma, por equilíbrio de momentos na seção, imaginando a peça no estágio II (ver figura 3.4) tem-se:

$$F_c = \frac{M}{d - \frac{x}{3}}$$

Sendo M o momento atuante e x a altura da linha neutra.

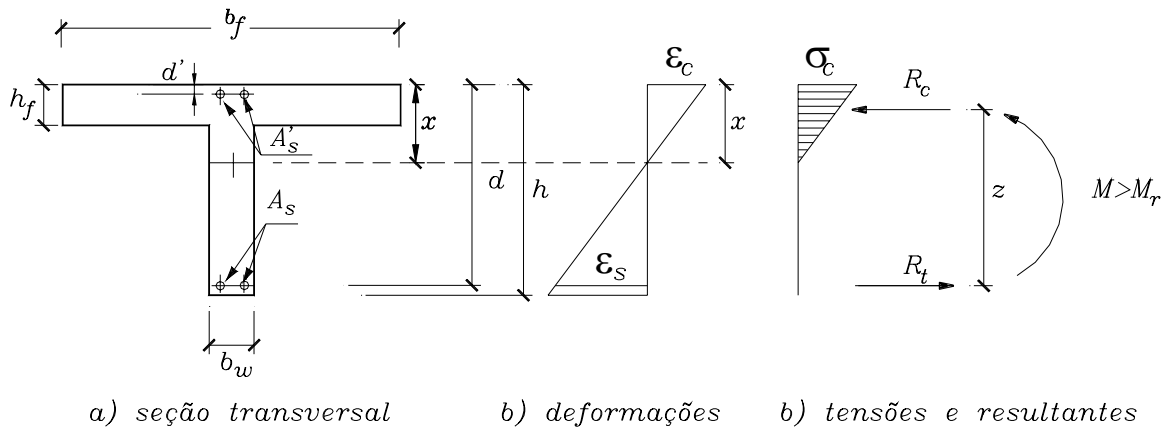


Figura 3.4. Seção transversal em forma de “T” no estágio II puro

Conhecida a força de F_c , e sabendo que ela também é a resultante das tensões de compressão no concreto, é possível obter a tensão na fibra mais solicitada do concreto:

$$\frac{\sigma_c \cdot x}{2} \cdot b_f = F_c \quad \rightarrow \quad \sigma_c = \frac{2 \cdot F_c}{b_f \cdot x}$$

E a deformação específica do concreto fica determinada pela relação:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c}$$

Como a força no aço e no concreto são iguais, pode ser determinada a deformação específica da armadura como:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{F_s}{A_s \cdot E_s} = \frac{F_c}{A_s \cdot E_s}$$

3.6.1.3. Modelo da NBR6118:2003 – Peças não Fissuradas

Para peças de concreto armado que trabalham no estágio I, ou seja, estruturas que estão solicitadas a cargas que produzem momento menor que o momento de fissuração M_r , a NBR 6118:2003 permite que a flecha diferida no tempo a_∞ seja estimada como sendo o produto da flecha inicial a_0 pelo coeficiente de fluência φ (ver expressão abaixo).

$$a_\infty = a_0 \times (1 + \varphi)$$

3.6.1.4. Modelo de SAMRA [1997]

A metodologia de cálculo apresentada a seguir, foi desenvolvida por SAMRA [1997]. Esse método consiste em um processo iterativo para determinação das tensões na armadura, da deformação específica do concreto e da curvatura. O cálculo das flechas é feito usando-se o processo numérico de NEWMARK [1943]. Neste método apresenta-se uma maneira de prever a deformação devido à retração, e considera-se uma situação antes da fluência e outra após a fluência, considerando-se assim a propriedade viscoelástica do concreto a qual é explicada pelo modelo da NBR 6118:2003 representado no item 2.3.2.1.

Para a aplicação do modelo, seguem-se os passos descritos a seguir.

- Antes da fluência:

Cálculo da armadura longitudinal tracionada:

$$\rho = \frac{A_s}{b \times d}$$

Onde:

A_s - área da seção transversal da armadura longitudinal (cm²);

b - largura da mesa (cm);

d - altura útil (cm).

Cálculo da relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto (n):

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

Cálculo do coeficiente k_i :

$$k_i = \sqrt{\left[(\rho + \rho')^2 \cdot n^2 + 2 \cdot \left(\rho + \rho' \frac{d'}{d} \right) \cdot n \right]} - (\rho + \rho') \cdot n$$

Sendo:

k_i - fator da altura do diagrama de compressão triangular inicial (antes da fluência);

ρ - taxa de armadura longitudinal tracionada;

ρ' - taxa de armadura longitudinal comprimida.

Cálculo da inércia da seção homogeneizada no estágio II ($I_{II,h}$):

$$I_{II,h} = \frac{1}{3} \cdot b \cdot (k_i \cdot d)^3 + n \cdot \rho \cdot b \cdot d \cdot (d - k_i \cdot d)^2 + n \cdot \rho' \cdot b \cdot d \cdot (k_i \cdot d - d')^2$$

Sendo:

b - largura da mesa (cm);

d - altura útil (cm);

k_i - fator da altura do diagrama de compressão triangular inicial (antes da fluência);

ρ - taxa de armadura longitudinal tracionada;

ρ' - taxa de armadura longitudinal comprimida;

n - relação entre os módulos de elasticidade;

$I_{II,h}$ - momento de inércia no estágio II da seção homogeneizada.

Cálculo da tensão inicial máxima de compressão e da tensão inicial de tração do aço:

$$f_{ci} = \frac{M \cdot k_i \cdot d}{I_{II,h}}$$

$$f_{si} = \frac{n \cdot M \cdot (d - k_i \cdot d)}{I_{II,h}}$$

Onde:

M – momento aplicado.

• Depois da fluência:

Cálculo do módulo de elasticidade do concreto (E_c) e tensão final de compressão máxima (f_{ct}):

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_c}$$

$$f_{ct} = 0,6 \cdot f_{ci}$$

Sendo:

f_{ci} - tensão inicial máxima de compressão

Cálculo da deformação específica total do concreto (ε_{ct}):

$$\varepsilon_{ct} = \frac{f_{ci}}{E_c} \cdot (1 - 0,8) \cdot \phi_t + \frac{f_{ct}}{E_c} \cdot (1 + 0,8 \cdot \phi_t)$$

Sendo:

ϕ_t - coeficiente de fluência

O valor do coeficiente de fluência foi calculado pela NBR 6118:2003.

Cálculo dos coeficientes β_1 , β_2 e k_t :

$$\beta_1 = 2 \cdot E_s \cdot \frac{\varepsilon_{ct}}{f_{ct}} \cdot (\rho + \rho')$$

$$\beta_2 = 2 \cdot E_s \cdot \frac{\varepsilon_{ct}}{f_{ct}} \cdot \left(\rho + \rho' \cdot \frac{d'}{d} \right)$$

$$k_t = \frac{-\beta_1 + \sqrt{\beta_1^2 + 4 \cdot \beta_2}}{2}$$

Cálculo da tensão final de tração da armadura positiva (f_{st}):

$$f_{st} = E_s \cdot \varepsilon_{ct} \cdot \left(\frac{d - k_t \cdot d}{k_t \cdot d} \right)$$

Determinação do momento de cálculo (M_c):

$$M_c = A_s' \cdot f_{st}' \cdot (d - d') + \frac{f_{ct}}{2} \cdot b \cdot k_t \cdot d \cdot \left(d - \frac{k_t \cdot d}{3} \right)$$

Sendo:

A_s' - área da seção transversal da armadura comprimida;

f_{st}' - tensão final na armadura comprimida;

d' - distância do centro de gravidade da armadura comprimida à fibra mais comprimida de concreto;

f_{ct} - tensão final máxima de compressão;

k_t - fator da altura do diagrama de compressão triangular inicial (depois da fluência).

A iteração continua até que o valor do momento calculado seja igual ao momento aplicado. Assim:

$$f_{ct} = (f_{ct})_1 \cdot \frac{M}{M_c}$$

Havendo convergência, e com as características da seção geométrica calcula-se a inércia média de Branson (I_m):

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_{\max}} \right)^3 \cdot I_{I,h} + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{\max}} \right)^3 \right] \cdot I_{II,h}$$

O valor da flecha imediata (Δ_i) pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\Delta_i = \frac{K \cdot M \cdot L^2}{E_c \cdot I_m}$$

Analogamente, pode-se calcular a deformação devido à fluência (Δ_{cr}):

$$\begin{aligned} \Delta_{cr} &= \frac{K \cdot M \cdot L^2}{E_c \cdot I_m} \\ \text{como: } \frac{M}{E_c \cdot I} &= \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d} = \varphi_{cr} \\ \text{tem-se: } \varphi_{cr} &= \frac{\varepsilon_{ct}}{k_t \cdot d} \\ \therefore \Delta_{cr} &= \varphi_{cr} \cdot K \cdot L^2 \end{aligned}$$

Sendo:

K - constante de cálculo calculada através de:

$$K = \frac{E_c \cdot I_m \cdot \Delta_i}{M \cdot L^2}$$

M - Momento aplicado;

L - Vão da peça;

E_c - Módulo de elasticidade longitudinal do concreto;

Δ_i - Deformação inicial;

Δ_{cr} - Deformação devido à fluência;

φ_{cr} - Raio de curvatura devido à fluência.

Como a flecha inicial é conhecida em todas as lajes, podemos determinar o valor de K e calcular a deformação por fluência, enquanto que a deformação por retração (Δ_{sh}) pode ser obtida por:

$$\Delta_{sh} = K_{sh} \cdot \varphi_{sh} \cdot L^2$$
$$\text{onde: } \varphi_{sh} = \frac{A_{sh} \cdot \varepsilon_{sh}}{h}$$

Onde:

φ_{sh} - raio de curvatura devido a retração, sendo:

K_{sh} - 0,5 para vigas em balanço; 0,125 para vigas simplesmente apoiadas; 0,086 para vigas contínuas com apenas um apoio central e 0,063 para vigas contínuas com dois ou mais apoios centrais;

A_{sh} - valor baseado na curvatura de retração da tabela de BRANSON [1963] para protótipos com duas vigotas este valor é de 0,104 e para os protótipos com três vigotas é 0,15;

ε_{sh} - deformação devido à retração para condições padrões definido como $400 \cdot 10^{-6}$ mm/mm.

MATERIAIS, MODELOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

4

Capítulo

A importância da descrição dos materiais, modelos e equipamentos está na possibilidade de transmitir a experiência adquirida neste trabalho a outros pesquisadores e permitir que os resultados obtidos possam ser empregados para calibração de fórmulas, programas, processos de cálculo ou aplicados nas situações corretas considerando-se as variáveis envolvidas. Nos itens seguintes estão apresentados e descritos os métodos utilizados para escolha dos materiais, modelos e equipamentos.

4.1. Considerações Iniciais

Para executar e atingir os objetivos da pesquisa foram necessários alguns estudos preliminares, além da definição e construção de instalações necessárias para realização dos ensaios, tais como:

Estudo dos materiais constituintes do concreto a fim de obter um traço que fornecesse a resistência adequada e também definir as características dos mesmos para que possam ser empregados e os resultados obtidos sejam referidos corretamente aos materiais que compõem o concreto;

Definição dos modelos que possibilitassem boa correlação entre leituras de fluência e medições das deformações das armaduras positiva e negativa da treliça;

Desenvolvimento do projeto de uma instalação (câmara climatizada) para fazer com que alguns modelos experimentais estejam submetidos a condições ambientais constantes.

Empregar, sempre que possível, materiais usuais encontrados na região para que o ensaio reproduza na medida do possível as condições usuais da prática da construção.

Nesse sentido foram feitos estudos de dosagem, caracterização dos materiais, definição dos modelos (vão, condição de apoio, quantidade e comprimento dos protótipos, seção transversal incluindo armadura longitudinal e localização dos sensores de deformação de armadura). Também, foi construída uma câmara climatizada com controle eletrônico de temperatura e umidade relativa do ar, onde se localizam as lajes com nervuras pré-moldadas ensaiadas e analisadas à fluência. A seguir são detalhados todos os equipamentos utilizados nesta etapa da pesquisa. O processo de concretagem (formas e moldagem) e instrumentação da armadura estão apresentados no item 5.2.1. e 5.2.2.

4.2. Ensaio de Dosagem

O estudo de dosagem foi iniciado com ensaios de caracterização dos materiais constituintes do concreto, para o conhecimento das propriedades físicas dos materiais utilizados na elaboração do concreto utilizado nos protótipos.

4.2.1. Caracterização dos Materiais

Neste item serão apresentados os critérios de escolha dos materiais para dosagem, assim como a caracterização destes materiais. Escolheu-se neste caso usar a areia e pedra que tem fornecimento regular na cidade de São Carlos e que são usadas neste sistema construtivo nesta região do Estado.

4.2.1.1. Agregados

Dos agregados comprados de um fornecedor da própria cidade, retiraram-se amostras de acordo com a NBR7211:1983 para realização dos ensaios de granulometria (NBR7217:2003), massa unitária (NBR7251:1982) e massa específica real (NBR9937 e NBR9776), cujos resultados apresentam-se nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3.

Tabela 4.1. Dados do ensaio de granulometria para a areia e a brita (NBR 7217:2003)

Agregado Miúdo - Classificação: Areia Média				
Peneira (mm)	Massa / Pen.(Kg)	% Retida / Pen.	Massa Acum. (Kg)	% Retida Acum.
6,35	0,0055	0,5	0,0055	0,5
4,76	0,0040	0,4	0,0095	0,9
2,38	0,0235	2,3	0,0330	3,2
1,19	0,2210	22,3	0,2540	25,5
0,59	0,2950	29,7	0,5490	55,2
0,297	0,3315	33,4	0,8805	88,6
0,149	0,0845	8,5	0,9650	97,1
Residual	0,0275	2,8	0,9925	99,9
Agregado Graúdo - Classificação: Brita Intermediária entre 0 e 1				
Pen. (mm)	Massa / Pen. (Kg)	% Retida / Pen.	Massa Acum. (Kg)	% Retida Acum.
12,7	0,480	9,6	0,480	9,6
9,52	1,360	27,3	1,840	36,9
6,35	1,470	29,5	3,310	66,4
4,76	0,900	18,0	4,210	84,4
2,38	0,710	14,2	4,920	98,6
Residual	0,065	1,30	4,985	99,9

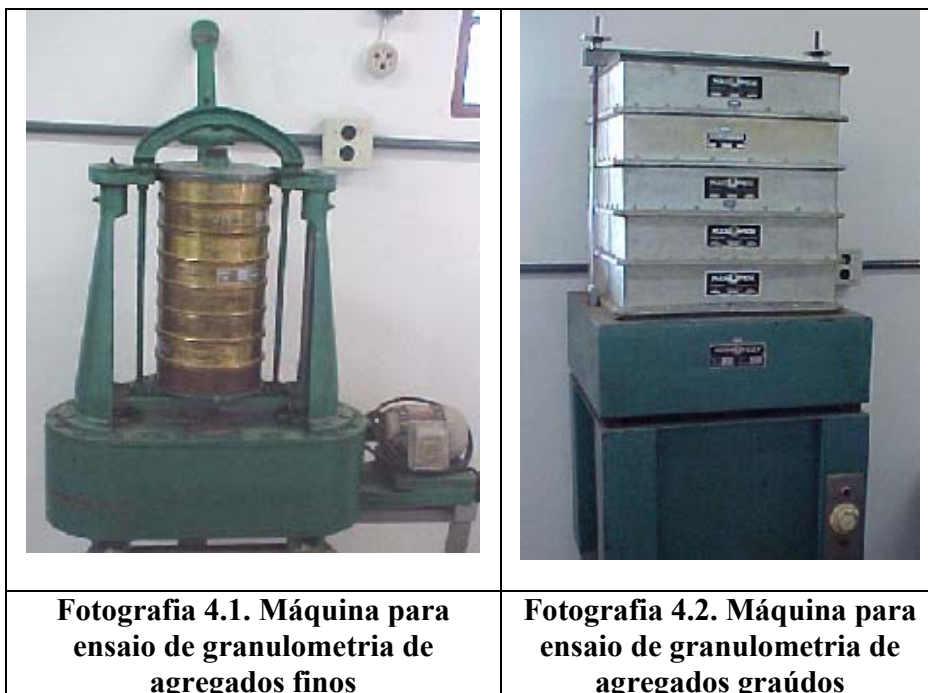
Tabela 4.2. Massa específica unitária dos agregados (NBR7251)

Material	γ (g/cm³)
Areia	1,462
Brita	1,408

Tabela 4.3. Massa específica real dos agregados (NBR 9776 e NBR 9937)

Material	γ (g/m³)
Areia	2,538
Brita	2,873

Os equipamentos utilizados para determinação da composição granulométrica dos agregados estão representados pelas Fotografias 4.1 e 4.2



4.2.1.2. Água

Para água de amassamento foi utilizada a do abastecimento público da cidade de São Carlos.

4.2.1.3. Cimento

Utilizou-se o cimento CP II-Z-32 Itaú (Cimento Portland composto) apresentando massa específica 3100kg/m^3 , conforme informação do fabricante para execução tanto das bases da treliça quanto da capa de concreto das lajes pré-moldadas.

4.2.2. Dosagem

Inicialmente partiu-se do traço em massa executado por ROGGE [2001] (1:2,35:3,3; $a/c=0,52$). Entretanto, após várias análises chegou-se à conclusão que deveria ser utilizado outra dosagem. Isso ocorreu em função de ter sido definido que, tanto as bases das treliças como a capa de concreto das lajes seriam moldadas com o mesmo traço, a fim de diminuir o número de variáveis e da impossibilidade de se colar os extensômetros nas treliças. Além disso, como as bases das treliças apresentam seção transversal muito pequena (3x12 cm),

dificultando vibração, haveria necessidade de um concreto mais fluido e com menor porcentagem de agregado graúdo.

Portanto, para definir qual o traço a ser usado para a confecção dos protótipos, utilizou-se de um programa em planilha do Microsoft Excel fornecida pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), cuja tela de entrada de dados e resultados são mostrados na Figura 4.1.

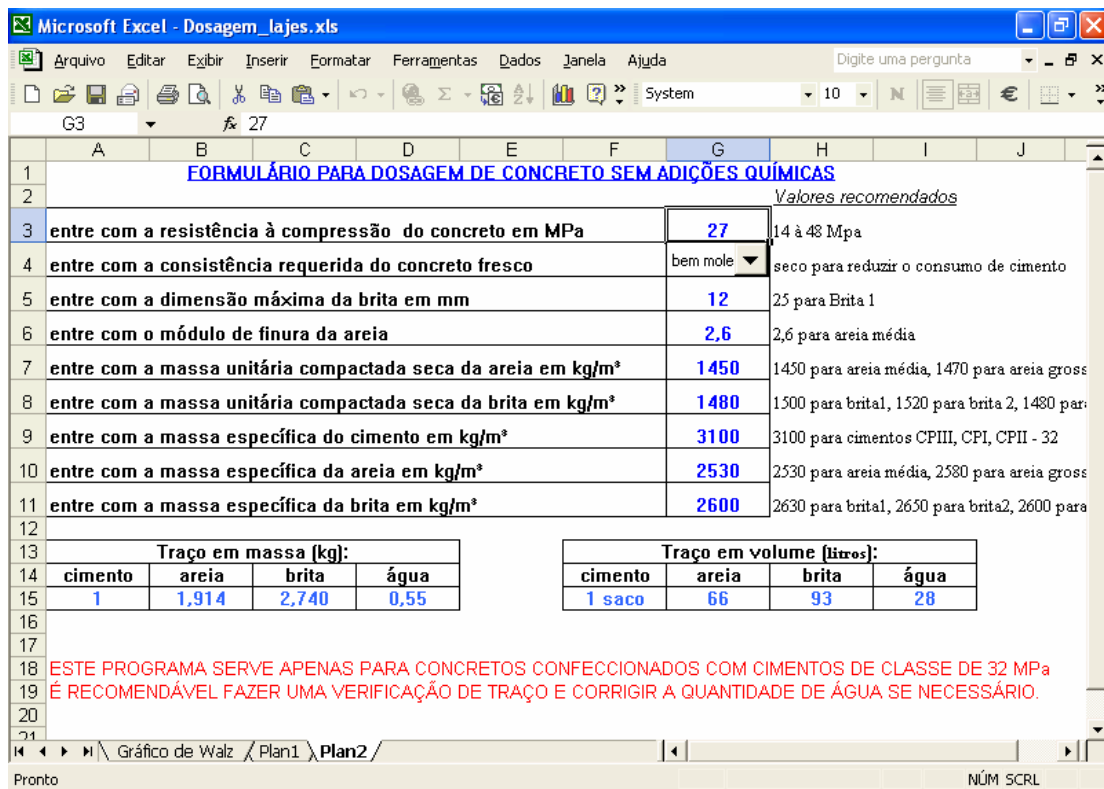


Figura 4.1. Tela do programa em planilha de Excel fornecida pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland)

O método do programa baseia-se na correlação linear que existe entre a proporção agregado/cimento e o fator água cimento, usando determinados agregados graúdo e miúdo para concretos frescos com a mesma trabalhabilidade, isto é, com a mesma mobilidade da massa e a mesma coesão dos elementos componentes, conforme PETRUCCI [1973].

Os dados de entrada foram: massa específica e dimensões máximas da brita e areia, a consistência desejada para o concreto (mole, seco ou bem mole) e a resistência à compressão mínima do concreto (f_c). Assim, definiram-se três traços básicos a serem ensaiados quanto ao abatimento (slump) (ver Tabela 4.4).

Tabela 4.4. Traços básicos obtidos da planilha de cálculo da ABCP

CP	Traço (c:a:p)	a/c	f_{ck} (Mpa)	Abatimento (mm)
1	1:2,02:2,81	0,586	20,60	6,2
2			22,21	
3	1:1,91:2,74	0,560	24,14	13,9
4			25,42	
5	1:1,80:2,15	0,580	28,07	20,07
6			25,96	

Para poder concretar tanto as sapatas das treliças quanto a capa das lajes com o mesmo concreto, optou-se pelo uso do segundo traço (1:1,91:2,74 a/c:0,56), pois esta proporção entre os materiais gerou um concreto de trabalhabilidade tal que atendeu as exigências requeridas tanto no que se refere a aplicação quanto ao tipo adensamento adotado (por imersão com vibrador de mangote). Além disso, este traço por ter fator água cimento menor, proporciona ao concreto endurecido maior rigidez e menor retração.

Teve-se o cuidado de dois dias antes da concretagem promover a secagem da areia através de seu espalhamento e revolvimento até que a quantidade de água nela contida fosse desprezível.

Também foi obtido o consumo de cimento através da expressão:

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\gamma_C} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + \frac{A}{C}}$$

Chegou-se então a um valor de 386 kgf de cimento por m^3 de concreto. Pela geometria do protótipo o volume de concreto foi estimado em cerca de $0,445 m^3$ e sendo assim o total, em peso, de cada material a ser empregado é apresentado na tabela 4.5.

Tabela 4.5. Consumo total de cada material em peso

Material	Peso (kgf)	Relação ao cimento
Cimento	171,77	1
Areia	328,08	1,91
Brita 0	470,65	2,74
Água	96,19	0,56

Definido o traço utilizado para a confecção dos protótipos, moldaram-se, para cada laje concretada, corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 10x20 cm para a realização de ensaios de compressão e tração. Estes ensaios foram realizados no Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica – LIEC no Departamento de Química/UFSCar (ver Fotografias 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6).

Na tabela 4.6. estão as datas de concretagem tanto das sapatas dos trilhos quanto da capa de concreto.

Tabela 4.6. Data de concretagem das sapatas e capa de concreto

Utilização	Data de concretagem
2 sapatas da laje J / 4 sapatas das lajes L e M	08/07/04
1 sapata da laje K / 4 sapatas das lajes I e P	14/07/04
4 sapatas das lajes N e O	19/07/04
1 sapata da laje K	22/07/04
Capa - Lajes J, L e M	22/07/04
Capa - Laje I e P	28/07/04
Capa - Laje K, N e O	02/08/04

Dos resultados obtidos dos ensaios de ruptura, tanto a tração quanto à compressão, foram eliminados os valores mais discrepantes, adotando-se assim para a resistência dos protótipos os valores médios descritos na tabela 4.7.

	
<p>Fotografia 4.3. Corpos de prova após moldagem</p>	<p>Fotografia 4.4. Capeamento do corpo de prova</p>
	
<p>Fotografia 4.5. Suporte metálico para ruptura de corpo de prova por compressão diametral</p>	<p>Fotografia 4.6. Corpos de prova rompidos a tração (esquerda) e compressão (direita)</p>

Tabela 4.7. Resistência dos corpos de prova para cada concretagem realizada

Resistência aos 28 Dias dos CP(s) - MPa		
Utilização	f_c (28 dias)	f_t (28 dias)
Sapata (2 Isostáticas E 1 Hiperestática)	31,77	-
Sapata (2 Isostáticas E 1 Hiperestática)	32,67	3,65
Sapata (2 Hiperestáticas)	26,27	-
Capa - Laje L	34,90	-
Capa - Laje J	33,81	3,14
Capa - Laje M	31,04	3,88
Capa - Laje I	34,13	-
Capa - Laje P	32,72	-
Capa - Laje K	28,77	3,06
Capa - Laje O	24,44	3,40
Capa - Laje N	23,90	-

4.3. Definição dos modelos

A definição dos modelos depende do espaço físico do laboratório de estruturas, pois o espaço limita a quantidade de protótipos ensaiados, assim como o vão, comprimento, condição de apoio e largura da seção transversal. O espaço disponível no laboratório é bastante limitado por ser compartilhado com outra pesquisa sobre retração de blocos estruturais e por já existirem protótipos com três vigotas (nomeados de A, B, C e D) de ROGGE [2001]. Assim, para o posicionamento das lajes foi levada em consideração a facilidade do acompanhamento das deformações e de circulação de pessoas e equipamentos. Além disso, foi necessário executar uma quantidade de protótipos correspondentes dentro e fora da câmara que possibilitasse uma boa análise dos resultados.

Seguindo as limitações, foi estabelecida que seriam executadas oito novas laje, cujas características estão representadas na tabela 4.8. A disposição desses protótipos está mostrada na Figura 4.2. Lembrando que a nomenclatura das novas lajes deu continuidade a já iniciada nos protótipos executados durante a pesquisa anterior. As novas lajes foram nomeadas como: lajes I, J, K, L, M, N, O e P.

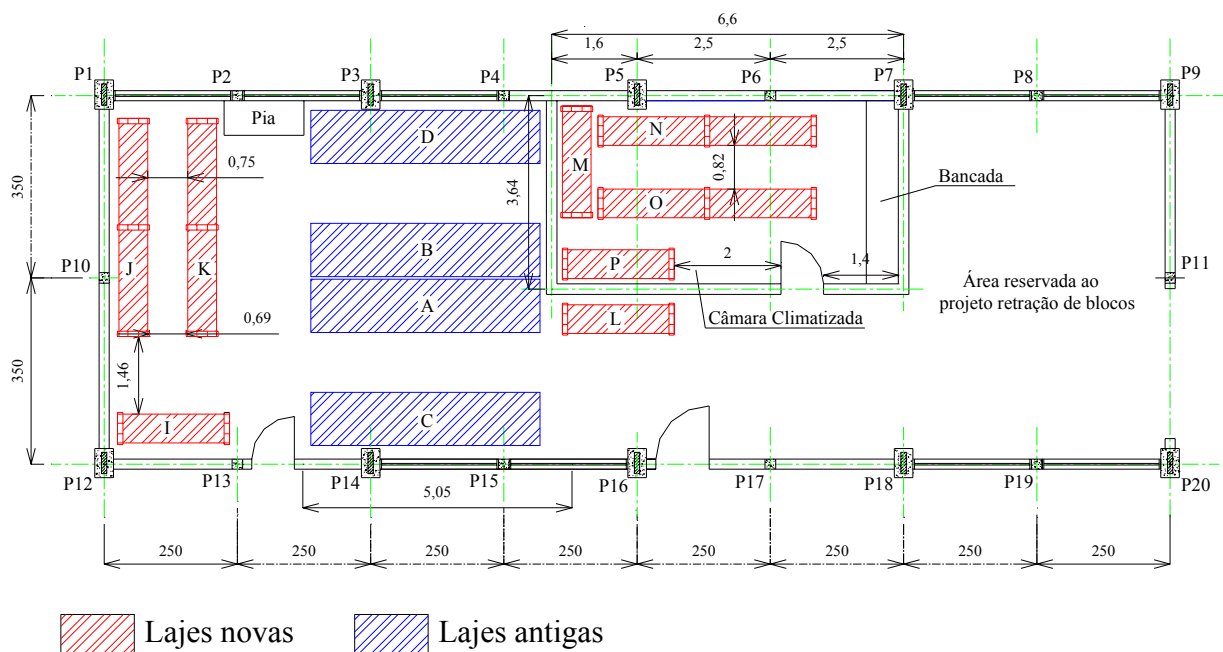


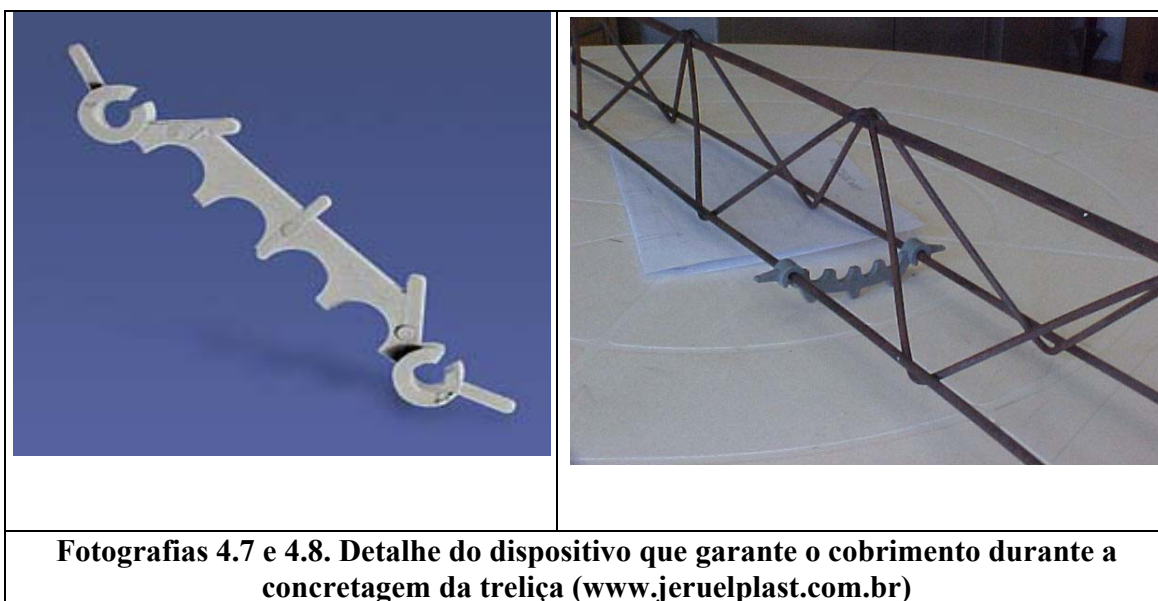
Figura 4.2. Disposição dos novos protótipos no laboratório de estruturas

Tabela 4.8. Definição do vão, condição de apoio, quantidade e comprimento dos protótipos

Localização	Quantidade	Condição de apoio	Quantidade	Vão (m)	Comprimento (m)
Dentro da Câmara Climatizada	4	Simplesmente apoiada	2	2	2
		Biapoiada	2		4
Fora da Câmara Climatizada	4	Simplesmente apoiada	2	2	2
		Biapoiada	2		4

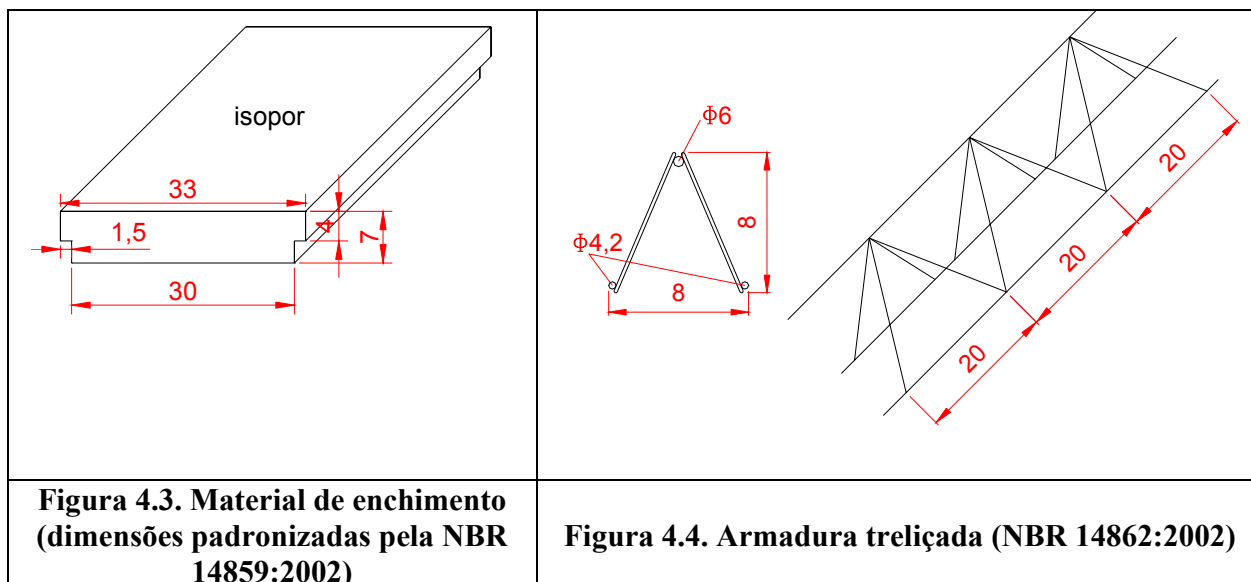
Inicialmente, foi definida a quantidade de nervuras e o material de enchimento a serem utilizados. Para garantir uma maior estabilidade lateral, os protótipos novos foram projetados com duas nervuras longitudinais. O material de enchimento escolhido foi poliestireno expandido (EPS), devido à facilidade de utilização e maior padronização quanto às dimensões.

Em seguida, foi determinado o cobrimento mínimo para lajes pré-moldadas. De acordo com a nova NBR6118:2003, o cobrimento para uma laje pré-moldada localizada em um ambiente urbano classe de agressividade II (agressividade moderada com pequeno risco de deterioração da estrutura) é de 20 mm, valor que deixa praticamente todas as vigotas pré-moldadas existentes no mercado fora das especificações da norma. Entretanto, considerando uma tolerância de execução (Δ_c) de 5 mm, pois se trata de um elemento pré-moldado com rígidos limites de tolerância da variabilidade das medidas durante a execução, pode-se utilizar cobrimento de 15 mm. A adequação obriga os fabricantes de vigotas a adaptarem seu produto. Essa adaptação não é fácil, pois envolve mudanças nas características geométricas das peças já que a nova norma exige um cobrimento de 2,0 cm, valor difícil de ser alcançado em uma peça de 3,0 cm de espessura, onde está embutida a armadura (como é o caso das vigotas pré-moldadas). Atualmente existem dispositivos utilizados para garantir a espessura correta do cobrimento em vigotas treliçadas, no caso do controle mais rigoroso no processo de produção. Este dispositivo foi utilizado nos protótipos executados e pode ser observado nas Fotografias 4.7 e 4.8.



A escolha da armadura treliçada foi feita em conformidade com a NBR 14862:2002, como pode ser visto na Figura 4.4.

Foram estabelecidas as dimensões do material de enchimento, como pode ser visto na Figura 4.3 de acordo com a NBR14859:2002 (item 4.3.4.1).



Uma vez escolhidos as variáveis anteriores e definida a seção transversal, conforme Figura 4.5, é necessário verificar a armadura longitudinal.

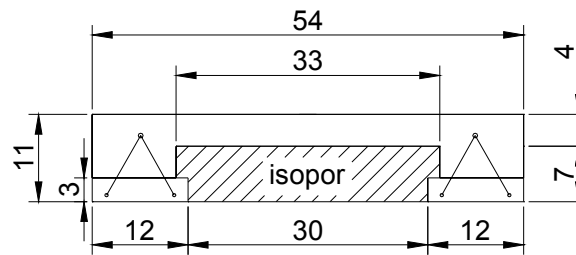


Figura 4.5. Seção transversal para verificação da armadura

4.4. Cálculo da Armadura Longitudinal

A finalidade desta pesquisa é produzir resultados que ajudem os projetistas a avaliar com maior segurança as deformações de lajes com vigotas pré-moldadas ao longo do tempo. Para tanto os protótipos devem simular uma laje de uma residência convencional. A condição determinante para o dimensionamento da armadura longitudinal neste tipo de sistema estrutural, na maioria das vezes é o estado de deformação excessiva, como observado em MESQUITA [1999], sendo que na maioria dos casos é necessário adotar uma área de aço superior àquela obtida por meio do cálculo no estado limite último. Ainda assim resolveu-se considerar apenas a armadura necessária para resistir ao estado limite último considerando o carregamento usual de prédios residenciais. Assim, além de resistir ao peso próprio, a nervura deve resistir a uma sobrecarga permanente e a ação de uma carga accidental como pode ser visto abaixo.

Dados:

Área de concreto sem a base da treliça: $0,0298 \text{ m}^2$;

Peso do trilho: $0,00735 \text{ kN/m}$ (dado retirado do catálogo da Gerdau);

Material de enchimento: EPS.

Carregamento:

- Peso da treliça + base de concreto (Figura 4.6): $0,00735 + 0,12 \text{ m} \cdot 0,03 \text{ m} \cdot 25 = 0,097 \text{ kN/m}$;

- Peso do concreto: $0,0298/2 \text{ m}^2 \cdot 25 = 0,373 \text{ kN/m}$;
- Peso próprio (g_1): $0,373 + 0,097 = 0,47 \text{ kN/m}$;
- Sobrecarga permanente (g_2): $0,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,27 \text{ m} = 0,135 \text{ kN/m}$;
- Carga acidental (q): $1,5 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,27 \text{ m} = 0,405 \text{ kN/m}$ / nervura;
- Total: $g_1 + g_2 + q = 1,01 \text{ kN/m}$ por nervura.

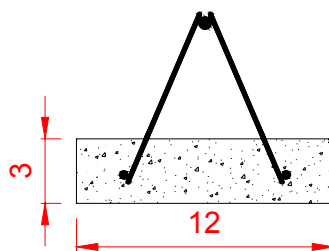


Figura 4.6. Seção transversal da laje treliçada

O momento atuante na laje, tanto para viga isostática quanto hiperestática (considerando o cálculo linear e a geometria escolhida), é o mesmo, pois os momentos máximos possuem mesmo valor em módulo. Entretanto, as regiões tracionadas são opostas (momento positivo traciona a região inferior e o momento negativo traciona a região superior), conseqüentemente há necessidade de dimensionar a armadura para cada caso:

$$M = \frac{p \cdot l^2}{8} = \frac{1,01 \cdot 2^2}{8} = 0,505 \text{ kN/m}$$

O procedimento de cálculo utilizado neste caso é o do estado limite último usando a nomenclatura de CARVALHO e FIGUEIREDO [2004] reproduzido em Anexo D.

Momento positivo

Para o cálculo do máximo momento fletor positivo resistente na seção considera-se a área da seção acima da linha neutra, como indicado na Figura 4.7.

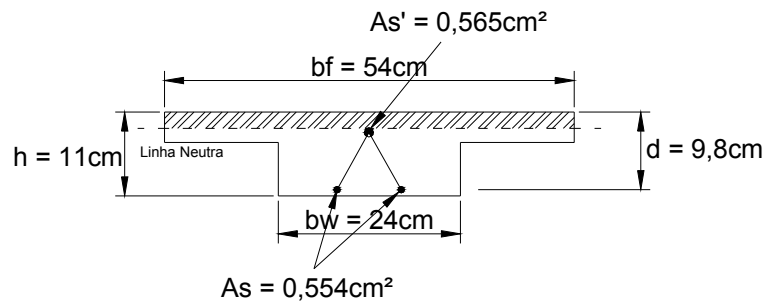


Figura 4.7. Seção transversal para cálculo do momento fletor positivo (seção de cálculo)

$$KMD = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot f_{ck}} = \frac{1,4 \cdot 0,505}{0,27 \cdot 0,098^2 \cdot 20000/1,4} = 0,019$$

Da tabela do Anexo D:

$$KMD = 0,019 \rightarrow KX = 0,0298 \rightarrow KZ = 0,9881$$

$$x = KX \cdot d = 0,0298 \cdot 9,8 = 0,29 \text{ cm}$$

$x > h_f$ \therefore a seção pode ser considerada retangular e a linha neutra passa na mesa.

$$A_{s+} = \frac{1,4 \cdot M}{KZ \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{1,4 \cdot 0,505}{0,9881 \cdot 0,095 \cdot \frac{60}{1,15}} = 0,14 \text{ cm}^2 / \text{nervura}$$

Sendo:

M_d - Momento de cálculo (kN.m);

b_w - largura da seção (m);

d - altura útil (m);

A_s - área da seção transversal da armadura (cm²);

f_{cd} - valor de calculo da resistência do concreto (MPa);

KZ - valor adimensional utilizado para cálculo de armadura longitudinal de seções retangulares;

f_s - valor de cálculo da resistência do aço (MPa).

Momento negativo

Para o cálculo do máximo momento fletor negativo resistente na seção considere-se a área da seção abaixo da linha neutra, como indicado na Figura 4.8.

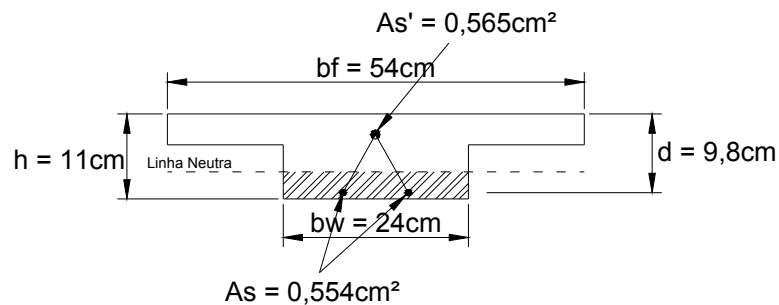


Figura 4.8. Seção transversal para cálculo do momento fletor negativo (seção de cálculo)

$$KMD = \frac{M_d}{b \cdot d^2 \cdot f_{ck}} = \frac{1,4 \cdot 0,505}{0,12 \cdot 0,098^2 \cdot 20000/1,4} = 0,0429$$

Da tabela do Anexo D:

$$KMD = 0,0429 \rightarrow KX = 0,0603 \rightarrow KZ = 0,9759$$

$$x = KX \cdot d = 0,0603 \cdot 9,8 = 0,59 \text{ cm}$$

$x > h - h_f \therefore$ a seção pode ser considerada retangular

$$A_{s-} = \frac{1,4 \cdot M}{KZ \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{1,4 \cdot 0,505}{0,9759 \cdot 0,098 \cdot \frac{60}{1,15}} = 0,142 \text{ cm}^2 / \text{nervura}$$

Como a armadura existente na parte inferior e superior da treliça é $0,278 \text{ cm}^2$ e $0,283 \text{ cm}^2$, respectivamente, e a armadura calculada é $0,140 \text{ cm}^2$ e $0,142 \text{ cm}^2$, está garantido que as lajes estão de acordo com a segurança quanto ao estado limite de ruptura. A configuração final da laje fica representada como na Figura 4.9.

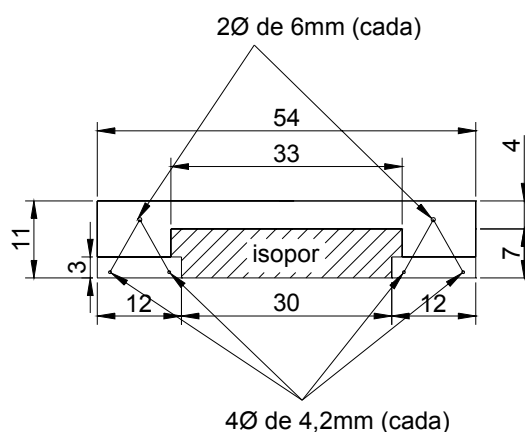


Figura 4.9. Configuração final da seção transversal

4.5. Câmara Climatizada

Para se reduzir a quantidade de variáveis previu-se a construção de uma câmara climatizada (ver Figura 4.10) de tal forma que os protótipos colocados dentro deste ambiente estivessem submetidos a um clima controlado (temperatura e umidade constantes).

A câmara climatizada construída nesta pesquisa foi baseada no projeto de uma câmara similar à Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) de acordo com TAKEUTI [2003], mas com dimensões menores que a necessária para a construção dos diversos protótipos.

Depois de se consultar diversos especialistas e empresas da área, engenheiros e professores envolvidos na construção da unidade da EESC-USP, optou-se por contratar a mesma empresa LEOC que fez a automação da unidade da EESC.

Outra diferença em relação à unidade da EESC é que se resolveu fazer um isolamento térmico, usando-se o revestimento das paredes de blocos com placas de EPS,

papel alumínio e plástico para evitar também a saída ou entrada de vapor de água (ver Fotografias 4.9a e 4.9b).

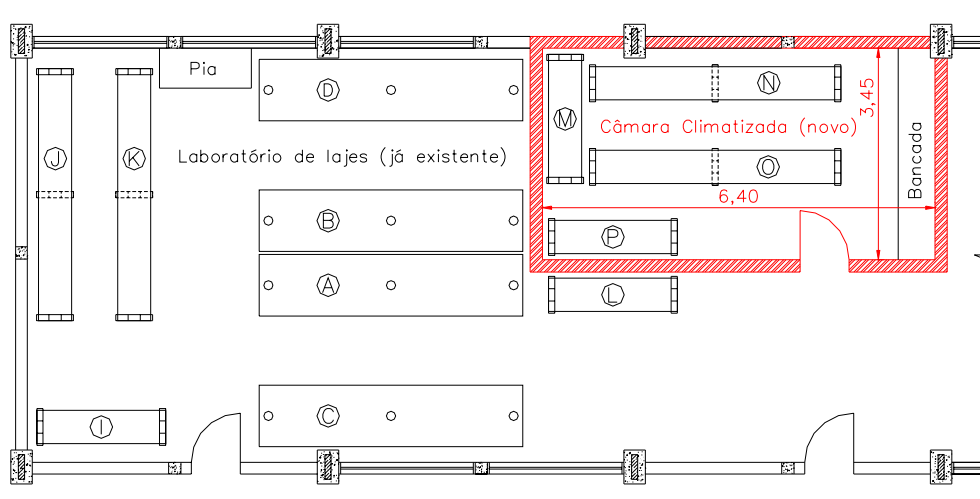
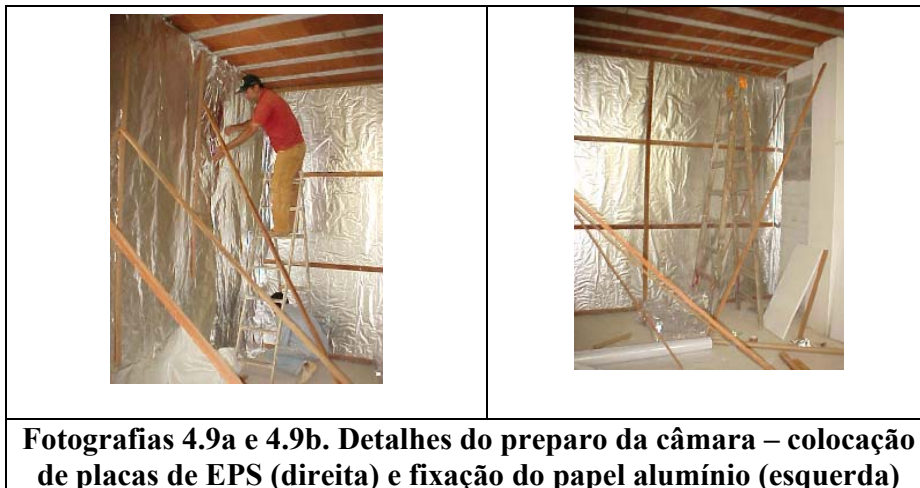


Figura 4.10. Câmara climatizada (hachurada) de dimensões 6,40x3,45m construída no Laboratório de Sistemas Estruturais do DECiv – UFSCar



Fotografias 4.9a e 4.9b. Detalhes do preparo da câmara – colocação de placas de EPS (direita) e fixação do papel alumínio (esquerda)

Tais medidas além de economia no consumo de energia permitiu a colocação de equipamentos de menor potência. Foram utilizados dois aparelhos de ar condicionado, um umidificador e um desumidificador além de quatro células sensoras de temperatura e umidade e um painel controlador (ver Fotografias 4.10, 4.11 e 4.12).

O ambiente dentro da câmara tem temperatura imposta igual a 23^o C com tolerância de 2^oC e a umidade relativa igual a 50% com tolerância de 5%. Durante cerca de um mês a câmara foi testada e apresentou uma performance adequada com os valores tanto de temperatura e umidade se mantendo dentro os valores desejados.

		
<p>Fotografia 4.10. Painel de controle da câmara e porta com isolamento de temperatura e de umidade</p>	<p>Fotografia 4.11. Umidificador e aparelhos de ar condicionado fixados na alvenaria</p>	<p>Fotografia 4.12. Desumidificador – para remoção do excesso de umidade ambiente</p>

Nas Fotografias 4.13 e 4.14 mostra-se o interior da câmara e dois protótipos executados.

	
<p>Fotografia 4.13. Protótipo no interior da câmara climatizada</p>	<p>Fotografia 4.14. Protótipo no interior da câmara climatizada</p>

Finalmente na Fotografia 4.15 mostra-se, no fundo, a parte externa da câmara e, em primeiro plano, os protótipos originais estudados por ROGGE [2001], como pode ser visto na Fotografia 4.15 a seguir.



Fotografia 4.15. Vista externa da câmara climatizada (primeiro plano) – protótipos antigos (segundo plano)

Tem-se como objetivo a utilização desta câmara, no futuro, para a realização de ensaios de fluência de corpos-de-prova de concreto e pequenas paredes.

4.6. Equipamentos de Ensaio

Em ROGGE [2001] e ROGGE [2002] foram usados apenas dois tipos de equipamentos para acompanhamento das flechas dos protótipos, sendo o primeiro um nível de precisão topográfico da marca CARL-ZEISS e modelo NI-007 (precisão 0,1 cm) juntamente com réguas metálicas modelo SWORDFISN BRAND (precisão 0,1 cm), o segundo, defletômetro (relógio comparador) de marca DIGIMESS (precisão 0,01 cm), conforme Fotografias 4.16 e 4.17.



Fotografia 4.16. Nível de precisão topográfico com tripé de sustentação



Fotografia 4.17. Defletômetro e régua metálica graduada

Com estes equipamentos, foi adotado para o acompanhamento das flechas dos protótipos antigos o uso apenas do nível topográfico, para manter a mesma metodologia adotada anteriormente pela bolsista. E para os novos protótipos, além do nível topográfico, utilizaram-se relógios comparadores para acompanhamento das flechas.

Nesta pesquisa, além do uso destes equipamentos, utilizaram-se extensômetros elétricos de resistência, modelo KFG-S-121-C1-11 da marca KYOWA fixos à armadura por meio de cola (vide Fotografia 4.18. e 4.19). Por estarem colados, esses se deformam de mesmo valor quando a estrutura está submetida a carregamento. Tal deformação é enviada por meio de cabos com quatro vias do modelo AFD 4x22 com malha, ligados a um aquisitor de dados capaz de interpretar as informações e analisar, por meio de um software de aquisição de sinais denominado AqDados 7.02 e um software de análise de sinais denominado AqDAnalysis 7 (vide Fotografias 4.20 e 4.21), respectivamente.



Fotografia 4.18. Fixação dos extensômetros elétricos



Fotografia 4.19. Isolamento dos extensômetros



Fotografia 4.20. Sistema de aquisição de dados, cabos e multímetro



Fotografia 4.21. Computador ligado ao sistema de aquisição de dados

Também foram acoplados ao aquisitor de dados, transdutores à base de extensômetros elétricos de resistência, modelo IM-T-137i da marca KYOWA (precisão 0,1cm) para medição e aferição das medidas das flechas dos novos protótipos (vide Fotografia 4.22.).



Fotografia 4.22. Transdutor elétrico

A finalidade principal deste trabalho é avaliar a deformação ao longo do tempo das lajes com nervuras pré-moldadas tipo treliça. Para este fim, foram ensaiados dois tipos de protótipos: os simplesmente apoiados executados por ROGGE [2001] e ROGGE [2002] com seção transversal de três nervuras (chamados A, B, C e D) e os novos protótipos com seção transversal de duas nervuras projetados e executados neste trabalho e chamados I, J, K, L, M, N, O e P com um e dois vãos.

Neste item será apresentado o procedimento dos ensaios, assim como os resultados obtidos, tanto para os oito novos protótipos quanto para as lajes de ROGGE [2001] e ROGGE [2002].

5.1. Continuação dos Ensaios Realizados

São apresentados os resultados de deformação ao longo do tempo no item 5.5. relativos a quatro lajes isostáticas com *três nervuras* cujas características geométricas da nervura central da seção transversal estão apresentadas na tabela 5.1 e na Figura 5.1.

Tabela 5.1. Características geométricas da nervura central da seção transversal das lajes A, B, C e D com três nervuras

Lajes	A, B, C e D
Largura (cm)	43,50
Altura Total (cm)	11,00
Altura Útil (cm)	8,50
Comprimento (m)	4,00
Área de Aço (cm ²)	1,04
Área de Concreto (cm ²)	267,50
Posição cg em relação a face superior (cm)	3,74
Inércia da Seção de Concreto (cm ⁴)	3163

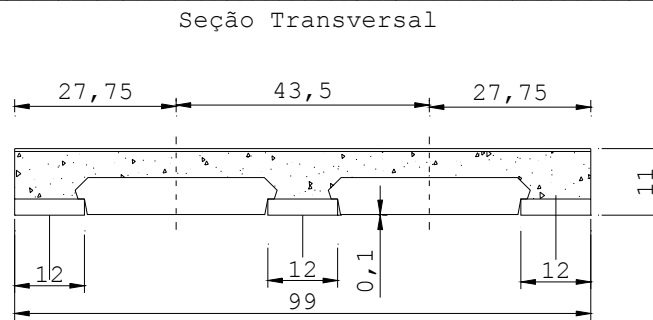


Figura 5.1. Seção transversal das lajes A, B, C e D

Como foi mostrado no item 4.6., a medição das flechas destas lajes foi feita com o uso do nível de precisão, porém teve-se o cuidado, nesta nova etapa, de se fixar as régua de leitura em peças metálicas para diminuir o erro e agilizar o processo.

Outra providência tomada foi a de colocar cortinas em todas as janelas do laboratório de tal maneira que não se tivesse raios solares incidindo nas mesmas.

5.2. Descrição dos Novos Protótipos (duas nervuras)

Neste item estão descritos os procedimentos de moldagem, instrumentação e ensaios dos novos protótipos com *duas nervuras*.

5.2.1. Formas e Concretagem dos Protótipos

O sistema de fôrmas foi projetado para garantir estanqueidade de modo a impedir a saída da nata de concreto fresco no lançamento e garantir a estabilidade suficiente para que a execução dos protótipos pudesse ser realizada com segurança. Foi utilizada fôrma de madeira para moldagem das lajes (ver Figura 5.2).

Como apoio das lajes, foram projetadas paredes de tijolo comum e juntas de argamassa. Sobre as paredes foram chumbadas barras metálicas de modo a permitir giro livre das seções sobre os apoios, como pode ser visto na Fotografia 5.1.

Para o protótipo definido como laje K foi colocado no apoio central um anel dinamométrico para acompanhamento da reação, assim como realizado na segunda etapa da pesquisa elaborada por ROGGE [2001] e ROGGE [2002] (ver Fotografia 5.2).

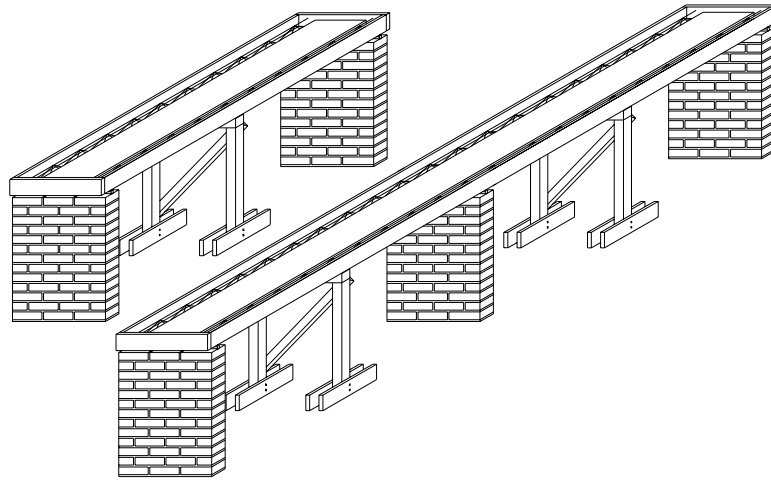


Figura 5.2. Esquema do sistema de formas e escoramento dos protótipos

O escoramento foi projetado em madeira, sendo um cavalete para cada vão servindo como apoio das treliças e fechamento lateral para conter o concreto da capa (ver Figura 5.2).

<p>Fotografia 5.1. Apoios das lajes</p>	<p>Fotografia 5.2. Dinamômetro fixado na alvenaria central da laje K – leitura da reação de apoio</p>

Para poder usar os extensômetros elétricos foi necessário fabricar as sapatas dos protótipos no próprio laboratório (nas vezes anteriores estes elementos eram adquiridos dos fabricantes). Como só se dispunha de uma fôrma para a fabricação das sapatas, foi preciso

planejar a produção destas de modo a ter protótipos isostáticos e hiperestáticos de mesma idade. Foram montados cavaletes de madeira nivelados para apoio das fôrmas (ver Fotografia 5.3). Para facilitar a desmoldagem das treliças após a cura, foi passado desmoldante na formas antes da concretagem. Foram usados espaçadores plásticos a cada meio metro em cada treliça, para garantir o cobrimento necessário para a armadura e impedir o atrito dos extensômetros elétricos (já fixados) com a fôrma durante o posicionamento da treliça.



Fotografia 5.3. Forma para execução da sapata

A concretagem da capa dos protótipos foi realizada em duas fases para as lajes hiperestáticas (dois ciclos de betoneira), de modo a evitar ultrapassar a capacidade limite da betoneira (ver Fotografia 5.4). Assim, misturou-se o volume de concreto necessário para concretar meia laje, e para cada ciclo da betoneira retiraram-se dois testemunhos (corpos-de-prova) para ensaio de tração e compressão. Para os protótipos isostáticos, a concretagem foi realizada com um ciclo de betoneira, sendo retirado também dois testemunhos por volume misturado.



Fotografia 5.4. Betoneira usada para misturar o concreto

A mistura dos materiais foi dosada em peso. A areia foi previamente seca de maneira que o volume de água a se empregar não deveria ser corrigido. Antes da concretagem propriamente dita, as fôrmas foram molhadas abundantemente para garantir que a água da mistura não fosse absorvida pela madeira, o que poderia resultar em uma perda de resistência do concreto endurecido. Durante a concretagem das sapatas e da capa das nervuras usou-se a vibração por imersão seguindo os preceitos de PEIXOTO [2003].



Fotografia 5.5. Cura das lajes (segundo plano) - areia molhada com água duas vezes ao dia

Para evitar a ocorrência de fissuras por retração durante a cura das lajes após a concretagem e a conseqüente diminuição de rigidez do elemento, foi colocada uma camada de aproximadamente três centímetros (3,0 cm) de espessura de areia média sobre o concreto depois que este já apresentava alguma resistência superficial (início de pega), evitando que a areia pudesse penetrar no concreto fresco (ver Fotografia 5.5). Esta camada de areia era molhada duas vezes por dia, garantindo a presença de água necessária para a realização das reações químicas decorrentes da hidratação do cimento. O período de molhagem das lajes se estendeu durante três dias, porém a camada de areia foi removida somente no ato da desforma.

5.2.2. Instrumentação

A instrumentação usada para a medição dos deslocamentos e deformações nos protótipos foi feita com relógios comparadores e bases magnéticas da marca DIGIMESS (precisão 0,1mm), transdutores à base de extensômetros elétricos de resistência, modelo IM-T-137i da marca KYOWA (precisão 0,1cm) e para medir a deformação nas armaduras

usou-se extensômetros elétricos de resistência, modelo KFG-S-121-C1-11 da marca KYOWA.

5.2.2.1. Instrumentação com Extensômetros Elétricos de Resistência

Foram instrumentadas nas lajes isostáticas, as armaduras longitudinais inferiores e superiores, no trecho equivalente ao meio do vão do modelo em ambas nervuras. Nas lajes hiperestáticas, além da instrumentação no meio de um vão, foram instalados extensômetros na seção de apoio central nas armaduras longitudinais superiores e inferiores. Para os protótipos isostáticos, foram utilizados quatro extensômetros e oito para as lajes hiperestáticas, como pode ser visto na Figura 5.3.

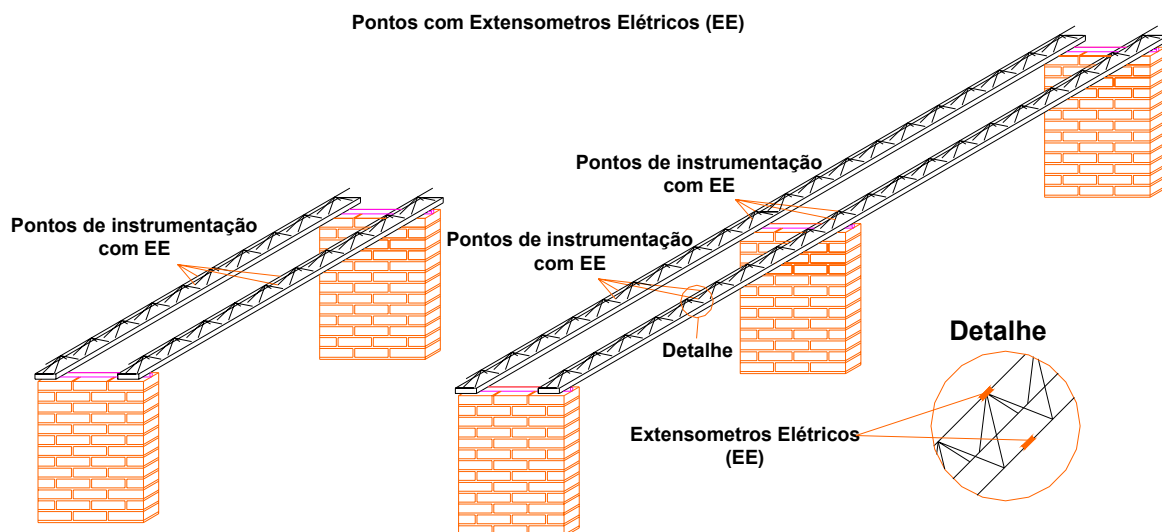


Figura 5.3. Instrumentação dos protótipos isostáticos e hiperestáticos

Para o bom desempenho do extensômetro elétrico de resistência deve-se utilizar uma técnica de aplicação (preparação, fixação e proteção). A seguir será apresentado um roteiro da técnica de aplicação utilizada nesta pesquisa, de acordo com TAKEYA [2000]:

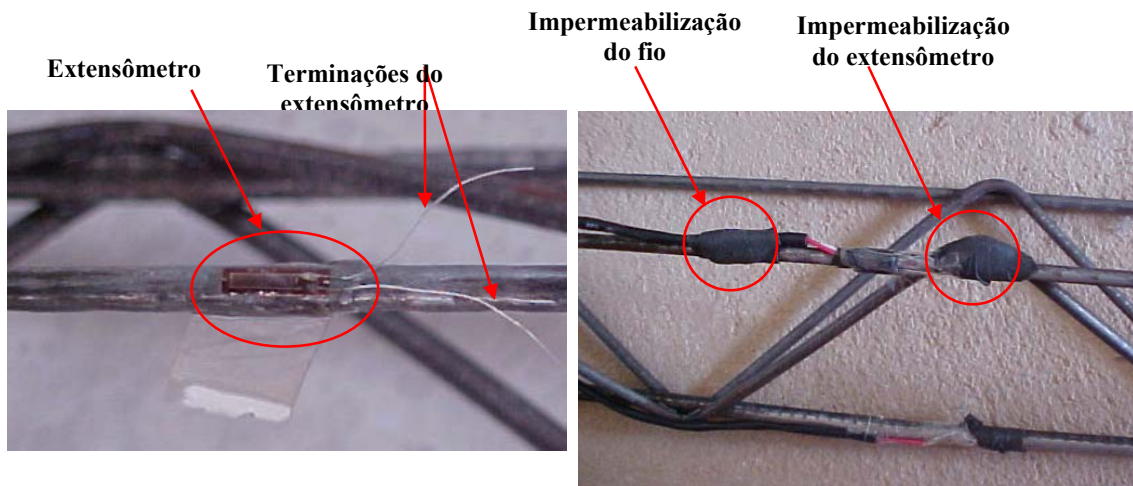
Preparação da superfície (lixar a fim de que a superfície esteja plana, sem saliências e reentrâncias), limpeza com gaze médica e marcação com giz;

Colar o extensômetro na fita adesiva e posicioná-lo na barra de aço;

Levantar uma das pontas da fita e aplicar o adesivo da marca Loctite 401 na superfície da peça;

Pressionar com o dedo o conjunto fita adesiva - extensômetro por um minuto;

Emendar o cabo blindado (com três fios) às duas terminações do extensômetro, como pode ser visto na Figura 5.4, utilizando solda; sendo uma extremidade soldada a um fio e a outra soldada a dois fios (vide Figura 5.4). Este procedimento foi utilizado, pois o aparelho aquisitor de dados se localiza a uma distância muito grande de algumas lajes instrumentadas. O cabo com três fios evita a perda de resistência ao longo do percurso e protege contra possíveis interferências do ambiente;



Fotografia 5.6. Extensômetro colado na barra

Fotografia 5.7. Impermeabilização do fio e extensômetro

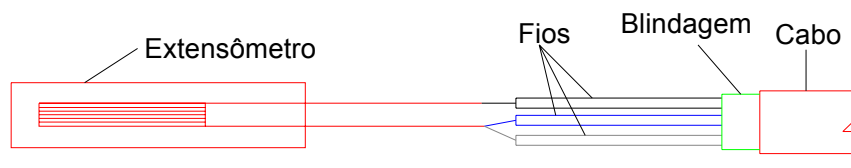
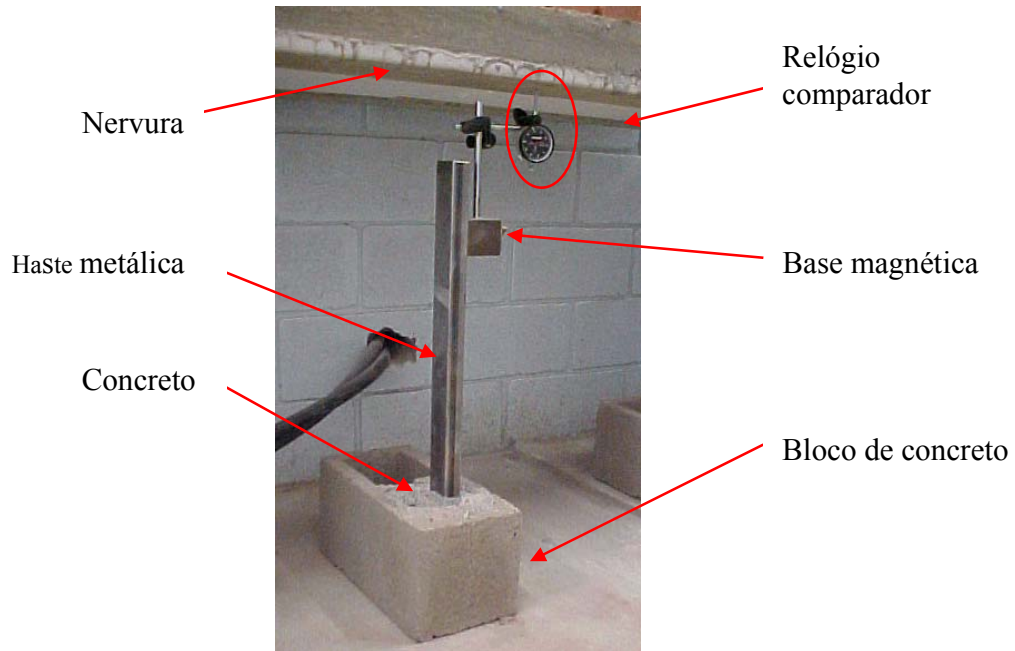


Figura 5.4. Esquema de soldagem dos fios

- Finalmente, impermeabilizar o extensômetro e os fios, utilizando fita de auto fusão do modelo 3M Scotch (19mm x 2mm), conforme Fotografia 5.7.

5.2.2.2. Relógios Comparadores e Transdutores à Base de Extensômetros Elétricos de Resistência

Tanto os transdutores quanto os relógios comparadores foram acoplados aos protótipos através das bases magnéticas, que por sua vez são fixadas em hastes metálicas concretadas em blocos de concreto, como podem ser vistos na Fotografia 5.8.



Fotografia 5.8. Fixação dos relógios comparadores às lajes



Fotografia 5.9. Transdutor elétrico

Todas as lajes foram instrumentadas com defletômetros no meio do vão. Nas lajes N e O, há transdutores elétricos em um dos vãos das lajes, conforme Fotografia 5.9.

5.3. Cálculos preliminares

Após a definição da geometria da seção transversal e aos esquemas estruturais, foi necessário estudar quais variáveis deveriam ser analisadas a fim de comparar os protótipos a serem ensaiados. Feita a análise das diversas variáveis, tais como armadura, carregamento, distância entre apoios (vão), etc, foi escolhida uma que fosse capaz de fornecer resultados experimentais suficientes para se avaliar a magnitude das flechas inicial e final, a relação entre as flechas inicial e final (coeficiente de fluência), a velocidade do desenvolvimento da flecha, a influência da fissuração da peça, dentre outras.

Fazendo a variação da armadura longitudinal das vigotas isostáticas e hiperestáticas, chegou-se a conclusão que mesmo dobrando a taxa de armadura calculada, haveria pouca influência na flecha imediata (como pode ser visto em ROGGE [2001]). Porém, é importante observar que teoricamente dobrando a quantidade de armadura a flecha imediata deveria ser menor principalmente se houvesse seções fissuradas. Entretanto não há grande percepção nos cálculos devido à peça não se encontrar fissurada em nenhum dos casos e, mesmo considerando a combinação rara de carregamento, a taxa de armadura necessária para resistir aos esforços é muito pequena e pouco influenciaria o momento de inércia mesmo no estágio II. Dessa forma, optou-se por não variar a taxa de armadura visto que os resultados obtidos não seriam de grande valia.

Na seqüência, foi feita uma análise fixando-se a taxa de armadura e variando o carregamento, de forma que houvesse tanto protótipos fissurados e não fissurados, ou seja, determinou-se qual a carga uniformemente distribuída deveria ser usada para obter-se pelo menos a seção mais solicitada fissurada.

Será apresentado apenas o processo de cálculo para uma laje isostática (L) e uma hiperestática (J), os demais resultados estão na tabela 5.2. Lembrando que os cálculos foram feitos utilizando as dimensões reais dos protótipos, assim como a resistência à compressão e à tração do concreto obtidos a partir dos resultados dos ensaios.

a-) Laje isostática (L)

Dados:

b_w (cm)	24	l (m)	1,99
b_f (cm)	54,7	A_{s+} (cm²)	0,55
h (cm)	10,9	A_{s-} (cm²)	0,565
h_f (cm)	3,5	I_{cg} (m⁴)	0,000036
f_{c,28} (MPa)	34,9	y_{cg} (cm)	4,37
f_{ct} (MPa)	3,88	d (cm)	8,77
d' (cm)	2,13	Área (cm²)	355,85
h_{tijolo} (m)	0,04	γ_{tijolo} (kN/m³)	15,00

Cálculo do carregamento atuante (g₁):

g₁ (kN/m)	0,889
-----------------------------	-------

- Características geométricas da seção bruta:

$$y_{cg} = \frac{(b_f - b_w) \cdot \left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w \cdot \frac{h^2}{2}}{A_g} = \frac{(54,7 - 24) \cdot \left(\frac{3,5^2}{2}\right) + 24 \cdot \frac{10,9^2}{2}}{(54,7 - 24) \cdot 3,5 + 24 \cdot 10,9} = 4,37 \text{ cm}$$

A posição do C.G. na direção y é em relação às fibras superiores.

$$I_{I_g} = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(y_{cg} - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w \cdot h \cdot \left(y_{cg} - \frac{h}{2}\right)^2$$

$$I_{I_g} = \frac{(54,7 - 24) \cdot 3,5^3}{12} + \frac{24 \cdot 10,9^3}{12} + (54,7 - 24) \cdot 3,5 \cdot \left(4,32 - \frac{3,5}{2}\right)^2 + 24 \cdot 10,9 \cdot \left(4,32 - \frac{10,9}{2}\right)^2$$

$$I_{I_g} = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

- Cálculo do momento de fissuração:

$$M_R = \frac{\alpha \cdot f_{ct,inf} \cdot I_c}{y_t} = \frac{1,2 \cdot 3880 \cdot 3,6 \cdot 10^{-5}}{(0,11 - 0,0432)} = 2,538 \text{ KNm}$$

$$y_t = h - y_{cg}$$

$$f_{ct,inf} = \text{experimental}$$

Sendo:

α - que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta;

α - 1,2 para seções T ou duplo T;

α - 1,5 para seções retangulares;

y_t - distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada;

I_c - momento de inércia da seção bruta de concreto;

f_{ct} - resistência à tração direta do concreto, conforme item 8.2.5 da NBR6118/2003, com o quantil apropriado a cada verificação particular.

- Fazendo momento de fissuração igual ao momento atuante na peça é possível obter o carregamento capaz de fissurar a peça:

$$M_R = M_{at} = \frac{p \cdot l^2}{8}$$

$$2,538 = \frac{p \cdot 1,99^2}{8} \Rightarrow p = 5,127 \text{ KN / m}$$

- Determinação da carga adicional a acrescentar no protótipo:

$$p = g_1 + q_a$$

Sendo:

g_1 – peso próprio da laje;

p – carregamento total;

q_a – carga adicional.

O peso próprio da laje é de 0,889KN/m.

$$q_a = 5,127 - 0,889 = 4,24 \text{ kN/m}$$

Para determinar a altura de tijolos necessária para obter o carregamento faz-se

$$h = \frac{q_a}{\gamma_{tijolo}}$$

Sendo:

h – altura do carregamento acidental dado em m;

q_a – carga adicional;

γ_{tijolo} – peso específico do tijolo cerâmico maciço (5 x 10 x 20cm).

$$h = \frac{4,24}{15 \cdot 0,547} = 0,517m = 51,7cm$$

Com treze camadas ou menos de tijolos o protótipo não se encontraria fissurado enquanto que utilizando quatorze camadas de tijolos ou mais a peça fissura.

b-) Laje hiperestática (J)

O processo é análogo ao das lajes isostáticas, embora neste caso tenha sido feita uma análise de qual carregamento considerar devido à existência de dois momentos atuantes (do apoio central e do centro do vão), conforme a Figura 5.5.

Dados:

b_w (cm)	24	l (m)	1,95
b_f (cm)	55,3	A_{s+} (cm²)	0,55
h (cm)	10,86	A_{s-} (cm²)	0,565
h_f (cm)	3,85	I_{cg} (m⁴)	0,0000368
f_{c,28} (MPa)	33,81	y_{cg} (cm)	4,27
f_{ct} (MPa)	3,14	d (cm)	8,73
d' (cm)	2,13	Área (cm²)	369,12
h_{tijolo} (m)	0,04	γ_{tijolo} (kN/m³)	15,00

Carregamento atuante:

g₁ (kN/m)	0,923
-----------------------------	-------

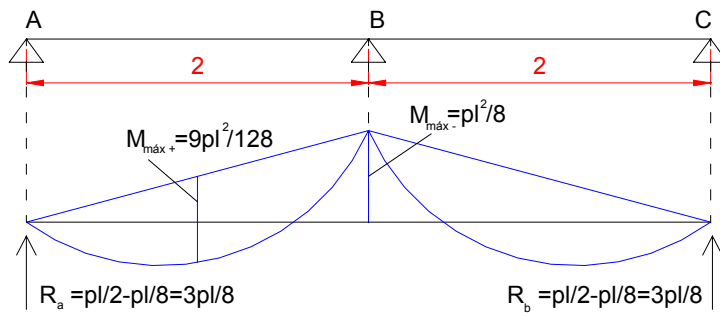


Figura 5.5. Momentos positivo e negativo atuante nas lajes hiperestáticas

- Características geométricas da seção bruta:

$$y_{cg} = 4,27cm$$

A posição do C.G. na direção y é em relação às fibras superiores.

$$I_{I_g} = 3,68 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Seção de apoio

- Cálculo do momento de fissuração:

$$M_R = \frac{\alpha \cdot f_{ct,inf} \cdot I_c}{y_t} = \frac{1,2 \cdot 3140 \cdot 3,68 \cdot 10^{-5}}{(0,0427)} = 3,247 \text{ KNm}$$

Fazendo momento de fissuração igual ao momento atuante na peça é possível obter o carregamento capaz de fissurar a peça:

$$3,247 = \frac{p \cdot 1,95^2}{8} \Rightarrow p = 6,831 \text{ KN/m}$$

- Determinação da carga adicional a acrescentar no protótipo:

$$q_a = 6,831 - 0,923 = 5,908 \text{ kN/m}$$

$$h = \frac{5,908}{15 \cdot 0,553} = 0,713 \text{ m} = 71,3 \text{ cm}$$

Portanto, com dezessete ou mais camadas de tijolos a peça fissura.

Centro do vão:

- Cálculo do momento de fissuração:

$$M_R = \frac{\alpha \cdot f_{ct,inf} \cdot I_c}{y_t} = \frac{1,2 \cdot 3140 \cdot 3,68 \cdot 10^{-5}}{(0,1086 - 0,0427)} = 2,104 \text{ kN/m}$$

Fazendo momento de fissuração igual ao momento atuante na peça é possível obter o carregamento capaz de fissurar a peça:

$$2,104 = \frac{9 \cdot p \cdot 1,95^2}{128} \Rightarrow p = 7,87 \text{ kN/m}$$

- Determinação da carga acidental a acrescentar no protótipo:

$$q = 7,87 - 0,923$$

$$q = 6,95 \text{ KN / m}$$

$$h = \frac{6,95}{15 \cdot 0,553} = 0,837 \text{ m} = 83,7 \text{ cm}$$

A laje J fissura na seção do centro do vão com vinte e uma camadas de tijolos ou mais. Portanto, a seção do apoio central fissura sob um determinado carregamento antes que a seção do meio do vão.

Concluiu-se que a variação do carregamento é um bom parâmetro para avaliar o efeito da fissuração na fluência.

Na tabela 5.2 estão as características geométricas das lajes, carregamentos atuantes, momentos de fissuração e números de fiadas necessários para fissurar as lajes.

Tabela 5.2 Características geométricas das lajes, carregamentos atuantes, momentos de fissuração e números de fiadas necessários para fissurar as lajes

Laje	I	J	K	L	M	N	O	P
b_f (cm)	55,25	55,3	56,1	54,7	55,1	55,95	55,8	54,85
h (cm)	10,9	10,86	11,1	10,9	10,7	10,56	11,3	11
h_f (cm)	3,5	3,85	3,73	3,5	4,2	3,3	3,85	3,5
$f_{c,28}$ (MPa)	31,13	32,81	28,77	34,9	31	23,9	24,4	32,72
f_{ct} (MPa)	3,88	3,14	3,06	3,88	3,88	3,4	3,4	3,88
d' (cm)	2,32	2,13	2,52	2,13	2,12	2,13	2,13	2,33
l (m)	2	1,95	2	1,99	1,94	2	1,99	1,93
I_{cg} (m ⁴)	$3,71 \cdot 10^{-5}$	$3,68 \cdot 10^{-5}$	$3,94 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$3,39 \cdot 10^{-5}$	$4,15 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$
y_{cg} (cm)	4,31	4,27	4,35	4,37	4,2	4,19	4,57	4,36
d (cm)	8,58	8,73	9,18	8,77	8,57	8,73	8,73	8,58
Área (cm ²)	357,78	369,12	373,02	355,85	376,92	346,10	380,28	358,475
g_1 (kN/m)	0,894	0,923	0,933	0,889	0,942	0,865	0,951	0,896
M_r (kNm)	2,621	3,247*	3,326*	2,618	2,507	3,301*	3,705*	2,665
p (kN/m)	5,242	6,831	6,652	5,289	5,329	6,602	7,485	5,723
q_a (kN/m)	4,348	5,908	5,719	4,4	4,387	5,737	6,533	4,827
N ^o fiadas de tijolo para fissurar	14	18	17	14	4**	18	20	15

*Momento de fissuração calculado somente para a seção de apoio onde a seção fissura primeiro

**Nesta laje será utilizado bloco de concreto $\gamma = 11,3 \text{ KN/m}^3$

OBS: Também foram feitos os cálculos de número de fiadas utilizando blocos de concreto. Entretanto, o incremento pequeno de carregamento utilizando tijolos permite uma melhor análise da deformação.

5.4. Descrição dos Novos Ensaio

Como foi visto anteriormente, para realização deste ensaio foram construídas oito lajes. Todas possuem mesma taxa de armadura ($0,55 \text{ cm}^2$), sendo quatro isostáticas e quatro hiperestáticas. Para cada laje foram definidos diferentes carregamentos. Há protótipos sob controle de umidade e temperatura (dentro da câmara climatizada) e protótipos sob condições ambientais (fora da câmara climatizada). Na tabela 5.3 estão as características destes novos protótipos:

Tabela 5.3. Características dos Novos Protótipos

Localização		Fora da câmara climatizada				Dentro da câmara climatizada			
Lajes		I	J	K	L	M	N	O	P
Condição de apoio*		B	C	C	B	B	C	C	B
Vão (m)		2	2	2	2	2	2	2	2
Comprimento (m)		2	4	4	2	2	4	4	2
Armadura (cm^2)	A_{s+} *	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
	A_{s-} *	---	0,6	0,6	---	---	0,6	0,6	---
Idade do concreto no carregamento (dias)		63	71	59	61	64	60	60	63
Carregamento (kN/m)		3,88	4,53	4,86	3,88	4,64	4,86	4,53	3,24
N° fiadas		12	14	15	12	4	15	14	10
Condição em serviço*		NF	NF	NF	NF	F	NF	NF	NF
$f_{c,28}$ (MPa)**		34,13	33,81	28,77	34,9	31	23,9	24,44	32,72

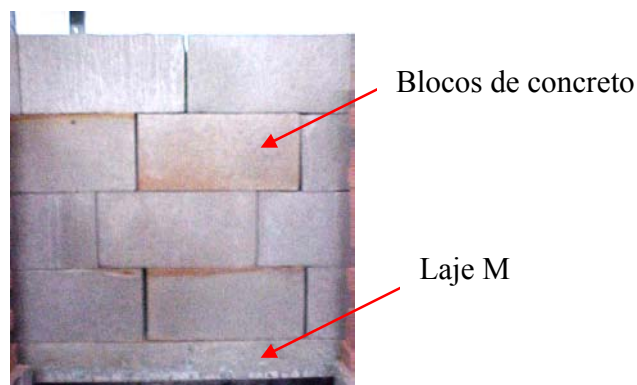
*Simbologia: C - contínua; B - biapoiada; A_{s+} - armadura positiva; A_{s-} - armadura negativa; F - laje fissurada; NF - laje não fissurada

**Os valores de f_{ck} apresentam valores bem diferentes, fato que leva a grande variação de carregamento

Conforme a tabela 5.2 do item anterior, o número de fiadas para as lajes fissurarem é muito grande, variando entre quatorze a vinte fiadas de tijolos, fato que inviabilizaria o ensaio devido ao tempo e tipo de carregamento utilizado (tijolo $4 \times 10 \times 20 \text{ cm}$). Conseqüentemente, os protótipos foram carregados distintamente, de forma que fosse possível avaliar a deformação, mas apenas com a laje M fissurada.

Com relação às datas de carregamento, como o número de fiadas para carregar os protótipos é muito grande, não foi possível que todos fossem carregados e medidos numa mesma data. Desta forma, optou-se pelo carregamento em datas distintas, mas próximas. Isso possibilitou a compatibilização da mão-de-obra com o tempo, além de evitar que as datas de carregamento fossem muito esparsas.

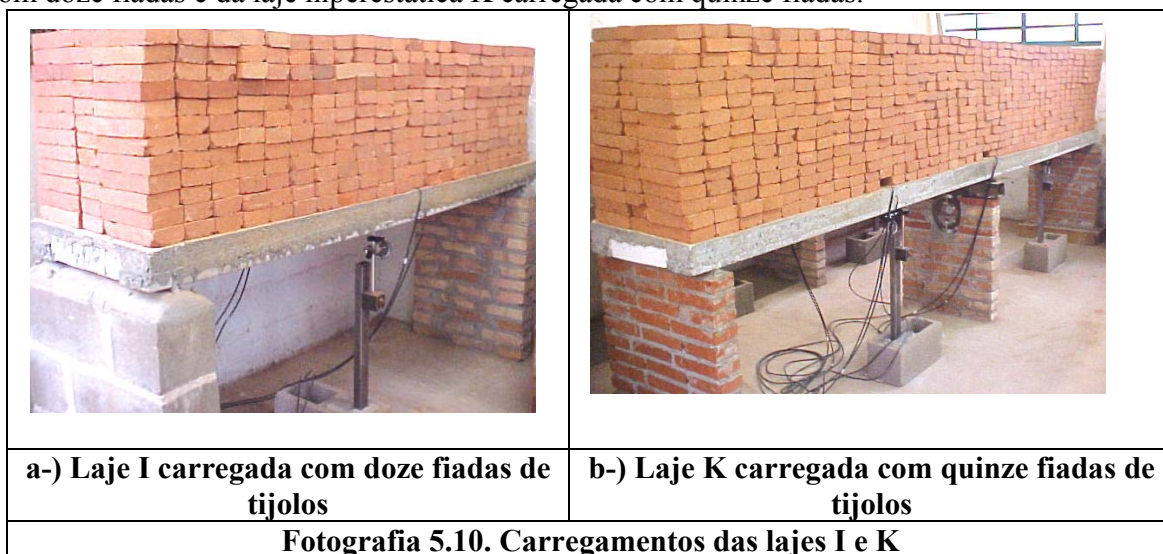
Apenas para laje M optou-se por carregar utilizando blocos de concreto (vide Fotografia 5.9), simplesmente devido à facilidade de realização do carregamento com os mesmos.



Fotografia 5.9. Laje M carregada com blocos de concreto

As lajes I, J, K, L, M e P, tiveram seus escoramentos retirados antes de efetuar o carregamento com tijolos e blocos. Portanto, as medições das deformações foram feitas a cada fiada carregada. Somente as lajes N e O foram carregadas antes da retirada do escoramento. Este método possibilitou a análise da curva de carregamento-deformação e a comparação entre o carregamento progressivo e o carregamento instantâneo.

Nas Fotografias 5.10a e 5.10b podem ser vistos os carregamentos das lajes isostática I com doze fiadas e da laje hiperestática K carregada com quinze fiadas.



Depois de carregada e retirados os escoramentos, iniciaram-se as medições. Nos primeiros dias foram feitas medidas de hora em hora; após uma semana as medidas passaram a serem feitas em três períodos do dia (manhã, tarde e noite) e após duas semanas medidas diárias. Também foram obtidas as deformações dos extensômetros elétricos colados nas armaduras. Também se obtiveram as deformações dos extensômetros elétricos colados na armadura, tanto na superior quanto na inferior, sendo os dados coletados pelo aquisitor acoplado a um computador.

5.5. Resultados e Análises dos Ensaio

Foram medidas as flechas de dois tipos de protótipos: os simplesmente apoiados executados por ROGGE [2001] e ROGGE [2002] e oito novos protótipos, sendo quatro isostáticos e quatro hiperestáticos (lajes I, L, M e P; lajes J, K, N e O, respectivamente). Nos próximos itens serão apresentados os resultados obtidos dos protótipos antigos e dos novos protótipos.

5.5.1. Resultados e Análises dos Protótipos de ROGGE [2001] e ROGGE [2002] (A, B, C e D)

A continuidade das medições da deformação ao longo do tempo das lajes executadas e medidas por ROGGE [2001] e ROGGE [2002] está contida na tabela 5.4.

O período entre quinhentos e sessenta e dois dias e mil e cento e vinte dias correspondeu ao tempo que o processo de auxílio à pesquisa e os pedidos de bolsa da FAPESP não foram obtidos. Assim, por não haver, na época, disponibilidade de um técnico para fazer as medições, coube ao professor pesquisador apenas cuidar para que os protótipos não fossem danificados. Acredita-se ser importante continuar medindo suas flechas, pois não se encontraram em nenhuma bibliografia resultados experimentais com idades tão elevadas usando materiais brasileiros.

Tabela 5.4. Flechas ao longo do tempo dos protótipos de ROGGE [2001] e ROGGE [2002]

Dia	A	B	C	D
	Exper.	Exper.	Exper.	Exper.
8	5,06	5,268	xxxx	xxxx
9	7,395	7,53	xxxx	xxxx
10	8,703	8,74	xxxx	xxxx
17	11,94	11,795	xxxx	xxxx
18	12,6	12,338	xxxx	xxxx
21	13,035	15,113	xxxx	xxxx
28	13,273	15,995	4,465	8,09
29	13,608	16,525	5,795	8,762
30	13,613	16,718	6,263	8,848
31	14,055	16,895	7,295	9,605
32	14,133	17,14	7,83	9,818
35	18,078	17,968	9,548	11,47
36	18,53	18,495	9,795	11,668
37	18,69	19,095	9,98	11,76
38	18,803	19,375	10,745	11,815
39	18,965	19,63	11	11,96
42	19,768	22,83	13,235	17,855
43	19,81	23,363	14,875	18,285
44	19,963	23,47	15,585	18,423
45	20,105	23,543	15,82	18,635
46	20,245	23,62	16,108	18,783
50	20,603	23,88	16,633	19,041
52	20,76	23,883	16,833	19,345
57	21,188	23,903	17,468	20,66
65	22,34	25,348	18,603	22,935
72	23,203	26,94	19,763	24,845
80	24,493	27,945	20,918	25,87
86	24,538	28,018	21,17	26,543
98	24,645	28,153	21,273	26,758
99	24,755	28,365	21,466	26,873
109	24,955	28,408	21,763	26,945
119	25,52	28,595	22,41	27,053
128	25,73	28,61	25,58	28,355
135	25,955	28,83	25,91	28,52
143	26,553	30,348	26,095	28,788
156	26,713	30,485	27,22	29,296
171	27,5	31,585	27,753	29,433
184	28,12	32,235	27,855	29,805
200	28,245	32,53	28,03	30,005
212	28,32	32,47	28,345	30,193
247	28,583	32,62	28,403	30,233

Dia	A	B	C	D
	Exper.	Exper.	Exper.	Exper.
248	28,793	32,79	28,67	30,395
254	28,98	32,853	28,873	30,478
260	29,105	32,935	28,4	30,533
268	29,225	33,055	28,5	30,625
282	29,45	33,185	28,55	30,799
289	29,59	33,248	28,6	30,868
305	29,735	33,343	28,65	30,952
312	29,918	33,48	28,7	31,215
332	30,091	33,558	28,75	31,345
339	30,205	33,613	28,8	31,585
353	30,585	33,783	28,85	31,745
382	30,155	35,283	28,9	31,9
397	30,645	35,33	28,95	32,9
410	30,23	36,165	29	33,2
430	31,038	36,895	29,05	33,7
443	31,133	36,568	29,1	34,1
456	31,523	36,475	29,15	34,5
486	31,745	36,43	29,2	34,9
493	31,73	36,185	29,25	35,1
500	31,033	35,03	29,3	35,3
521	31,293	35,3	29,35	35,8
530	30,72	33,96	29,4	36,2
549	31,483	34,795	29,45	36,6
558	32,595	34,833	29,5	36,8
562	32,108	35,708	29,55	37,1
1120	32,4	36,12	33,76	38,1
1160	32,49	36,87	34,28	38,5
1201	32,68	37,2	35,3	39,2
1240	32,98	37,43	36,12	39,5
1255	33,23	38,3	36,94	41,46
1271	33,40	38,99	37,24	42,37
1276	33,20	38,89	37,18	42,18
1284	33,56	39,13	37,39	42,69
1292	33,80	39,66	38,08	42,91
1299	34,05	39,69	38,12	42,87
1320	34,448	39,236	38,67	42,43
1326	34,765	40,065	39,52	42,58
1333	34,711	40,321	38,686	42,204
1347	34,189	39,793	38,37	42,216
1359	34,424	39,5	38,984	42,04
1373	34,715	39,83	38,203	42,26

O Gráfico 5.1 mostra a variação das flechas nas lajes A, B, C e D ao longo do tempo.

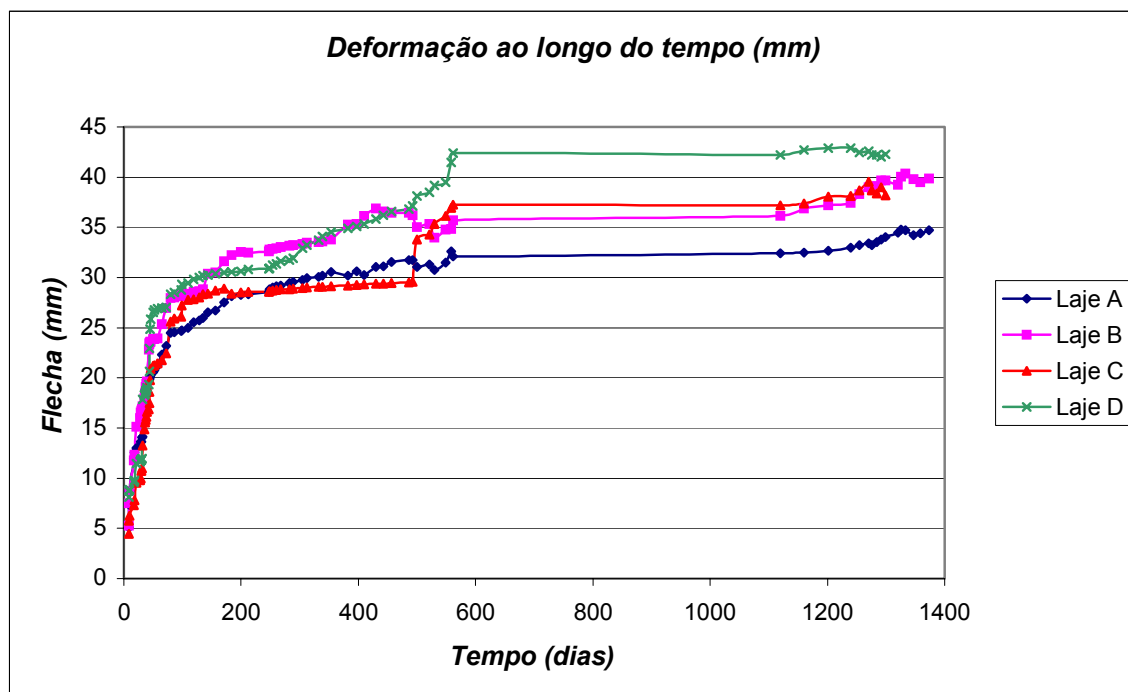


Gráfico 5.1 Variação das flechas das lajes A, B, C e D ao longo do tempo

Como pode ser visto no gráfico 5.1, há uma tendência de estabilização das flechas destes protótipos, sendo que os resultados se referem a um período de tempo de 1373 dias. No caso destas lajes todas têm a seção do meio do vão fissuradas e as deformações apresentadas quando divididas pela inicial são bem altas como já visto em KATAOKA [2004].

É importante ressaltar que os resultados das medições destas flechas foram apresentados no XXIX Congresso Brasileiro do IBRACON (vide KATAOKA [2004]) que junto com outro artigo foram os únicos trabalhos a apresentar resultados publicados nos últimos anos tratando da variação de flechas ao longo do tempo de estruturas de concreto embora houvesse no referido congresso uma sessão técnica de temas controversos justamente com o tema de “Deformações por Fluência”. Isso justifica a importância desses resultados, já que correspondem a dados de deformação ao longo do tempo de aproximadamente quatro anos.

5.5.2. Resultados e Análises dos Novos Protótipos (I, J, K, L, M, N, O e P)

Foram feitas as medições das flechas instantâneas e ao longo do tempo dos novos protótipos, assim como das deformações das armaduras. Embora as medições das flechas tenham sido feitas com o nível e os relógios mecânicos comparadores (defletômetros), só serão apresentados os resultados do segundo porque são mais precisos ficando os resultados do nível como controle para eventual erro grosseiro. Foi considerada uma régua metálica em cada apoio e mais uma fixa em uma parede como referência. As tabelas contendo as flechas de todas as lajes estão apresentadas no Anexo A. Também foram instrumentadas as paredes de apoio das lajes L e M isostáticas para que não houvesse nenhuma dúvida da pouca deformabilidade das mesmas.

Para estudar a influência da deformação ao longo do tempo sobre os esforços internos deste tipo de estrutura, uma das lajes hiperestáticas (Laje K) foi instrumentada de modo que fosse permitida a obtenção de valores da reação de apoio durante o período de pesquisa.

5.5.2.1. Flechas Experimentais dos Novos Protótipos (I, J, K, L, M, N, O e P)

Nos gráficos 5.3 e 5.4 estão apresentadas as evoluções das flechas das lajes isostáticas e hiperestáticas, considerando o tempo dado em dias. Como parâmetro de comparação entre os protótipos, foi feita a relação entre o carregamento adicional (p) e o módulo de elasticidade do concreto (E_{ci}) para cada laje, conforme a tabela 5.5.

Tabela 5.5. Relação Carregamento – Módulo de Elasticidade Secante (p/E_{cs})

Relação Carregamento – Módulo de Elasticidade Secante (p/E_{cs}) - segundo a NBR 6118:2004*				
Laje/Dias	p (kN/m)	f_{ck} (kN/m ²)	E_{cs} (kN/m ²)	p/E_{cs} (mm)
I	3,88	34,13	27808	0,1395
J	4,53	33,81	27678	0,1637
K	4,86	28,77	25532	0,1904
L	3,88	34,90	28120	0,1380
M	4,64	31,00	26503	0,1751
N	4,86	23,90	23271	0,2088
O	4,53	24,44	23532	0,1925
P	3,24	32,72	27228	0,1190

*Edição da NBR6118:2003 revista em 2004

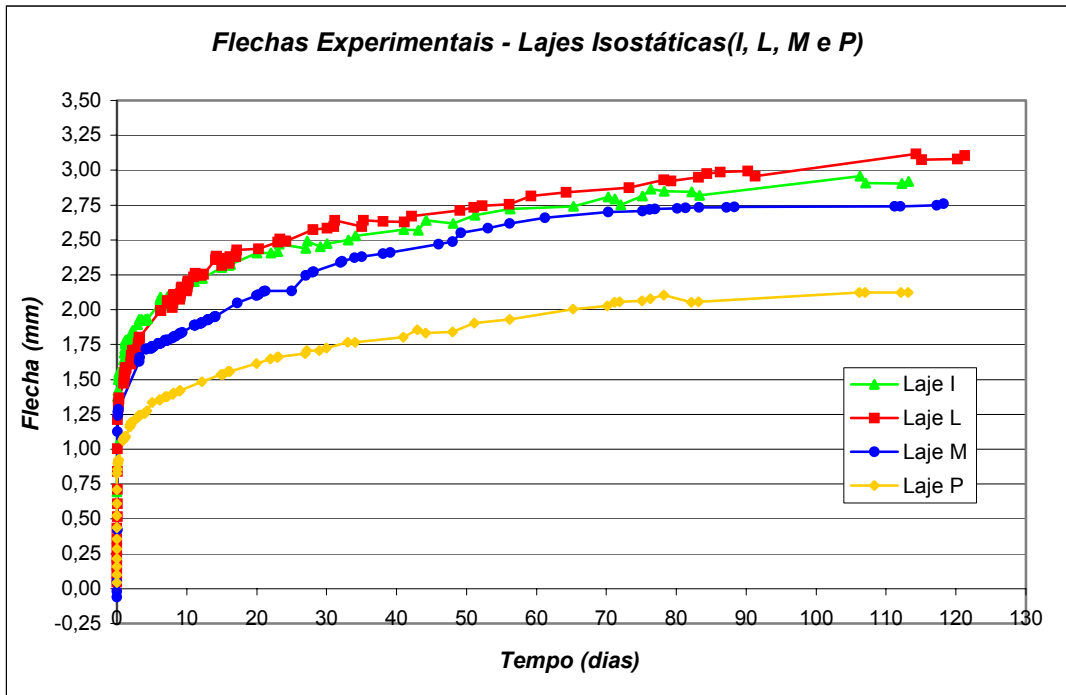


Gráfico 5.3. Deslocamento no meio do vão das lajes isostáticas (Protótipos L, M, P e I)

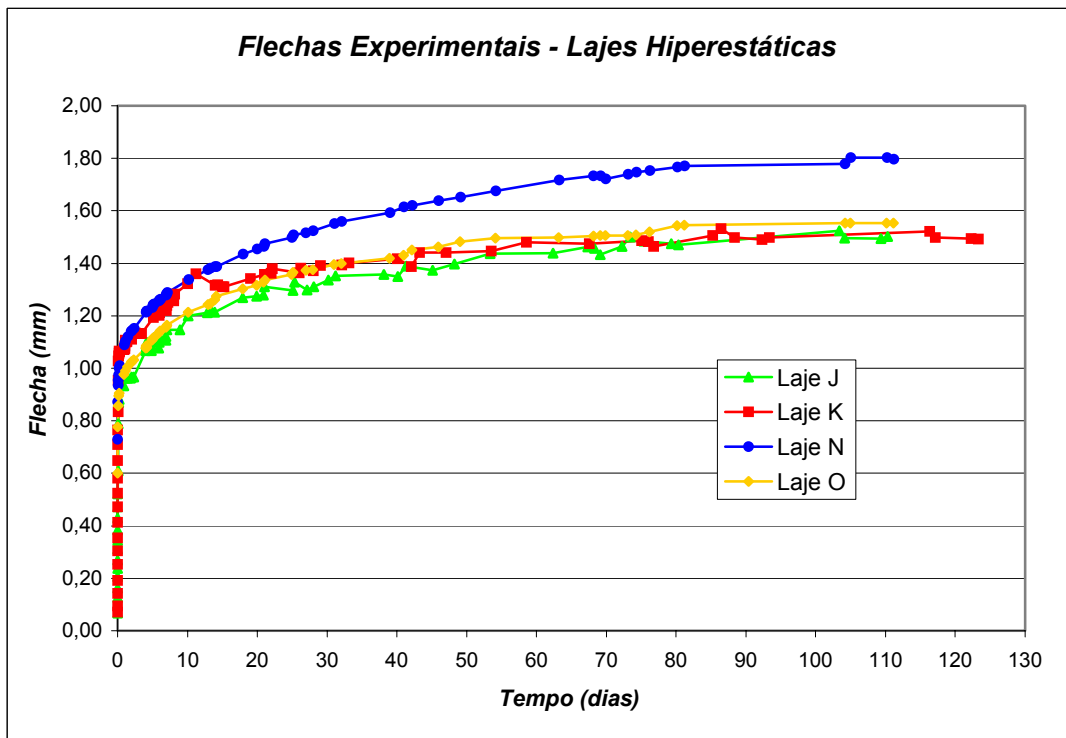


Gráfico 5.4. Deslocamento no meio do vão das lajes hiperestáticas

Como pode ser visto nos gráficos 5.3. e 5.4., o diagrama flecha x tempo mostra que o desenvolvimento das deformações se faz com o mesmo formato de curva tanto para lajes hiperestáticas quanto para lajes isostáticas.

Os protótipos I e L localizados fora da câmara climatizada, possuem mesma condição de apoio, as mesmas características geométricas e carga adicional (3,88 kN/m), praticamente a mesma idade do concreto quando efetuado o carregamento (63 e 61 dias) e resistência a compressão aos vinte e oito dias ($f_{c,28}$ – 33,13 e 34,9 MPa). Desta forma, pode-se notar que as relações p/E_{cs} (conforme tabela 5.5) para estas lajes são muito semelhantes, o que implica em diagramas flecha x tempo coincidentes, como já era esperado. Da mesma forma, a Laje P apresenta a menor flecha diferida por ter esta a menor relação p/E_{cs} .

Também é possível notar que as lajes localizadas dentro da câmara (M e P) apresentaram menor deformação quando comparadas com as localizadas fora da câmara (I e L). A Laje M, mesmo sendo a única fissurada e possuindo (sob controle de temperatura e umidade) maior relação p/E_{cs} dentre as lajes isostáticas, apresenta flecha diferida menor quando comparada com os valores obtidos das Lajes I e L. Portanto, pode-se afirmar que há influência das condições climáticas sobre o comportamento destas lajes quanto às deformações ao longo do tempo.

As lajes hiperestáticas apresentaram variabilidade considerável na resistência a compressão aos vinte e oito dias ($f_{c,28}$). As lajes sob controle de temperatura e umidade N e O tiveram $f_{c,28}$ parecidos e menores que os valores obtidos para os protótipos J e K (também hiperestáticos) sob condições ambientais naturais (vide tabela 5.3).

Comparando as lajes J e K, nota-se que possuem flechas semelhantes embora K tenha apresentado flechas um pouco maiores, como pode ser visto no gráfico 5.4. Isso se deu devido ao fato da Laje K possuir maior relação p/E_{cs} e de ter sido carregada com menor idade (59 dias). Entretanto, a existência de um anel dinamométrico colocado no apoio central, provavelmente deve ter alterado as deformações, pois o anel absorve parte das deformações da laje. Portanto, esta laje será analisada separadamente.

A Laje J apresenta as menores deformações, pois além de possuir menor relação p/E_{cs} , foi carregada com uma idade maior (71 dias) que os outros protótipos hiperestáticos. Enquanto isso, as lajes N e O são as que apresentam maiores flechas, sendo as flechas de N

aproximadamente 11% maior que O. O protótipo N possui as maiores flechas, pois além de estar mais carregado tem p/E_{cs} maior.

Comparando lajes hiperestáticas dentro (N e O) e fora da câmara (J e K), verifica-se a grande influência da resistência à compressão nas deformações, pois as lajes com menores resistências sob controle de temperatura e umidade apresentaram maiores flechas.

Fazendo uma comparação entre os protótipos isostáticos e os hiperestáticos, é possível verificar que a continuidade das lajes também é outro fator que influencia de forma considerável nas deformações. Para os protótipos situados dentro da câmara, as flechas das lajes isostáticas são em média 60% maiores quando comparadas com as das lajes hiperestáticas, enquanto que para as lajes fora da câmara, esta proporção é de 130%, como pode ser visto na tabela 5.6.

Tabela 5.6. Flechas (mm) das lajes I, J, K, L, M, N, O e P para algumas idades após o carregamento

Flecha experimental (a) para algumas idades						
Laje/Dias	0	20	40	60	80	100
I	1,065	3,406	3,568	3,729	3,849	3,918
J	0,789	1,275	1,350	1,438	1,471	1,516
K	0,920	1,349	1,416	1,479	1,479	1,505
L	1,004	2,434	2,632	2,819	2,928	3,017
M	1,274	2,103	2,418	2,649	2,728	2,738
N	0,730	1,455	1,603	1,702	1,767	1,778
O	0,605	1,018	1,124	1,197	1,242	1,251
P	0,998	1,616	1,800	1,961	2,082	2,106

5.5.2.2. Coeficiente de Fluência Experimental (CF)

Os valores obtidos para os coeficientes de fluência de flecha das lajes isostáticas e hiperestáticas podem ser vistos nos gráficos 5.5 e 5.6, sendo o coeficiente de fluência de flechas (CF) definido por:

$$CF = \frac{\Delta L_{total} - \Delta L_{inicial}}{\Delta L_{inicial}}$$

Sendo:

ΔL_{total} - deslocamento total no meio do vão;

$\Delta L_{inicial}$ - deslocamento instantâneo no meio do vão.

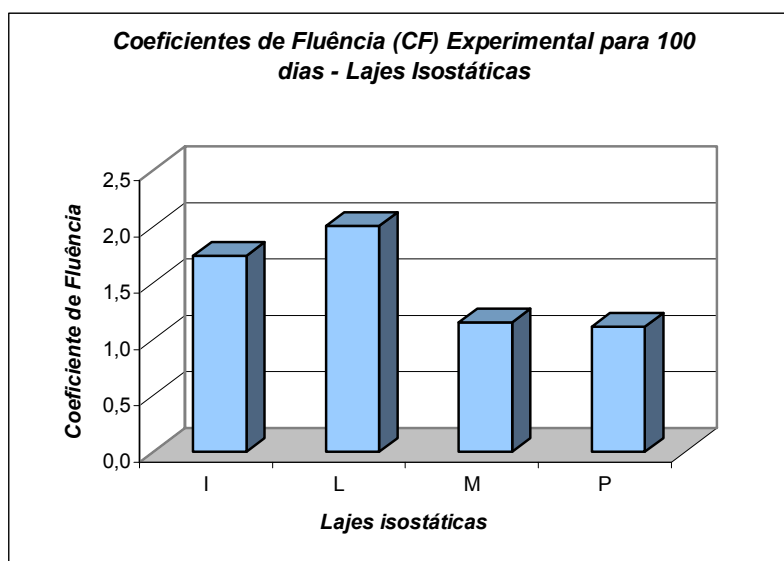


Gráfico 5.5. Coeficiente de Fluência das Lajes Isostáticas

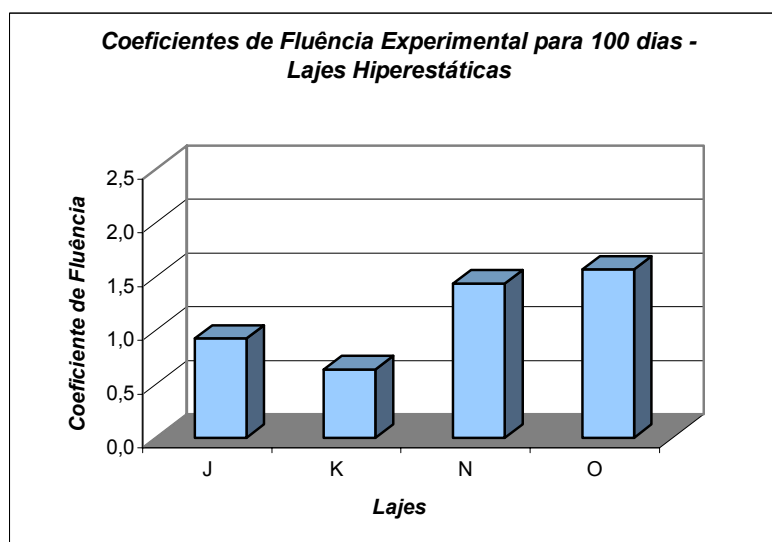


Gráfico 5.6. Coeficiente de Fluência das Lajes Hiperestáticas

Considerando os protótipos dentro da câmara (N, O, M e P), pode-se notar a partir dos gráficos 5.5 e 5.6, que os valores do coeficiente de fluência das hiperestáticas (N e O) são superiores comparando com as isostáticas (M e P). Para as lajes situadas fora da câmara ocorre o contrário, sendo que os coeficientes de fluência dos protótipos isostáticos I e L superam os das lajes hiperestáticas J e K.

Para as lajes isostáticas verifica-se que os protótipos sob controle de umidade e temperatura (M e P) apresentam coeficientes de fluência menores que os coeficientes das lajes localizadas fora da câmara climatizada. Isso provavelmente ocorreu devido ao fato de que quando há controle estável da temperatura e umidade, as deformações são menores.

As lajes hiperestáticas localizadas dentro da câmara (N e O) apresentaram maior coeficiente de fluência (1,435 e 1,564 respectivamente), pois neste caso a resistência à compressão do concreto foi o fator preponderante.

Fazendo uma comparação entre os coeficientes de fluência aos cem dias dos protótipos de ROGGE [2002] e os novos protótipos executados nesta pesquisa, conforme tabelas 5.7 e 5.8, é possível verificar que a média dos coeficientes de fluência das lajes de ROGGE [2002] é aproximadamente 160% maior que a média do coeficiente de fluência das lajes isostáticas deste novo projeto. Isto se dá pelo fato de apenas uma das novas lajes se apresentar fissurada, enquanto que todas as lajes de ROGGE [2002] se encontram nesta situação.

Tabela 5.7. Coeficientes de fluência aos 100 dias para as lajes I, J, K, L, M, N, O e P

Lajes	I	J	K	L	M	N	O	P
Coef. fluência	1,740	0,922	0,636	2,005	1,150	1,435	1,564	1,111

Tabela 5.8. Coeficientes de fluência aos 100 dias para as lajes de ROGGE [2002] A, B, C e D

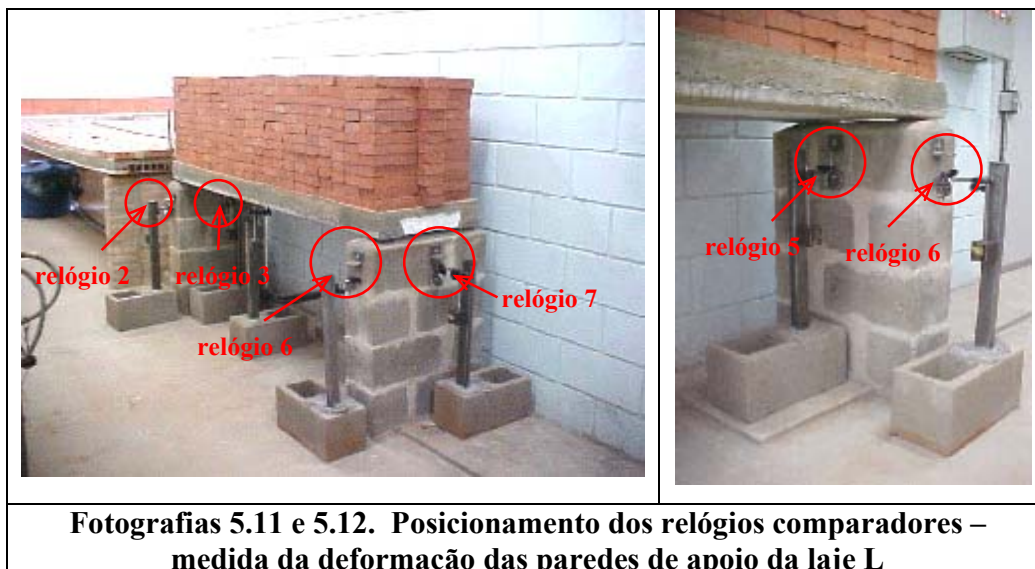
Lajes	A	B	C	D
Coef. Fluência	3,932	4,392	4,729	2,503

5.5.2.3. Deformação na Alvenaria de Apoio das Lajes

Para avaliar a deformação da alvenaria de apoio com o tempo, fixaram-se perfis metálicos do tipo cantoneira na parte superior da alvenaria. Nos perfis foram acoplados os relógios comparadores, que por sua vez estavam fixos em uma haste metálica concretada em um bloco de concreto, conforme Fotografia 5.11.

A laje L se localiza fora da câmara climatizada estando exposta às condições de temperatura e umidade variáveis e a laje M está situada no interior da câmara climatizada (sob temperatura e umidade controladas).

Na laje L foram instrumentadas as duas paredes em seis pontos distintos, como pode ser visto na Fotografia 5.11. Na Laje M também foram instrumentadas as duas paredes em apenas dois pontos distintos devido a dificuldades de fixação dos relógios.



Por meio dos resultados, apresentados no Anexo B, percebeu-se que os valores de deformação medidos tanto para a laje L quanto para a laje M tiveram uma variação pequena (centésimo de milímetro), estando, portanto estes resultados no limite de precisão do aparelho. Porém, é importante ressaltar que a variação das leituras realizadas para a laje M submetida à temperatura e umidade controladas apresentou deformação inferior aos dados obtidos para a laje L.

5.5.2.4. Efeito da Variação das Condições Climáticas sobre os Protótipos

Neste item serão apresentados nos gráficos 5.7. e 5.8. a variação da temperatura e umidades relativas instantâneas, tanto a ambiental quanto dentro da câmara climatizada, sendo que nesta última foram mantidas a temperatura de vinte e três graus Celsius e umidade de cinquenta por cento. Além destes serão representados os gráficos 5.9., 5.10., 5.11. e 5.12. de temperatura e umidade máxima e mínima do dia, assim como o gradiente destes. As tabelas contendo os dados de temperatura e umidade estão no Anexo C.

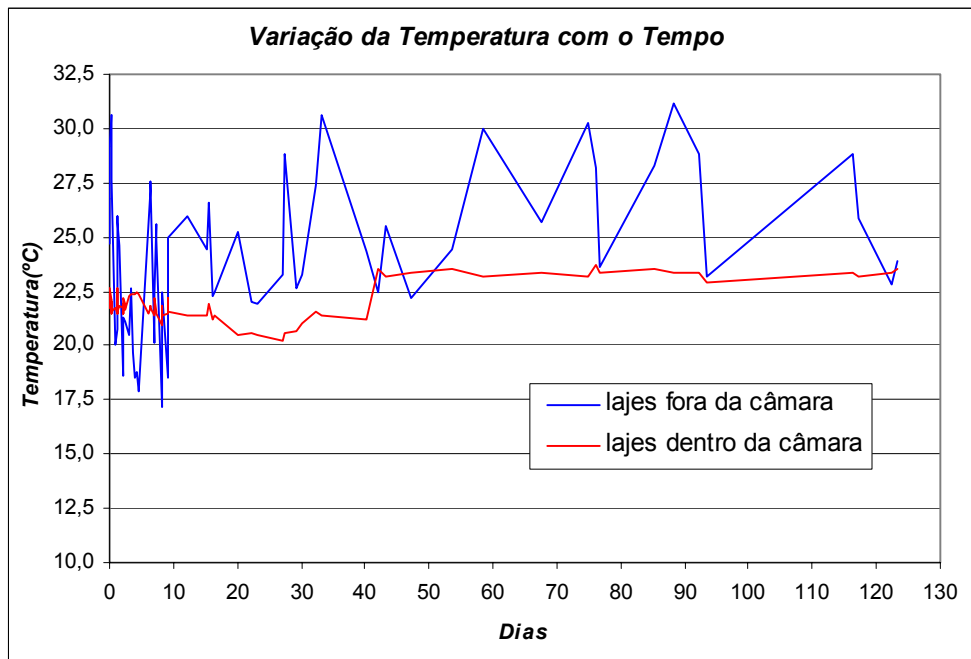


Gráfico 5.7. Temperaturas instantâneas no período

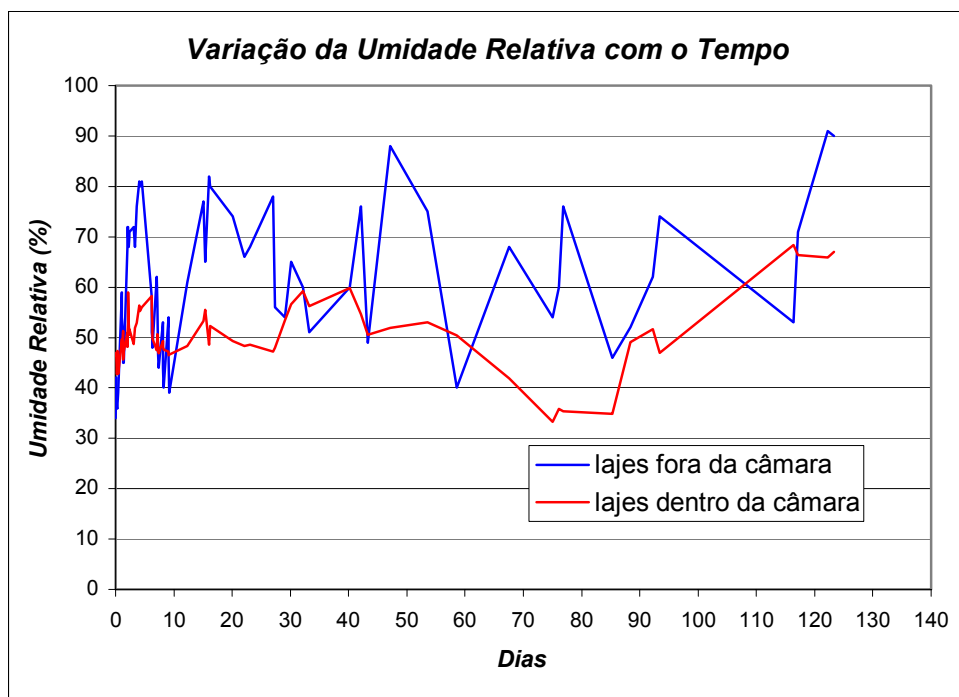


Gráfico 5.8. Umidades relativas instantâneas no período

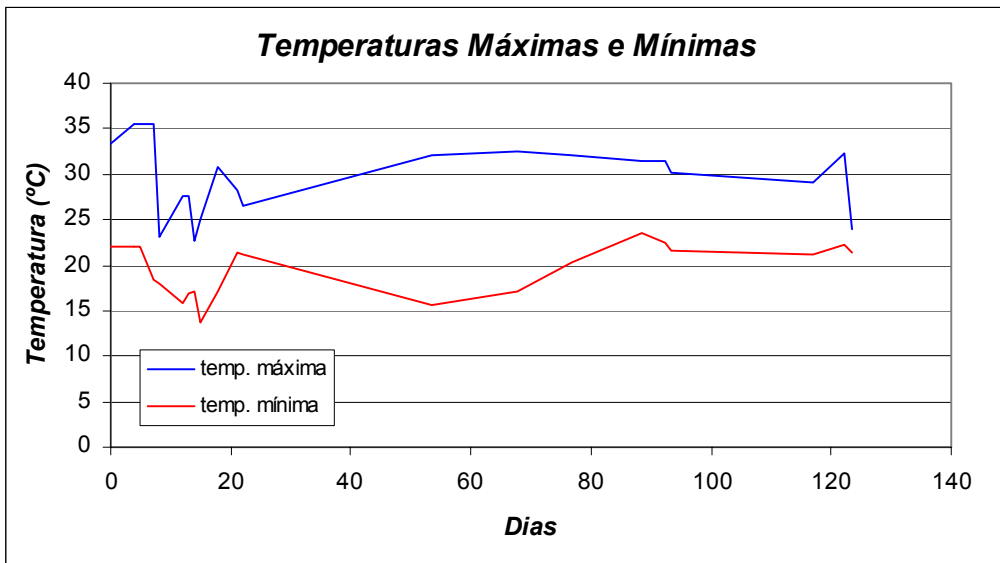


Gráfico 5.9. Temperaturas máximas e mínimas do dia

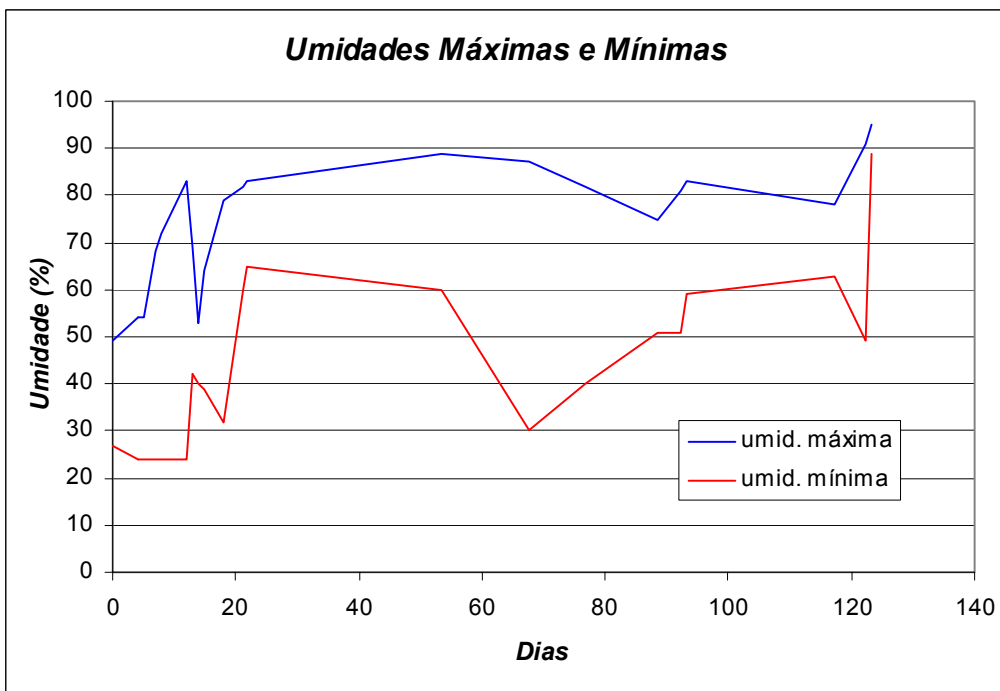


Gráfico 5.10. Umidades relativas máximas e mínimas do dia

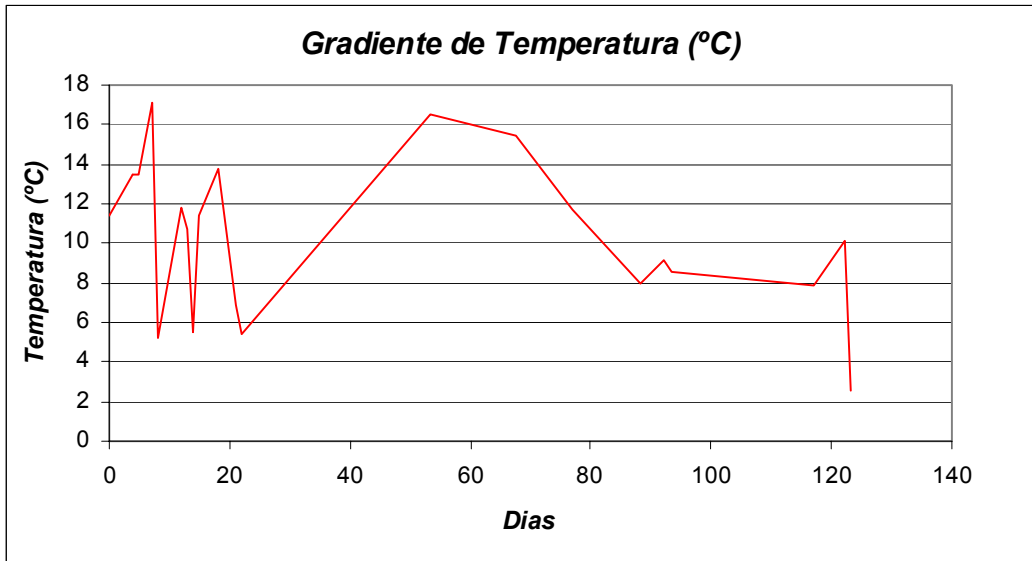


Gráfico 5.11. Gradientes de temperaturas do dia

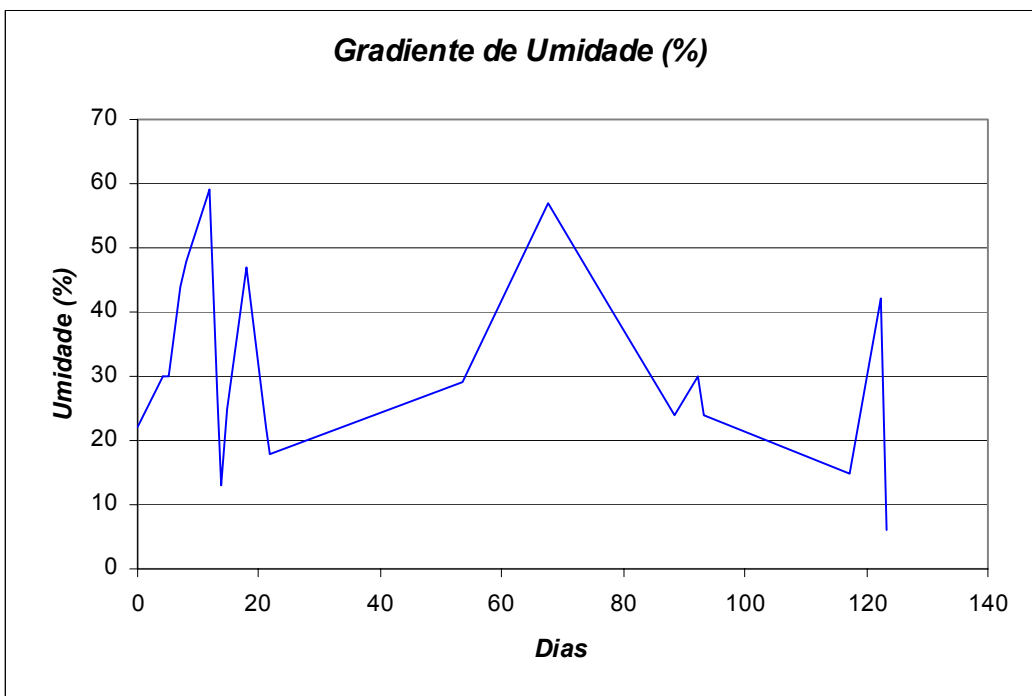


Gráfico 5.12. Gradiente de umidades relativas máximas e mínimas do dia

É possível notar nos últimos gráficos que, apesar do curto período analisado (cerca de 120 dias), a variação climática mesmo dentro de um laboratório fechado é grande, ficando difícil definir um valor médio de temperatura e umidade a se empregar como já havia constatado ROGGE [2002].

Durante o ensaio de deformação ao longo do tempo pode-se notar que a flecha apresentou valores negativos durante o período de um dia. Isso ocorreu quando a temperatura ao longo do dia começava a cair. A diminuição da temperatura ambiente faz com que o protótipo, por troca de calor, acabe também se resfriando. Como o protótipo é composto por materiais de coeficiente de condutibilidade térmica distintos (concreto e EPS) verificou-se que, se exposta um longo período de tempo a uma temperatura baixa e posteriormente a uma temperatura mais alta, decorreria um certo tempo até que a temperatura da face superior se igualasse a inferior, podendo haver uma deformação no sentido contrário às cargas. Estabilizado o gradiente de temperatura somente o efeito da fluência e retração ocorreriam, fazendo com que a laje sofresse movimento descendente novamente. A Figura 5.6 representa esta situação.

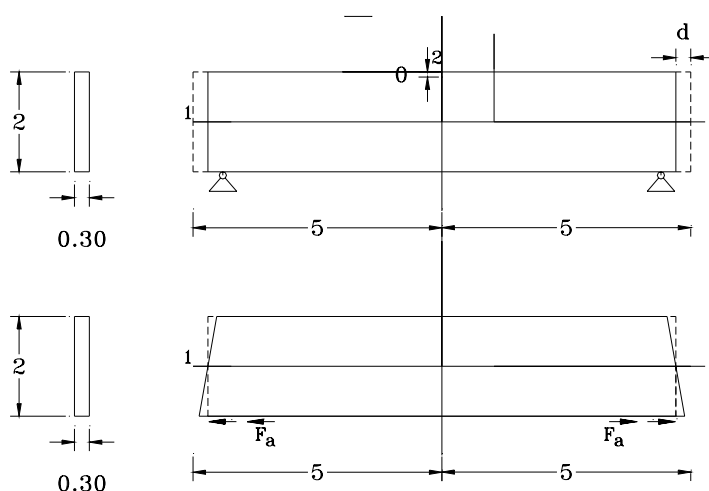


Figura 5.6. Representação da variação de dimensões devido ao gradiente de temperatura, a) variação com temperatura igual nas duas faces, b) ocorrência de um gradiente de temperatura

Para estudar este fenômeno previu-se a construção da câmara climatizada, a qual possibilita avaliar quão significativa é a influência das condições ambientais nas deformações ao longo do tempo.

Como pode ser visto nos gráficos 5.11 e 5.12, o gradiente de temperatura varia de um valor mínimo de cinco ao máximo de dezessete graus Celsius e o gradiente de umidade varia de quinze a sessenta por cento. Neste sentido, pode-se notar que as lajes isostáticas (que apresentam praticamente as mesmas características geométricas, carregamento, resistência à compressão aos vinte e oito dias) sob controle de temperatura e umidade tiveram flechas menores e menor velocidade de deformação que as lajes sob condições ambientais.

Além disso, foi possível verificar que quanto maior o gradiente de temperatura e umidade, maiores foram as variações das flechas ao longo do dia. Comparando as lajes isostáticas dentro e fora da câmara no dia (30/09/04) em que houve maior gradiente de temperatura, ou seja, dezessete graus Celsius, é possível notar que a velocidade de deformação das lajes sem gradiente de temperatura apresentam valores bem menores de flechas e de velocidade de deformação, como pode ser visto na tabelas 5.9 e 5.10. Mesmo considerando a laje M que se encontra fissurada, a variação da flecha ao longo do dia não é considerável.

Tabela 5.9. Flechas das lajes I, L, M e P em mm no dia de maior gradiente de temperatura

Hora	Fora da Câmara		Dentro da Câmara	
	I	L	M	P
08:50	2,64	xxxx	1,758	1,065
10:00	2,645	2,075	1,758	1,07
11:12	2,69	2,095	1,758	1,07
12:15	2,719	2,117	1,758	1,075
14:00	2,755	2,145	1,758	1,09
15:05	2,775	2,155	1,759	1,09
16:05	2,782	2,159	1,759	1,09
17:30	2,781	2,159	1,759	1,09

Tabela 5.10. Velocidade de deformação em mm/dia das lajes I, L, M e P

Velocidade de deformação (mm/dia)			
I	L	M	P
0,39	0,27	0,003	0,069

Para as lajes hiperestáticas escolheu-se o dia (05/10/04) de maior gradiente de temperatura (11,8°C) do período em que foram medidas, que por coincidência foi o dia de maior gradiente de umidade (59%) do tempo de medição total das lajes isostáticas e hiperestáticas. Também, foram observadas maiores variações das flechas durante o dia nas lajes sob condição ambiental, como pode ser visto nas tabelas 5.11 e 5.12.

Tabela 5.11. Flechas das lajes J, K, N e O em mm no dia de maior gradiente de temperatura

Hora	Fora da Câmara		Dentro da Câmara	
	J	K	N	O
12:50	1,068	1,159	1,213	1,077
14:10	1,082	1,170	1,217	1,084
15:10	1,091	1,174	1,218	1,085
16:00	1,099	1,177	1,218	1,079

Tabela 5.12. Velocidade de deformação em mm/dia das lajes J, K, N e O

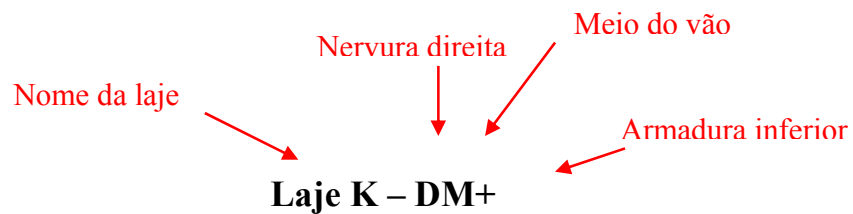
Velocidade de deformação (mm/dia)			
J	K	N	O
0,230	0,136	0,040	0,015

5.5.2.5. Resultados e Análises das Tensões na Armadura.

Conforme o item 5.2.2.1., nos novos protótipos foram colocados extensômetros elétricos (EE) do tipo "strain-gage" para acompanhamento das deformações da armadura tracionada e na armadura da região do concreto comprimido para o monitoramento destas tensões ao longo do tempo. A seguir estão apresentados os melhores resultados das deformações específicas das lajes I (isostática), K e O (hiperestáticas) instrumentadas, tanto para as primeiras horas quanto para quarenta e cinco dias consecutivos, conforme os gráficos 5.13 a 5.22. Os espaços existentes entre as curvas, nos quais a tensão cai para zero são espaços de tempo em que não estão sendo coletados dados.

Em todos os gráficos há uma identificação no canto superior contendo o nome da laje (I, K ou O), a posição do EE na laje ("D" para nervura direita ou "E" para nervura esquerda), localização da seção transversal em que se encontra o EE na nervura ("M" para meio do vão e "A" para seção do apoio) e a posição do EE na armadura da treliça ("+" para armadura inferior e "-" para armadura superior), como mostra no esquema a seguir:

Esquema para nomear as deformações:



Também foram calculadas as deformações específicas para as lajes instrumentadas com extensômetros elétricos através de:

$$\sigma_i = \frac{M_{at}}{I_h} y_i \qquad \sigma_s = \frac{M_{at}}{I_h} y_s$$

$$\varepsilon_{si} = \frac{\sigma_i}{E_{cs}} \qquad \varepsilon_{ss} = \frac{\sigma_s}{E_{cs}}$$

Sendo:

σ_i e σ_s – tensão na armadura inferior e superior, respectivamente;

M_{at} – momento atuante;

y_i e y_s – distância do centro de gravidade da seção transversal à armadura inferior e superior, respectivamente;

I_h – momento de inércia homogeneizado da peça;

ϵ_{si} e ϵ_{ss} – deformação específica do aço inferior e superior, respectivamente;

E_{cs} – módulo de elasticidade secante do concreto.

Os resultados das deformações específicas do aço superior e inferior calculadas estão apresentadas nas tabelas 5.12 e 5.13.

Tabela 5.12. Momento atuante (M_{at}), características geométricas (y_i, y_s, h, d_i', d_s'), módulo de elasticidade (E), tensão na armadura superior (σ_s) e inferior (σ_i), deformação específica da armadura inferior (ϵ_{si}) e superior (ϵ_{ss}) para laje isostática I

Laje	I
$M_{at}(\text{kNm})$	2,435
$y_i(\text{cm})$	4,67
$y_s(\text{cm})$	1,99
$y_s(\text{cm})$	10,9
$y_{cg}(\text{cm})$	4,31
$d_i'(\text{cm})$	1,92
$d_s'(\text{cm})$	2,32
$I_h(\text{m}^4)$	$3,8 \cdot 10^{-5}$
$s_i(\text{KN/m}^4)$	2992,487
$s_i(\text{KN/m}^4)$	1275,171
$E(\text{kN/m}^2)$	$2,6 \cdot 10^7$
$\epsilon_{si} (\text{‰})$	0,115
$\epsilon_{ss} (\text{‰})$	0,049

Tabela 5.13. Momento atuante (M_{at}), características geométricas (y_i, y_s, h, d_i', d_s'), módulo de elasticidade (E), tensão na armadura superior (σ_s) e inferior (σ_i), deformação específica da armadura inferior (ϵ_{si}) e superior (ϵ_{ss}) para lajes hiperestáticas K e O (momento positivo - meio do vão e momento negativo - apoio central)

Seção	Meio da vão		Apoio Central	
	K	O	K	O
$M_{at}(\text{kNm})$	1,682	1,57	2,99	2,792
$y_i(\text{cm})$	4,83	4,81	4,83	4,81
$y_s(\text{cm})$	1,83	2,44	1,83	2,44
$y_s(\text{cm})$	11,1	11,3	11,1	11,3
$y_{cg}(\text{cm})$	4,35	4,57	4,35	4,57
$d_i'(\text{cm})$	1,92	1,92	1,92	1,92
$d_s'(\text{cm})$	2,52	2,13	2,52	2,13
$I_h(\text{m}^4)$	$3,41 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$
$\sigma_i(\text{KN/m}^2)$	2382,422	1756,209	4235,103	3123,144
$\sigma_s(\text{KN/m}^2)$	902,657	890,884	1604,60	1584,30
$E(\text{kN/m}^2)$	$2,6 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^7$
$\epsilon_{si} (\text{‰})$	0,0916	0,0764	0,163	$2,3 \cdot 10^7$
$\epsilon_{ss} (\text{‰})$	0,035	0,039	0,062	0,069

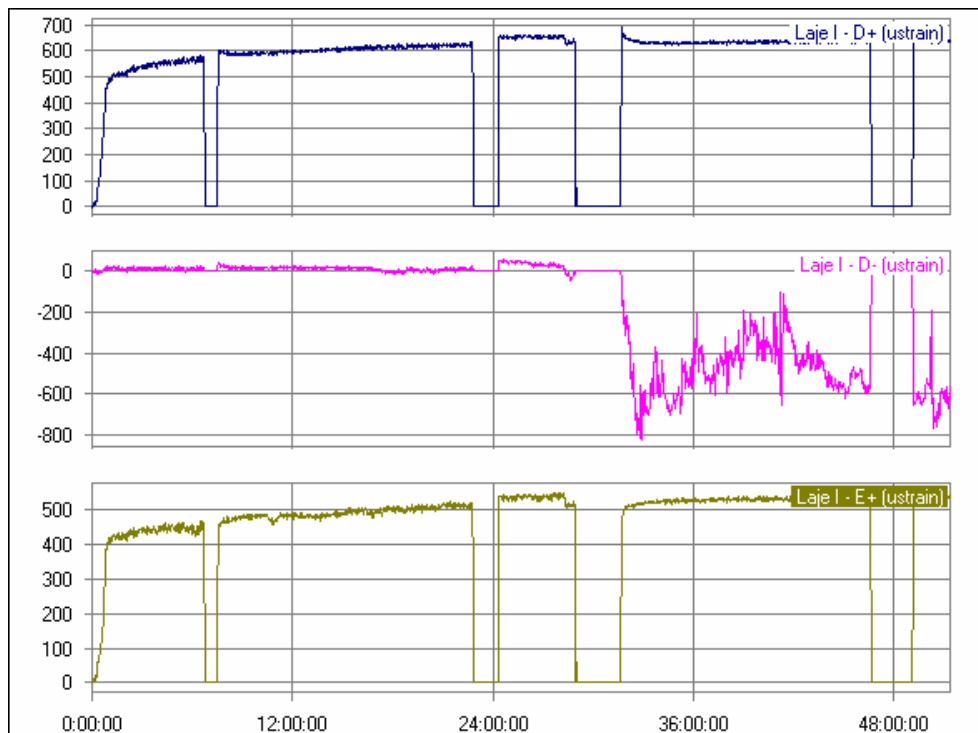


Gráfico 5.13. Deformações específicas nas primeiras 50 horas para laje I biapoiada

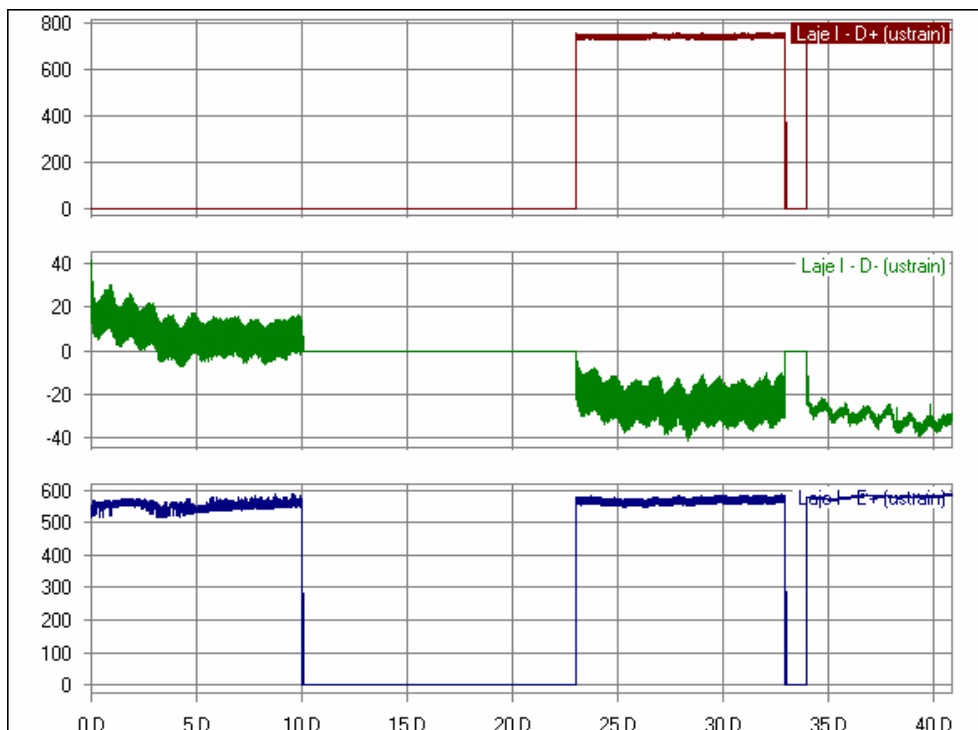


Gráfico 5.14. Deformações específicas de 45 dias para laje I biapoiada

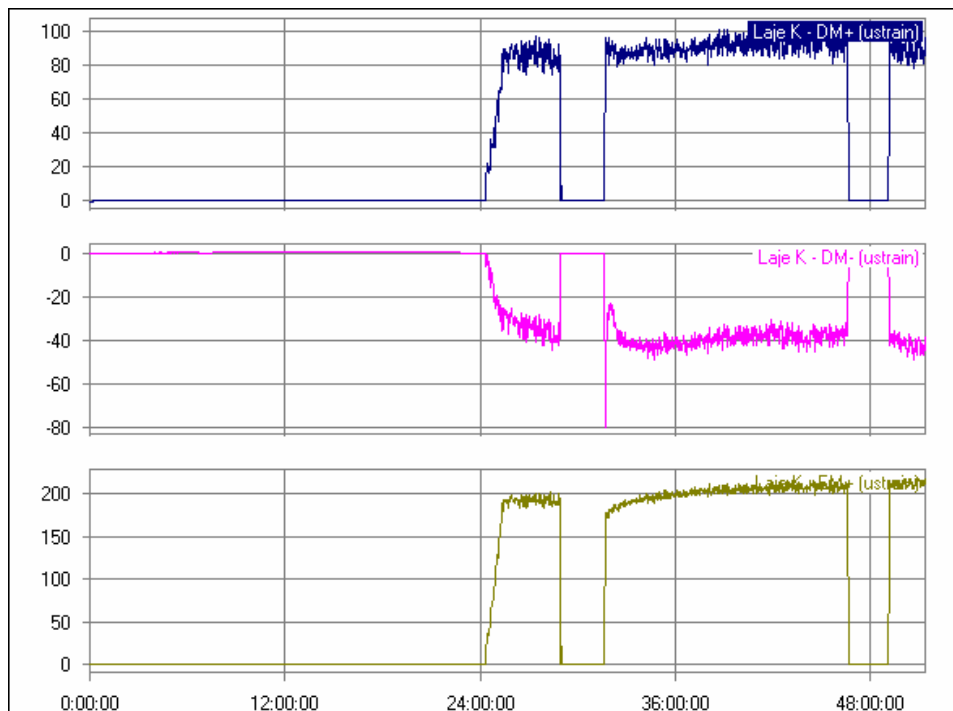


Gráfico 5.15. Deformações específicas nas primeiras 50 horas para laje K contínua (momento positivo-meio do vão)

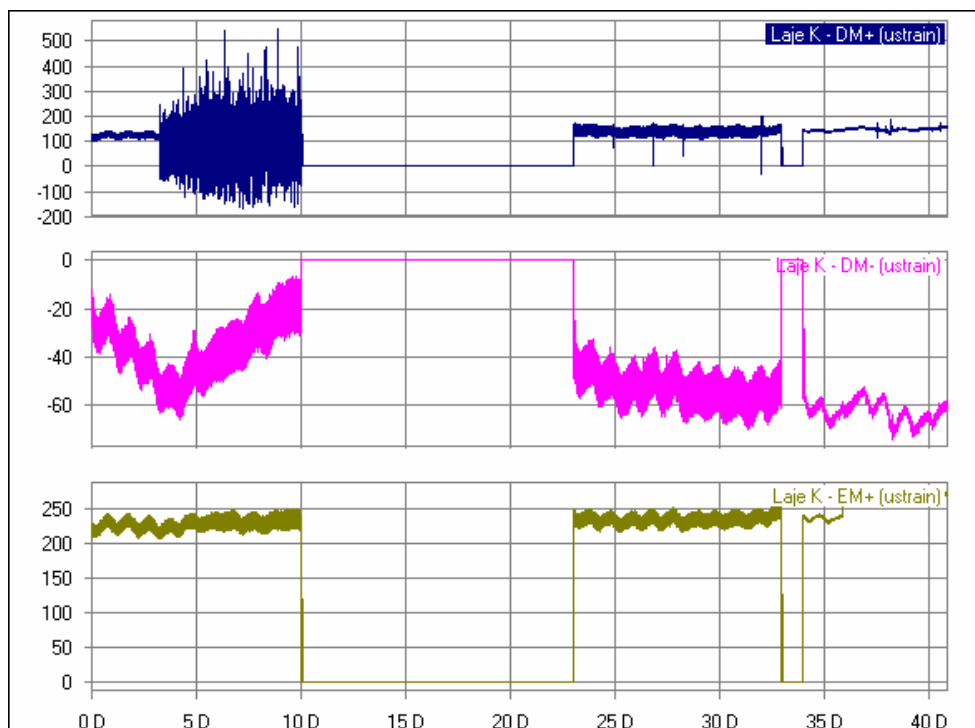


Gráfico 5.16. Deformações específicas de 45 dias para laje K contínua (momento positivo-meio do vão)

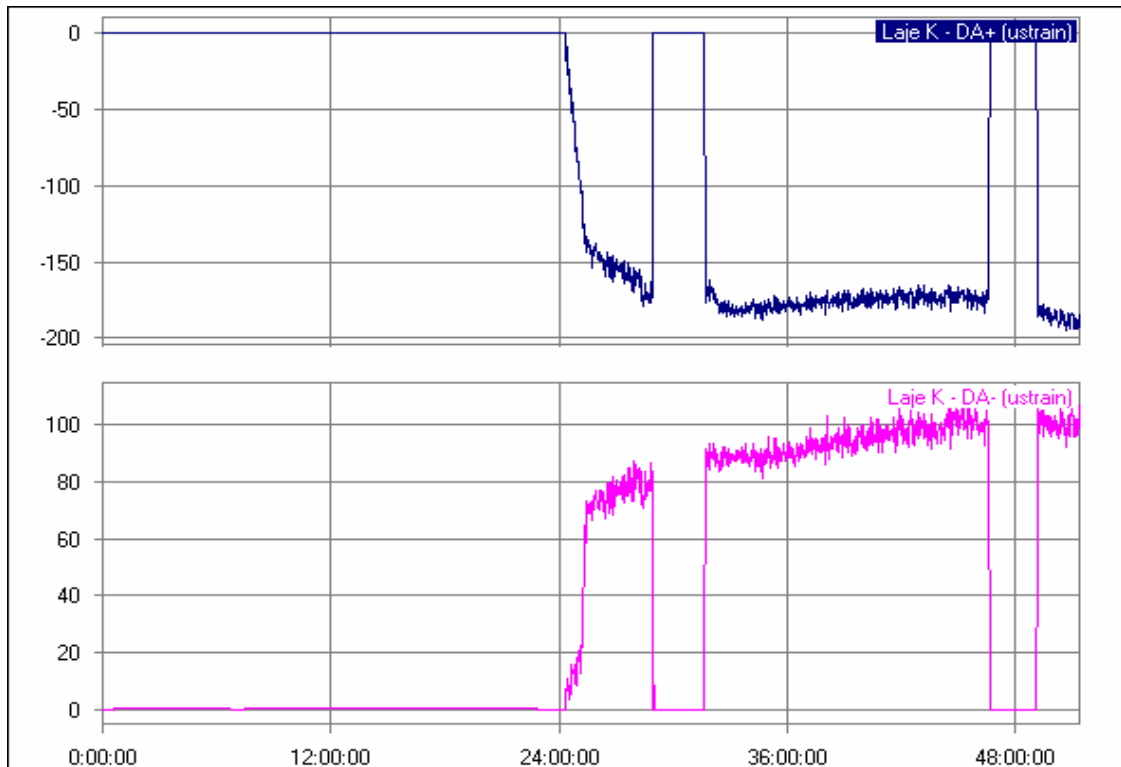


Gráfico 5.17. Deformações específicas nas primeiras 50 horas para laje K contínua (momento negativo-apoio central)

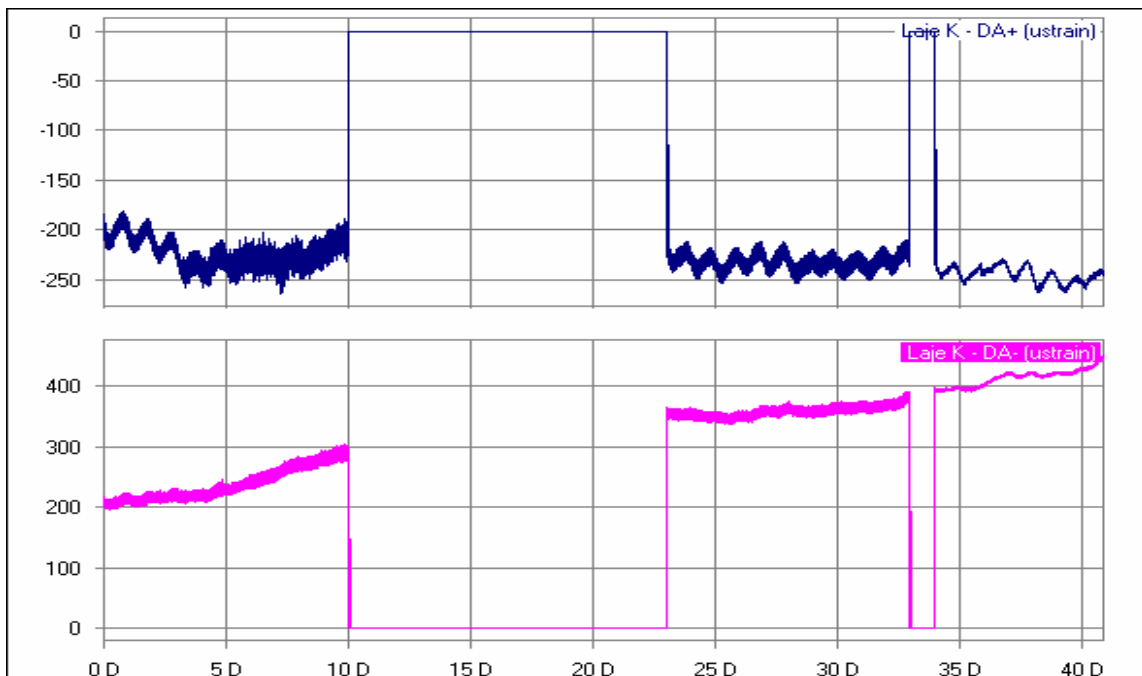


Gráfico 5.18. Deformações específicas de 45 dias para laje K contínua (momento negativo-apoio central)

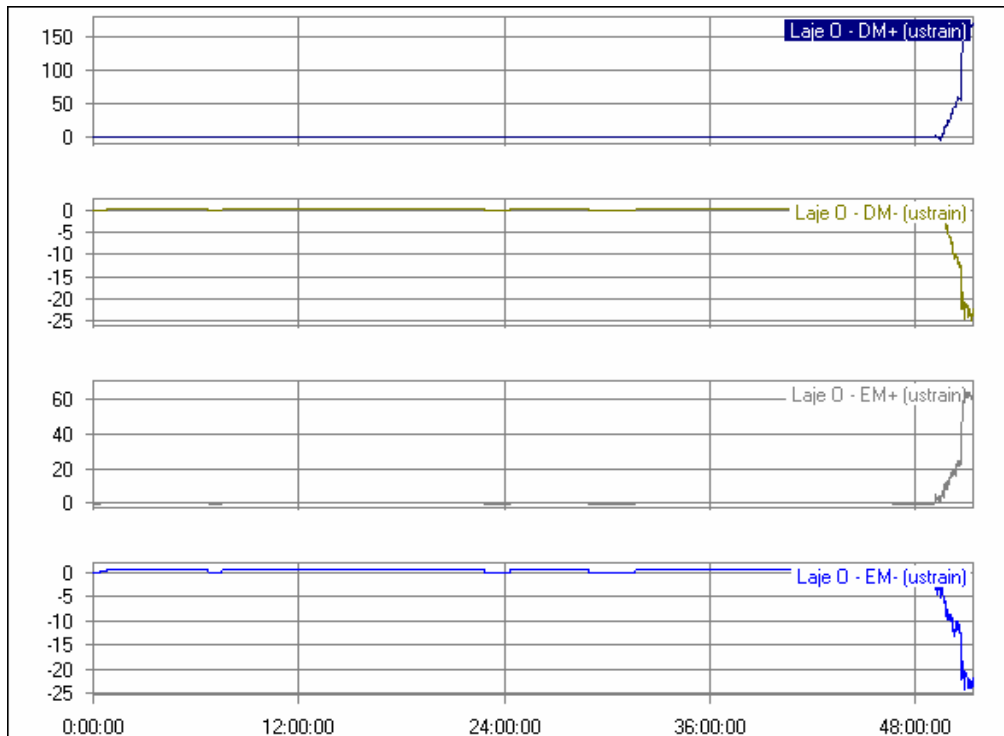


Gráfico 5.19. Deformações específicas nas primeiras 50 horas para laje O contínua (momento positivo-meio do vão)

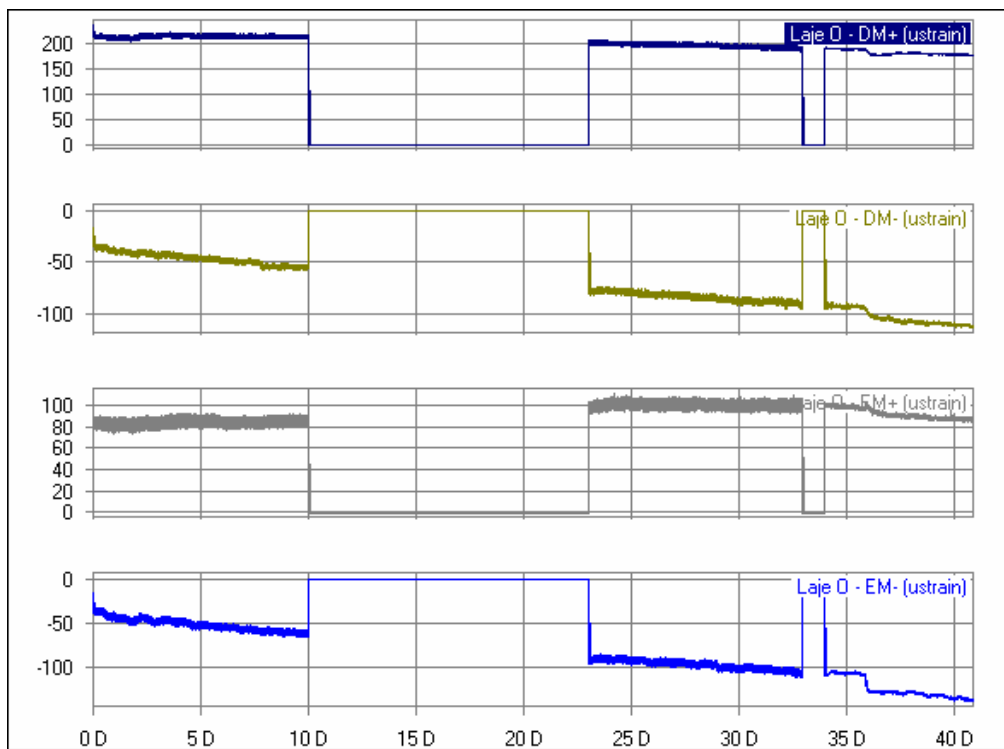


Gráfico 5.20. Deformações específicas de 45 dias para laje O contínua (momento positivo – meio do vão)



Gráfico 5.21. Deformações específicas nas primeiras 50 horas para laje O contínua (momento negativo-apoio central)

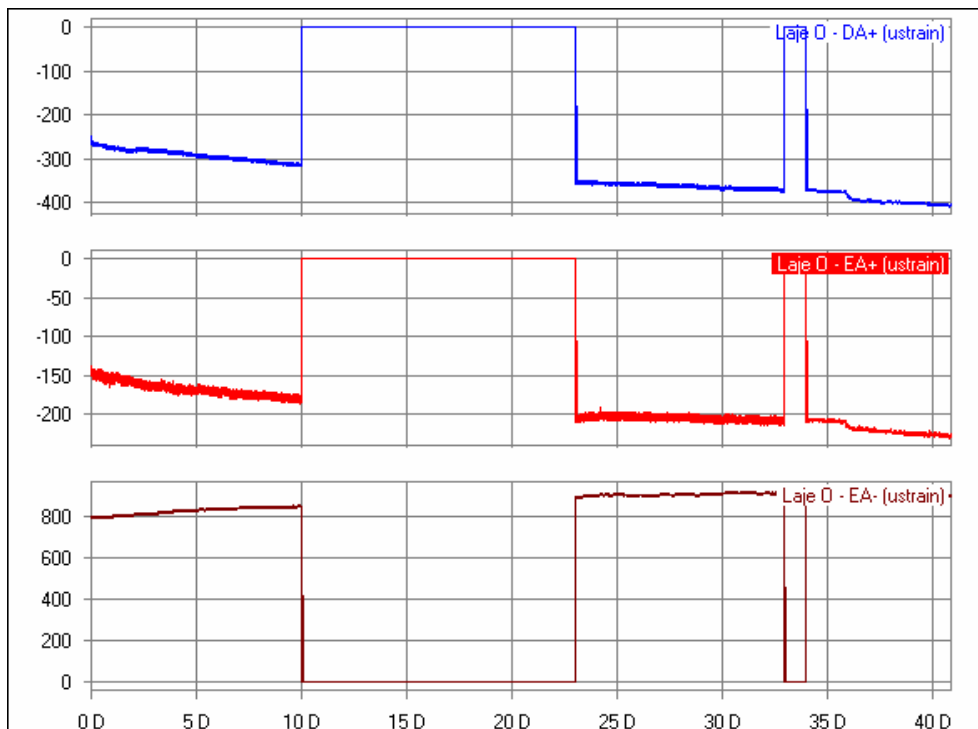


Gráfico 5.22. Deformações específicas de 45 dias para laje O contínua (momento negativo-apoio central)

Nos gráficos 5.13 a 5.22. são mostradas a variação das deformações específicas dos diversos protótipos.

É possível notar que em algumas curvas há muitas “interferências” nas medidas durante um período de tempo, como pode ser visto nos gráficos 5.13 da “Laje I - D-” ou no gráfico 5.16 nos primeiros dez dias da “Laje K – DM+”, principalmente nas armaduras comprimidas. Entretanto, pode-se observar que há grande semelhança entre as curvas da nervura direita e esquerda, tanto para laje isostática I quanto para as lajes hiperestáticas K e O, demonstrando a consistência dos resultados.

A maior variação de deformação (tensão na armadura) pode ser verificada nas primeiras quarenta e oito horas, conforme o gráfico 5.13 da “Laje I - D+”, em que:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{final} - \varepsilon_{inicial} = (640 - 500) \cdot 10^{-6} = 140 \cdot 10^{-6}$$

Entretanto, as variações de deformações (e, portanto de tensões) não são elevadas. No caso da laje I a variação média nas primeiras 48 horas na armadura tracionada foi de 0,2 %, ou seja, de 40 MPa.

Também foi possível notar que nas lajes hiperestáticas K e O, como era esperado, a variação percentual da deformação da armadura na região comprimida é cerca de nove vezes maior que a armadura tracionada hiperestática.

Outro fato interessante ocorre na armadura de compressão da laje biapoiada I (gráfico 5.13) em que se percebe uma variação de tensão desprezível, pois o EE localiza-se próximo a linha neutra onde as tensões são nulas.

5.5.2.6. Resultados e Análises da Variação da Reação de Apoio

Fazendo uma análise utilizando o mesmo artifício que CALAVERA [1988] e MAGALHÃES [2001], procurou-se e com o objetivo de avaliar os esforços atuantes na estrutura de lajes contínuas constituídas por vigotas pré-moldadas de concreto, confeccionou-se em laboratório o protótipo hiperestático K apoiado em alvenaria de tijolo maciço nas extremidades, sendo que no apoio central foi colocado um anel dinamométrico de dez toneladas de capacidade, conforme fotografia 5.13, o qual mediu a variação da reação desde o início do carregamento até o seu término, registrando também as variações posteriores de deformação (após o carregamento).



Fotografia 5.13. Dinamômetro fixado na alvenaria central da laje K – leitura da reação de apoio

Na tabela 5.14., são mostrados os dados coletados durante o período de ensaio, sendo observado que após o término do carregamento houve pouca variação da deformação do anel dinamométrico, sendo esta variação da ordem do centésimo de milímetro, sendo esta a precisão do aparelho.

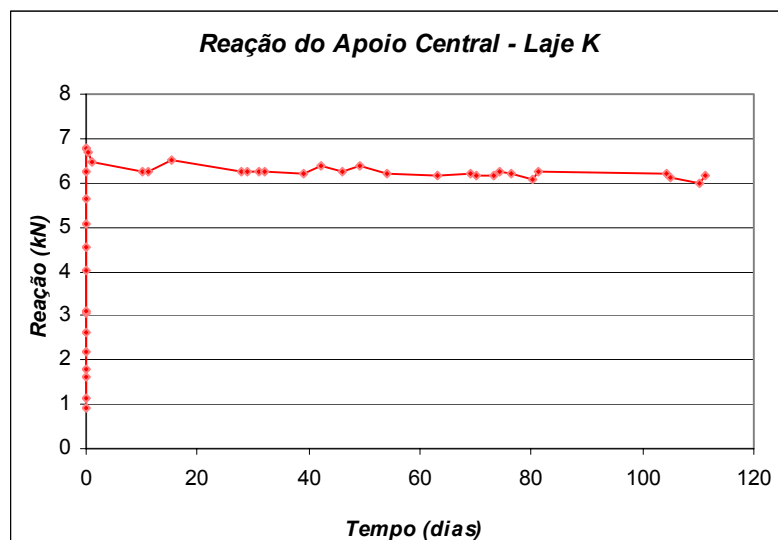
Tabela 5.14. Reação no apoio central da laje K em mm

REAÇÃO NO APOIO CENTRAL - LAJE K (mm)		
DIAS	DESLOC.(mm)	REÇÃO (kN)
0	0,380	0,93
0	0,430	1,12
0	0,540	1,61
0	0,580	1,81
0	0,650	2,21
0	0,720	2,64
0	0,780	3,05
0	0,790	3,12
0	0,910	4,04
0	0,970	4,55
0	1,030	5,09
0	1,090	5,66
0	1,150	6,26
0	1,200	6,79
0	1,200	6,79
0	1,200	6,79
0	1,190	6,68
1	1,170	6,47
10	1,150	6,26
11	1,150	6,26
15	1,175	6,52
28	1,150	6,26
29	1,150	6,26
31	1,150	6,26

Tabela 5.14. Reação no apoio central da laje K em mm (cont.)

REAÇÃO NO APOIO CENTRAL - LAJE K (mm)		
DIAS	DESLOC.(mm)	REÇÃO (kN)
39	1,145	6,21
42	1,160	6,37
46	1,150	6,26
49	1,160	6,37
54	1,145	6,21
63	1,140	6,16
69	1,145	6,21
70	1,140	6,16
73	1,140	6,16
74	1,150	6,26
76	1,146	6,22
80	1,131	6,07
81	1,148	6,24
104	1,145	6,21
105	1,135	6,11
110	1,125	6,01
111	1,140	6,16

O gráfico 5.23 representa a evolução do carregamento sobre a laje em questão. O carregamento foi realizado com quinze fiadas de tijolos maciços de dimensões 10x20x5 cm, sendo que cada leitura de deformação foi realizada após o término de cada fiada. Com os valores medidos no dinamômetro, calculou-se a carga equivalente (reação de apoio).

**Gráfico 5.23. Evolução do carregamento da laje K**

Pode-se notar que houve pouca variação na deformação do anel, ou seja, os esforços internos pouco são influenciados pela acomodação da estrutura quando submetida a carregamento constante, como pode ser visto na no gráfico 5.23.

Também foi calculada a variação percentual entre o máximo e o mínimo valor calculado de força a partir da deformação registrada no anel dinamométrico e foi obtida uma variação máxima de 9,3%, sendo esta considerada pequena, já que está dentro da precisão do aparelho, conforme tabela 5.15.

Tabela 5.15. Variação percentual entre o deslocamento máximo e o mínimo em mm

Deslocamento (mm)	
Máximo	6,79
Mínimo	6,21
Variação (%)	9,3

5.6. Previsão da Flecha Inicial para os Novos Protótipos (I, J, K, L, M, N e O)

Como foi visto na tabela 5.3 do item 5.4., para fazer uma análise mais precisa foram utilizadas as medidas “reais” dos protótipos e calcularam-se suas características geométricas. Também foram utilizados os valores de resistência mecânica do concreto obtido nos ensaios dos corpos-de-prova. Para cálculo foi utilizada uma seção fictícia como pode ser visto na Figura 5.7.

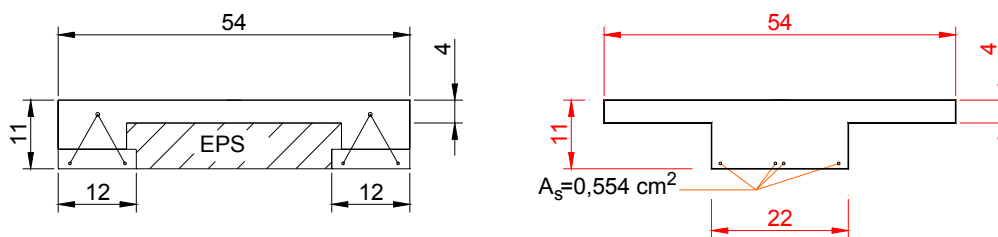


Figura 5.7. Seção transversal real e adotada para cálculo.

Para avaliar a flecha é preciso verificar se os momentos atuantes são maiores que o momento fissuração das seções (no caso da hiperestática têm-se dois momentos). Como será visto, aparentemente, em apenas um protótipo isostático o momento atuante ultrapassou o de fissuração, ainda assim calcularam-se também as características das seções de todos os protótipos no estágio II. O cálculo da flecha foi feito usando as características no estágio I. Lembrar que no caso das lajes hiperestáticas está se calculando o valor do

deslocamento no meio do vão que não é o máximo, mas antevê-se por simplificação a denominação de flecha.

Os valores das características no estágio II são calculados como o indicado em CARVALHO e FIGUEIREDO FILHO [2004]. Os valores das flechas para as lajes isostáticas e hiperestáticas são iguais respectivamente a:

$$a = \frac{5 \cdot p \cdot \ell^4}{384 \cdot E_c \cdot I} \qquad a = \frac{0,00512 \cdot p \cdot \ell^4}{E_c \cdot I}$$

neste caso sendo I a inércia no estágio I. Os valores obtidos para as flechas são apresentados na tabela 5.16.

Tabela 5.16. Valores das características geométricas dos novos protótipos no estágio II flechas instantâneas

Protótipo	x_{II} (cm)	I_{II} (cm ⁴)	I_I (cm ⁴)	$M_{m\acute{a}x}$ (kN/m)	M_r (kN/m)	a (mm)
I	1,155	268,135	$3,71 \cdot 10^{-5}$	2,435	2,621	1,065
J	1,132	267,646	$3,68 \cdot 10^{-5}$	1,487	2,104	0,789
K	1,214	320,53	$3,94 \cdot 10^{-5}$	1,682	2,143	0,920
L	1,132	266,065	$3,6 \cdot 10^{-5}$	2,386	2,618	1,004
M	1,146	267,839	$3,5 \cdot 10^{-5}$	2,667	2,507	1,274
N	1,217	313,774	$3,39 \cdot 10^{-5}$	1,659	2,171	0,730
O	1,212	310,532	$4,15 \cdot 10^{-5}$	1,57	2,516	0,605
P	1,146	261,949	$3,8 \cdot 10^{-5}$	1,946	2,665	0,998

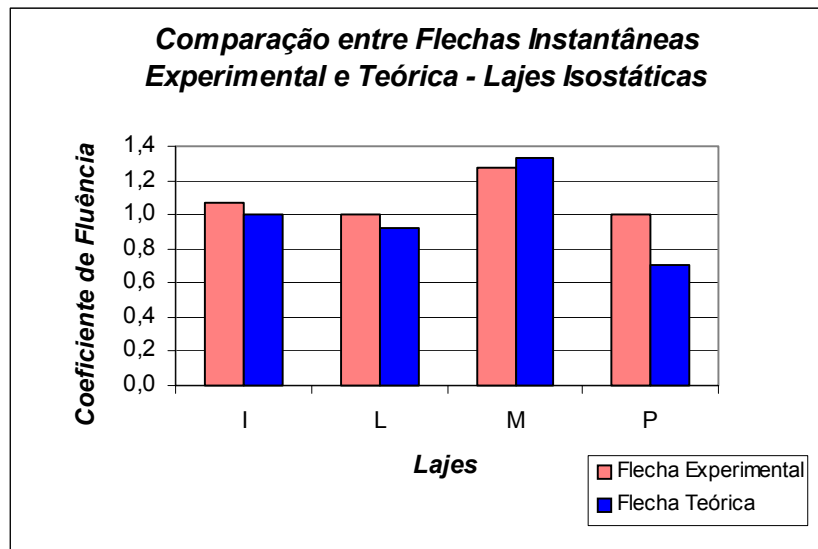


Gráfico 5.24. Flechas Instantâneas (experimental e teórica) das lajes isostáticas

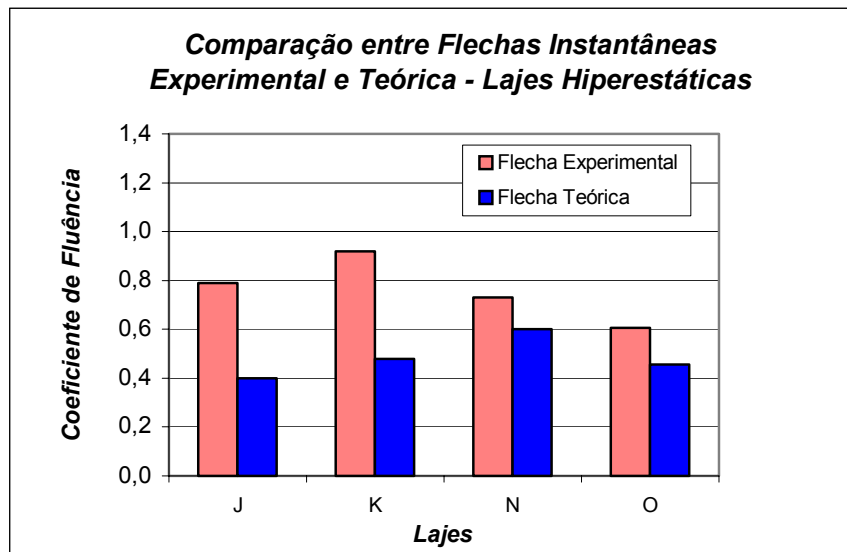


Gráfico 5.25. Flechas Instantâneas (experimental e teórica) das lajes hiperestáticas

Nos gráficos 5.24 e 5.25, é possível comparar os valores das flechas instantâneas experimentais com as teóricas.

Pode-se notar que com exceção da Laje M, a qual se encontra fissurada, os valores das flechas instantâneas experimentais são superiores aos valores teóricos. Entretanto, a diferença é mais significativa para os protótipos hiperestáticos que para os isostáticos. Isso pode ser explicado pelo fato de que as deformações iniciais dos protótipos hiperestáticos são pequenas e difíceis de serem medidas, o que possibilita a ocorrência de erros de leitura.

5.7. Previsão ao Longo do Tempo para os Protótipos de ROGGE [2001] e ROGGE [2002] (A, B, C e D)

Como foi visto no item 2.3.2, para efeito comparativo, foram apresentados os modelos de determinação dos coeficientes de fluência para NBR6118:2003, CEB Model Code 1978 e ACI Committe 209 1982.

Entretanto, os modelos estrangeiros forneceram valores menores de coeficiente de fluência. Exemplo: para laje A, considerando t_0 igual a seis dias e t igual a cem dias obteve-se os resultados da tabela 5.17.

Tabela 5.17. Coeficientes de fluência para NBR6118:2003, CEB Model Code 1978 e ACI Committe 209 1982

Norma	Coef. fluência
NBR6118:2003	2,5
CEB Model Code 1978	2,125
ACI Committe 209 1982	1,38

Neste sentido, optou-se por determinar a previsão dos coeficientes de fluência, tanto para os protótipos de ROGGE [2001] quanto para os protótipos novos, somente para NBR6118:2003.

Além da continuidade das medições dos protótipos de ROGGE [2001], foi possível atualizar as previsões das flechas ao longo do tempo obtidas pela norma NBR6118:2003, assim como obter o coeficiente de fluência com maior precisão. Isso devido a existência uma maior quantidade de dados experimentais coletados, tanto de temperatura quanto de umidade, os quais servem de parâmetro para o cálculo da idade e espessura fictícia da estrutura.

Como este coeficiente de fluência é utilizado para a previsão das flechas ao longo do tempo para os modelos de SAMRA [1999], da NBR6118:1978 e da NBR6118:2003, os resultados apresentados nesta pesquisa e em ROGGE [2002] são distintos.

Neste item são apresentados os cálculos para determinação do coeficiente de fluência para a NBR6118:2003 e a previsão da flecha no infinito para os modelos NBR6118:2003 (peças não fissuradas), NBR6118:2003 (α_f), SAMRA [1997] e NBR6118:1978. Os resultados serão apenas reproduzidos na tabela 5.21 e no gráfico 5.26.

As flechas são calculadas para quatro idades: cem dias, quinhentos dias, mil dias e tempo infinito. Como o processo de cálculo é análogo para todas as lajes em todos os modelos, será apresentado apenas o cálculo para Laje A no tempo infinito.

5.7.1. Modelo da NBR 6118:2003 para Cálculo do Coeficiente de Fluência (ϕ)

O cálculo da flecha ao longo do tempo para peças não fissuradas ou em concreto protendido segundo a norma NBR 6118:2003 pode ser avaliada multiplicando-se a flecha instantânea pelo coeficiente de fluência ϕ do concreto. Desta forma o coeficiente ϕ teria o mesmo significado que o coeficiente CF definido em 5.5.2.2.. Neste caso, a norma não se refere especificamente a nenhum tipo de elemento estrutural específico, enquanto que o valor de CF é obtido para lajes pré-fabricadas de forma experimental. Assim, são comparados estes dois valores verificando se há concordância entre os mesmos.

O coeficiente de fluência depende da idade do concreto no dia do carregamento. Por essa razão, o coeficiente de fluência foi calculado para cada um dos dias de carregamento, já que as lajes não foram carregadas na mesma data.

O primeiro carregamento das lajes ensaiadas foi executado na retirada do escoramento, e o segundo quando foram carregadas com tijolos para simular a combinação quase permanente de ação. Dessa forma, calcula-se um coeficiente de fluência desde a idade da retirada de escoramento até o tempo infinito, e um outro coeficiente de fluência desde a idade do carregamento com tijolos até o tempo infinito. Os coeficientes de fluência para as lajes A, B, C e D estão na tabela 5.21.

A idade de retirada de escoramento e carregamento, assim como as respectivas flechas de cada laje são apresentadas na tabela 5.18 (valores adotados nos cálculos).

Tabela 5.18. Idade de carregamento e flechas das lajes

Lajes	Retirada do Escoramento		Carregamento com Tijolos	
	Idade (dias)	Flecha (mm)	Idade (dias)	Flecha (mm)
Laje A	8	5,125	35	2,853
Laje B	8	5,420	42	3,880
Laje C	28	4,545	42	3,385
Laje D	28	8,200	42	4,768

Laje A:

Pela tabela 5.17, pode ser visto que é necessário calcular quatro coeficientes de fluência, para 8, 28, 35 e 42 dias. Conforme o item 3.6.1, o coeficiente de fluência é calculado por:

$$\varphi_{(\infty, t_0)} = \varphi_a + \varphi_{f\infty} \times [\beta_{f(\infty)} - \beta_{f(t_0)}] + \varphi_{d\infty} \times \beta_d$$

Antes de calcular as parcelas (ou coeficientes de deformação rápida, lenta reversível e irreversível) do coeficiente de fluência, é necessário determinar a idade fictícia para o carregamento e a espessura fictícia da peça de concreto.

Idade fictícia para carregamento (t_0):

É apresentado, a seguir, o cálculo da idade fictícia para carregamento de 8 dias. As idades fictícias correspondentes a outras datas de carregamento estão na tabela 5.18.

A idade fictícia é dada por:

$$t_0 = \alpha \sum_i \frac{T_i + 10}{30} \times \Delta t_{ef,i} S$$

Como o cimento utilizado foi do tipo Portland comum, por isso α é igual a 2. É utilizada a temperatura média de cada dia para o cálculo:

$$t_0 = 2 \times \left(\frac{27 + 10}{30} + \frac{24 + 10 \times 2}{30} + \frac{25 + 10 \times 3}{30} + \frac{29 + 10}{30} + \frac{26 + 10}{30} \right) = 19 \text{ dias}$$

Tabela 5.19. Idade fictícia para carregamento (t_0)

Dias	Idade fictícia (dias)
8	19
28	65,3
35	81,8
42	98,2

Espessura fictícia:

A espessura fictícia é dada por:

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

Considerando a umidade relativa anual de 60%, tem-se:

$$\gamma = 1,25 \cdot [1 + \exp(-7,8 + 0,1 \cdot 61)]$$

$$\gamma = 1,48$$

Onde:

$$A_c = 267,5 \text{ cm}^2$$

$$u_{ar} = 117,67 \text{ cm}$$

Tem-se:

$$h_{fic} = 1,48 \times \frac{2 \times 267,5}{117,67} = 6,72 \text{ cm} = 0,0672 \text{ m}$$

Coefficiente de fluência rápida (φ_a):

O coeficiente de fluência rápida (φ_a) é dado por:

$$\varphi_a = 0,8 \times \left[1 - \frac{f_{c(t_0)}}{f_{c(t_{\infty})}} \right]$$

Onde:

$$\frac{f_{c(t_0)}}{f_{c(t_{\infty})}} = \frac{9 \cdot 19 \cdot (19 + 42)}{(9 \cdot 19 + 40) \cdot (19 + 61)} = 0,618$$

$$\varphi_a = 0,8 \times (1 - 0,618) = 0,306$$

Coefficiente de deformação lenta irreversível ($\varphi_{f\infty}$):

O coeficiente de deformação lenta irreversível ($\varphi_{f\infty}$) é dado por:

$$\varphi_{f\infty} = \varphi_{1c} \times \varphi_{2c}$$

Considerando a umidade média de um ano de sessenta e um por cento:

$$\varphi_{1c} = 1,25 \cdot (4,45 - 0,035 \cdot 61) = 2,894$$

$$\varphi_{2c} = \frac{42 + 5,38}{20 + 5,38} = 1,867$$

$$\varphi_{f\infty} = 2,894 \times 1,867 = 5,400$$

Coefficientes relativos à deformação lenta irreversível ($\beta_{f(\infty)}$ e $\beta_{f(t_0)}$):

Os coeficientes relativos à deformação lenta irreversível no tempo infinito e no tempo ao ser feito o carregamento é dado por ($\beta_{f(\infty)}$ e $\beta_{f(t_0)}$):

$$\beta_f(t) = \frac{t^2 + A \cdot t + B}{t^2 + C \cdot t + D}$$

Assim:

$$A = 42 \cdot 5,38^3 - 350 \cdot 5,38^2 + 588 \cdot 5,38 + 113 = 143,6$$

$$B = 768 \cdot 5,38^3 - 3060 \cdot 5,38^2 + 323 \cdot 5,38 - 23 = 142,2$$

$$C = -200 \cdot 5,38^3 + 13 \cdot 5,38^2 + 1090 \cdot 5,38 + 183 = 241,6$$

$$D = 7579 \cdot 5,38^3 - 31916 \cdot 5,38^2 + 35343 \cdot 5,38 + 1931 = 3740,4$$

$$\beta_{f(8)} = \frac{19^2 + 143,6 \cdot 19 + 142,2}{19^2 + 241,6 \cdot 19 + 3740,4} = 0,372$$

$$\beta_{f(\infty)} = \frac{10000^2 + 143,6 \cdot 10000 + 142,2}{10000^2 + 241,6 \cdot 10000 + 3740,4} = 0,990$$

Coefficiente relativo à deformação lenta reversível (β_d):

O coeficiente relativo a deformação lenta reversível (β_d):

$$\beta_d = \frac{t - t_0 + 20}{t - t_0 + 70}$$

Portanto, a expressão do coeficiente de fluência é:

$$\varphi_{(\infty, t_0)} = \varphi_a + \varphi_{f\infty} \times [\beta_{f(\infty)} - \beta_{f(t_0)}] + \varphi_{d\infty} \times \beta_d$$

$$\varphi_{(\infty, 8)} = 0,306 + 5,400 \times (0,990 - 0,372) + 0,4 \times 1$$

$$\varphi_{(\infty, 8)} = 4,045$$

Tabela 5.20. Coeficiente de fluência para o tempo infinito das laje A, B, C e D segundo a NBR 6118:2003

Laje	Dia do carregamento	Coef. de fluência	Média entre os coef. de fluência
Laje A	8 dias	4,045	3,709
	35 dias	2,566	
Laje B	8 dias	4,045	3,671
	42 dias	2,397	
Laje C	28 dias	2,778	2,691
	42 dias	2,397	
Laje D	28 dias	2,778	2,691
	42 dias	2,397	

Como há datas de carregamento distintas para uma mesma laje, é utilizada uma média ponderada entre os coeficientes de fluência obtidos a partir da data de retirada do escoramento e da data de carregamento com tijolos.

O procedimento de cálculo dessa média ponderada do coeficiente de fluência no tempo infinito para laje A é dado por:

$$\varphi_{\text{médio}} = \frac{(p_1 \times \varphi_1) + (p_2 \times \varphi_2)}{p_1 + p_2}$$

Onde:

φ_{medA} - coeficiente de fluência médio;

p_1 - carregamento devido ao peso próprio (1,7 kN/m²);

p_2 : carregamento devido aos tijolos (0,5 kN/m²);

φ_1 - coeficiente de fluência com t_0 correspondente à retirada do escoramento;

φ_2 - coeficiente de fluência com t_0 correspondente ao carregamento com tijolos.

$$\varphi_{\text{médio}} = \frac{(1,7 \times 4,045) + (0,5 \times 2,566)}{1,7 + 0,5} = 3,709$$

Os coeficientes de fluência para as lajes nas idades em dias de 100, 500, 1000 e tempo infinito, estão na tabela 5.21:

Tabela 5.21. Coeficiente de fluência para as lajes nas idades (dias) de cem, quinhentos, mil e tempo infinito.

Coeficientes de fluência				
Laje	100 dias	500 dias	1000 dias	Infinito
A	2,476	3,451	3,561	3,709
B	2,434	3,411	3,523	3,671
C	1,414	2,402	2,544	2,691
D	1,414	2,402	2,544	2,691

5.7.2. Modelo da NBR 6118:2003 (α_f)

No primeiro modelo da NBR:6118:2003, a flecha final diferida no tempo é definida de forma aproximada como o produto da flecha imediata devido a cargas permanentes $a_{t,0}$ e um fator denominado α_f definido pela equação abaixo:

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1 + 50 \cdot \rho'}$$

Assim tem-se:

$$a_{t,\infty} = a_{t,0} \cdot (1 + \alpha_f)$$

Laje A

Dados:

$$a_{t0}=7,893\text{mm}$$

$$g_1=1,7\text{kN/m}^2$$

$$g_2=0,5\text{kN/m}^2$$

$$A_s' = 0$$

$$b= 43,5\text{cm}$$

$$d= 8,5\text{cm}$$

Data relativa à data de aplicação da carga de longa duração:

$$t_0 = \frac{1,7 \cdot \left(\frac{8}{30}\right) + 0,5 \cdot \left(\frac{35}{30}\right)}{1,7 + 0,5} = 0,471\text{meses}$$

Coefficiente função do tempo:

$$\xi(t_0 = 0,471) = 0,68 \cdot 0,996^{0,471} \cdot 0,471^{0,32} = 0,533 \text{ para } t \leq 70 \text{ meses}$$

$$\xi(\infty) = 2 \text{ para } t \geq 70 \text{ meses}$$

$$\Delta\xi = 2 - 0,533 = 1,466$$

Taxa de armadura:

$$\rho' = 0$$

Dessa forma:

$$\alpha_f = \frac{1,447}{1 + 50 \cdot 0} = 1,447$$

Assim tem-se:

$$a_{t,\infty} = 7,983 \cdot (1 + 1,466) = 19,690\text{mm}$$

5.7.3. Modelo da NBR 6118:2003 (φ) Peças não Fissuradas

Segundo a NBR 6118:2003, este modelo deve ser utilizado somente para peças não fissuradas, ou seja, quando o momento de fissuração for maior que o momento atuante na seção considerada.

Assim, para o cálculo basta conhecer o valor de φ e da flecha imediata (obtida experimentalmente), para que se possa conhecer a flecha final num tempo t qualquer.

$$a_t = a_0 \times (1 + \varphi_{(\infty,t)})$$

Com o valor do coeficiente de fluência e da flecha imediata é possível calcular a flecha no tempo infinito para laje A.

Laje A:

$$a_0 = 7,983 \text{ mm}$$

$$\varphi_{(\infty,t)} = 3,709$$

$$a_{\infty} = a_0 \times (1 + \varphi_{(\infty,t)}) = 7,983 \times (1 + 3,709) = 37,595 \text{ mm}$$

5.7.4. Modelo da NBR 6118:1978 (R_t/R_{t0})

A flecha diferida no tempo segundo a NBR 6118:1978 (R_t/R_{t0}) é dada pela expressão:

$$a(t) = a(t_0) + a(t_0) \cdot \frac{R_t}{R_{t0}}$$

Primeiramente, é necessário calcular as deformações específicas no aço e no concreto, dadas respectivamente por:

$$\sigma_s = \frac{M}{I_m} \cdot (d - x_{II}) \cdot n \quad \varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$$\sigma_c = \frac{M}{I_m} \cdot x_{II} \quad \varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_{cs}}$$

Onde:

σ_s e σ_c – tensão no aço e no concreto, respectivamente;

ε_s e ε_c – deformação no aço e no concreto, respectivamente;

M – momento aplicado;

x_{II} – posição da linha neutra no estágio II;

d - altura útil da peça;

I_m – momento de inércia médio de BRANSON;

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

E_s – módulo de elasticidade do aço (21000MPa);

E_{sc} – módulo de elasticidade do secante do concreto dado por:

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

Laje A:

Dados iniciais:

$$M=1,68\text{KNm}$$

$$d=8,5\text{cm}$$

$$E_{cs}=21020\text{MPa}$$

$$E_s = 21000\text{MPa}$$

$$f_{ck}=19,5\text{MPa}$$

$$n=9,99$$

$$x_{II}=3,09\text{cm}$$

$$I_{II}=2,78 \cdot 10^{-5}$$

$$a_i=5,125+2,853=7,983\text{mm}$$

Dessa forma as deformações específicas no aço e no concreto são, respectivamente:

$$\sigma_s = \frac{1,68}{2,78 \cdot 10^{-5}} \cdot (0,085 - 0,0309) \cdot 9,99 = 32,66\text{MPa}$$

$$\varepsilon_s = \frac{32660,83}{21000000} = 0,156 \text{ ‰}$$

$$\sigma_c = \frac{1,68}{2,78 \cdot 10^{-5}} \cdot 0,0309 = 0,187\text{MPa}$$

$$\varepsilon_c = \frac{1867,40}{21020000} = 0,089 \text{ ‰}$$

As curvaturas no instante t_0 e no tempo infinito são dadas, respectivamente por:

$$R_{t_0} = \frac{|0,089| + 0,156}{8,5} = 0,0287 \qquad R_t = \frac{(1 + 3,709) \cdot |0,089| + 0,156}{8,5} = 0,068$$

Dessa forma a flecha no infinito pela NBR6118:1978 para laje A é dada por:

$$a(\text{inf}) = 7,983 + 7,983 \cdot \frac{0,068}{0,0287} = 26,731\text{mm}$$

5.7.5. Modelo de SAMRA [1997]

Neste subitem é apresentado o modelo que considera informações da variação de tensões, das deformações no concreto e armadura ao longo do tempo, assim como as

curvaturas das vigas. Para exemplificar o modelo, são apresentados os cálculos da flecha no infinito para a Laje A.

Laje A

Dados iniciais:

$$b = 43,5 \text{ cm}$$

$$d = 8,5 \text{ cm}$$

$$h = 11 \text{ cm}$$

$$A_s = 1,04 \text{ cm}^2$$

$$M = 1,68 \text{ KN.m}$$

$$f_{ck} = 19,5 \text{ MPa}$$

$$I_{IIh} = 550,98 \text{ cm}^4$$

$$\varphi_{(\infty,8)} = 4,045$$

$$\varphi_{(\infty,35)} = 2,566$$

$$\varphi_{\text{médio}} = 3,709$$

Antes da fluência:

$$\rho = \frac{A_s}{b \times d} = \frac{1,04}{43,5 \times 8,5} = 2,81 \times 10^{-3}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = 9,99$$

$$k_i = \sqrt{\left[(\rho + \rho')^2 \cdot n^2 + 2 \cdot \left(\rho + \rho' \frac{d'}{d} \right) \cdot n \right]} - (\rho + \rho') \cdot n$$

$$k_i = \sqrt{\left[(2,81 \times 10^{-3})^2 \cdot 9,99^2 + 2 \cdot (2,81 \times 10^{-3}) \cdot 9,99 \right]} - (2,81 \times 10^{-3}) \cdot 9,99 = 0,211$$

$$f_{ci} = \frac{M \cdot k_i \cdot d}{I_{II,h}} = \frac{1,68 \cdot 0,211 \cdot 0,085}{5,50 \times 10^{-6}} = 5,46 \text{ MPa}$$

$$f_{si} = \frac{n \cdot M \cdot (d - k_i \cdot d)}{I_{II,h}} = \frac{9,99 \cdot 1,68 \cdot (0,085 - 0,085 \cdot 0,211)}{5,50 \times 10^{-6}} = 204,4 \text{ MPa}$$

Depois da fluência:

O cálculo do módulo de elasticidade do concreto é calculado como na norma brasileira, considerando-o como secante. Desta forma, tem-se:

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} = 21020 \text{ MPa}$$

$$f_{ct} = 0,6 \cdot f_{ci} = 0,6 \cdot 5,46 = 3,275 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{ct} = \frac{f_{ci}}{E_{cs}} \cdot (1 - 0,8) \cdot \varphi + \frac{f_{ct}}{E_{cs}} \cdot (1 + 0,8 \cdot \varphi)$$

$$\varepsilon_{ct} = \frac{5,46}{21020} \cdot (1 - 0,8) \cdot 3,709 + \frac{3,275}{21020} \cdot (1 + 0,8 \cdot 3,709) = 8,11 \times 10^{-4}$$

O valor do coeficiente de fluência é calculado pela NBR6116:2003, conforme apresentado no subitem 8.1.

$$\beta_1 = 2 \cdot E_s \cdot \frac{\varepsilon_{ct}}{f_{ct}} \cdot (\rho + \rho') = 2 \cdot 2,1 \times 10^5 \cdot \frac{8,11 \times 10^{-4}}{3,275} \cdot (2,81 \times 10^{-3}) = 0,293$$

$$\beta_2 = 2 \cdot E_s \cdot \frac{\varepsilon_{ct}}{f_{ct}} \cdot \left(\rho + \rho' \cdot \frac{d'}{d} \right) = 2 \cdot 2,1 \times 10^5 \cdot \frac{8,11 \times 10^{-4}}{3,275} \cdot (2,81 \times 10^{-3}) = 0,293$$

$$k_t = \frac{-\beta_1 + \sqrt{\beta_1^2 + 4 \cdot \beta_2}}{2} = \frac{-0,293 + \sqrt{(0,293)^2 + 4 \cdot 0,293}}{2} = 0,414$$

$$f_{st} = E_s \cdot \varepsilon_{ct} \cdot \left(\frac{d - k_t \cdot d}{k_t \cdot d} \right) = 2,1 \times 10^5 \cdot 8,11 \times 10^{-4} \cdot \left(\frac{8,5 - 0,414 \cdot 8,5}{0,414 \cdot 8,5} \right) = 241,058 \text{ MPa}$$

$$M_c = A_s' \cdot f_{st}' \cdot (d - d') + \frac{f_{ct}}{2} \cdot b \cdot k_t \cdot d \cdot \left(d - \frac{k_t \cdot d}{3} \right)$$

$$M_c = \frac{3275}{2} \cdot 0,435 \cdot 0,414 \cdot 0,085 \cdot \left(0,085 - \frac{0,414 \cdot 0,085}{3} \right) = 1,837 \text{ KN.m}$$

A iteração continua até que o valor do momento calculado seja igual ao momento aplicado.

$$f_{ct} = (f_{ct})_1 \cdot \frac{M}{M_c} = 3,275 \cdot \frac{1,68}{1,837} = 2,996 \text{ MPa}$$

$$f_{ci} = 4,993 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{ct} = 7,418 \times 10^{-4}$$

$$\beta_1 = \beta_2 = 0,293$$

$$k_t = 0,414$$

$$f_{st} = 220,471 \text{ MPa}$$

$$M_c = 1,68 \text{ KN.m}$$

Desta forma há convergência.

Para calcular os valores das deformações é necessário calcular o valor da inércia média (ou inércia de Branson). Nesta etapa foram utilizados os resultados do programa de MOLINA [1999], para determinação das características da seção geométrica, e o formulário apresentado em CARVALHO et al [2000] para determinação das características da seção homogeneizada no estádio I e II.

Seção geométrica (estádio I sem considerar armadura):

$$A = 267,5 \text{ cm}^2$$

$$y_{cg} = 3,7415 \text{ cm}$$

$$I_I = 2223 \text{ cm}^4$$

Onde A é a área da seção transversal, y_{cg} a posição do centro de gravidade, e I_I o momento de inércia da seção geométrica.

Seção homogeneizada

$$y_{cg,h} = 3,856 \text{ cm}$$

$$I_{I,h} = 2369 \text{ cm}^4$$

$$I_{II,h} = 550 \text{ cm}^4$$

$$M_r = 1,797 \text{ KN.m}$$

Onde $y_{cg,h}$ é a posição do centro de gravidade da seção homogeneizada, $I_{I,h}$ o momento de inércia da seção homogeneizada no estádio I, $I_{II,h}$ o momento de inércia da seção homogeneizada no estádio II, e M_r o momento de fissuração.

Com estes valores é possível calcular o momento de inércia médio:

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_{\max}} \right)^3 \cdot I_{I,h} + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{\max}} \right)^3 \right] \cdot I_{II,h}$$

$$I_m = 2,78 \times 10^{-5} \text{ m}^4$$

Como a flecha inicial é conhecida, pode-se determinar o valor de K e calcular a deformação por fluência.

A deformação por retração, segundo SAMRA [1997], pode ser obtida por:

$$\Delta_{sh} = K_{sh} \cdot \varphi_{sh} \cdot L^2$$

$$\text{Sendo: } \varphi_{sh} = \frac{A_{sh} \cdot \varepsilon_{sh}}{h}$$

Os valores de K_{sh} , A_{sh} , e φ_{sh} estão no item 3.7.1.4

Tem-se então os seguintes valores para a laje A:

$$\Delta_i = 5,125 + 2,853 = 7,983mm$$

$$K = \frac{0,007983 \cdot 2,102 \times 10^7 \cdot 2,78 \times 10^{-5}}{1,68 \cdot 4^2} = 0,173$$

$$\varphi_{cr} = \frac{7,418 \times 10^{-4}}{0,414 \cdot 0,085} = 0,0211$$

$$\Delta_{cr} = 0,0211 \cdot 0,173 \cdot 4^2 = 0,0584m$$

$$\varphi_{sh} = \frac{0,15 \cdot 4 \times 10^{-4}}{0,11} = 5,84 \times 10^{-4}$$

$$\Delta_{sh} = 0,125 \cdot 5,45 \times 10^{-4} \cdot 4^2 = 0,00109m$$

$$\therefore \Delta_{total} = 0,007983 + 0,0584 + 0,00109$$

$$\Delta_{total} = 0,06751m = 67,51mm$$

5.7.6. Comparação entre os Resultados Teóricos e Experimentais

Neste item são apresentados, na tabela 5.21, os resultados dos modelos de cálculo para previsão de flecha, para cem, quinhentos e mil dias, assim como para o tempo infinito, utilizando o coeficiente de fluência para concreto definido pela NBR6118:2003. No gráfico 5.26 estão os valores da flecha para mil dias medida experimentalmente e as flechas teóricas no infinito.

Como foi visto em ROGGE [2001] e ROGGE [2002], os resultados para SAMRA [1997] em tempos intermediários não são satisfatórios. Dessa forma, para a previsão das flechas intermediárias (entre a data de carregamento e o tempo infinito), é utilizado o ábaco de deformação lenta irreversível em função do tempo, conforme a figura 3 da NBR7197:1989. De acordo com este ábaco, para peças de pequena espessura (entre 0,05 e 0,1 m) aos 60 dias já ocorreu, aproximadamente, 56% da deformação total da peça, aos 100 dias 60 %, aos 300 dias 75%, aos 500 dias 85%, aos 1000 dias 91% e assim sucessivamente. Desta forma, para obter o valor da flecha teórica aos 1000 dias, por exemplo, multiplicou-se o valor da flecha teórica no tempo infinito por 0,91. Os resultados estão apresentados na tabela 5.22.

Tabela 5.22: Valores teóricos (NBR6118:2003, SAMRA [1997] e NBR6118:1978) e valores experimentais das flechas ao longo do tempo

Laje	Tempo	Flechas (mm)				
		Experimental 1	NBR6118:2003 3	NBR6118:2003(alf a)	SAMR A	NBR6118:197 8
A	50 dias	20,603	23,331	10,074	33,755	21,546
	100 dias	24,755	27,747	11,598	40,506	23,151
	200 dias	28,245	32,730	13,423	47,257	24,951
	300 dias	29,918	34,546	14,620	51,983	25,623
	500 dias	31,033	35,533	16,217	57,384	25,981
	infinito	.....	37,595	19,690	67,510	26,731
B	50 dias	23,880	26,761	11,565	39,140	24,948
	100 dias	28,365	31,939	13,340	46,968	26,830
	200 dias	32,530	37,665	15,466	54,796	28,927
	300 dias	33,480	39,865	16,861	60,276	29,712
	500 dias	35,030	41,026	18,721	66,538	30,134
	infinito	.....	43,439	22,767	78,280	31,011
C	50 dias	16,633	14,808	8,801	31,425	18,361
	100 dias	21,466	19,141	10,315	37,710	19,936
	200 dias	28,030	23,790	12,128	43,995	21,620
	300 dias	28,700	25,746	13,317	48,395	22,337
	500 dias	29,300	26,975	14,903	53,423	22,783
	infinito	.....	29,273	18,353	62,850	23,619
D	50 dias	19,041	24,216	14,392	51,015	30,025
	100 dias	26,873	31,302	16,868	61,218	32,601
	200 dias	30,005	38,904	19,833	71,421	35,356
	300 dias	31,215	42,103	21,777	78,563	36,528
	500 dias	35,300	44,112	24,371	86,726	37,258
	infinito	.....	47,870	30,013	102,030	38,624

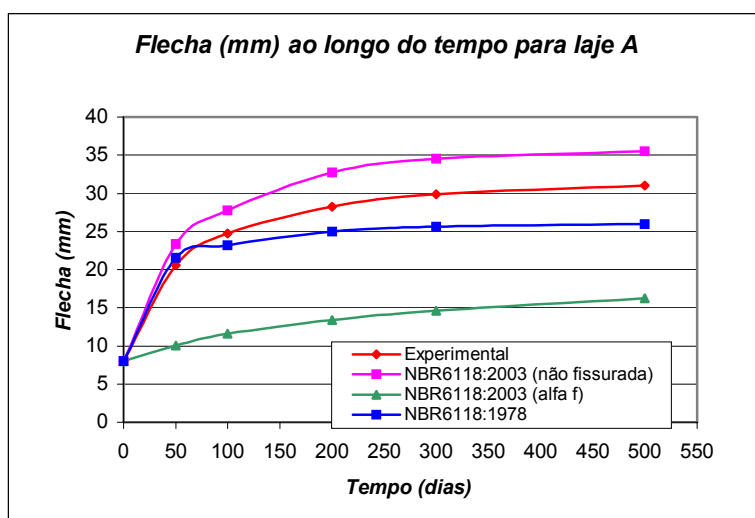


Gráfico 5.26. Flechas teóricas e experimentais (mm) ao longo do tempo para laje A

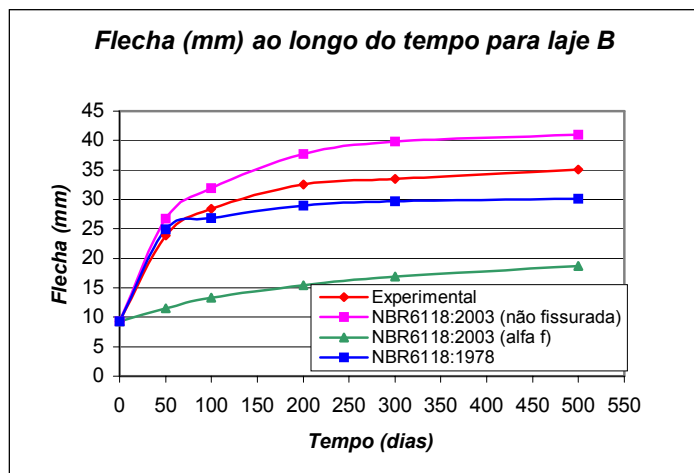


Gráfico 5.27. Flechas teóricas e experimentais (mm) ao longo do tempo para Laje B

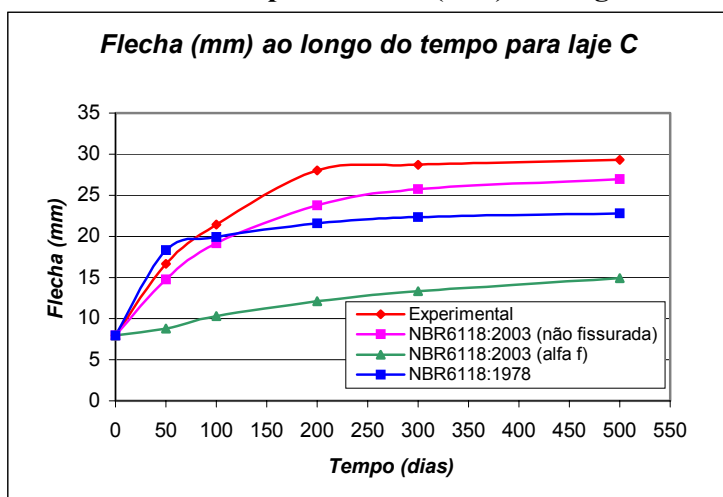


Gráfico 5.28. Flechas teóricas e experimentais (mm) ao longo do tempo para Laje C

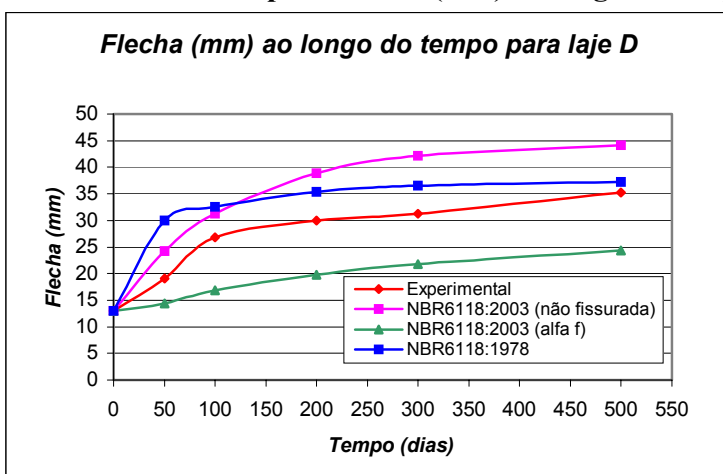


Gráfico 5.29. Flechas teóricas e experimentais (mm) ao longo do tempo para Laje D

Analisando os gráficos 5.26 a 5.29, pode-se verificar que os modelos da NBR6118:1978 e NBR6118:2003 (α_f) subestimam as flechas experimentais das lajes A, B e C com nervuras pré-moldadas, sendo este último modelo menos confiável. Isto pode ser visto comparando o valor da flecha teórica calculada pela NBR6118:2003 (α_f) e a experimental para a Laje C. A flecha teórica chega a subestimar o valor experimental para 500 dias em aproximadamente 50%.

O modelo de SAMRA [1997], embora superestime os valores experimentais, apresenta resultados muito discrepantes, aproximadamente 200% maior que os valores experimentais, fato que demonstra que o método também não se ajusta a lajes pré-moldadas fissuradas.

Para o modelo da NBR6118:2003 (para peças não fissuradas) pode-se notar que o coeficiente de fluência φ é capaz de expressar de forma satisfatória a variação da flecha neste tipo de estrutura, já que os resultados deste modelo tanto superestimam quanto subestimam os valores experimentais, cerca de 15%, em ambos os casos. Este método é o que apresenta maior aderência aos dados experimentais.

Com exceção do modelo da NBR6118:2003 (para peças não fissuradas), os valores calculados são menores dos que os valores experimentais. Uma explicação para isso é que estes modelos de cálculo se ajustam melhor a uma peça que tenha mais armadura. Como foi visto ROGGE [2002], a Laje E por possuir uma taxa de armadura maior, resultou em valores de flechas menores do que nas demais. Conseqüentemente, o valor calculado também é menor, de modo que este protótipo foi o que melhor se ajustou aos modelos teóricos de previsão. De qualquer forma, o projetista deve-se atentar ao se utilizar os procedimentos da NBR6118:2003 (α_f) e NBR6118:1978 para previsão de flechas em lajes nestas condições.

5.8. Previsão ao Longo do Tempo para os Protótipos Novos (I, J, K, L, M, N e O)

Neste item são apresentados os coeficientes de fluência para os novos protótipos segundo a NBR:6118:2003. Não estão apresentados os coeficientes de fluência para CEB Model Code 1978 e ACI Committe 209 1982, devido os modelos destas normas fornecerem valores menores de coeficiente de fluência, conforme item 5.7.

Também estão apresentados os valores teóricos das previsões das flechas ao longo do tempo para os seguintes métodos de cálculo:

Modelo da NBR:6118:2003 (α_f);

Modelo da NBR:6118:2003 (para peças não fissuradas);

Modelo da NBR:6118:1978;

Modelo de SAMRA [1997].

No item 5.8.2 é feita uma comparação entre esses modelos teóricos e os dados experimentais das flechas para algumas datas específicas.

5.8.1. Modelo da NBR 6118:2003 para Cálculo do Coeficiente de Fluência (ϕ)

Assim como foi mostrado no item 5.7, calculou-se o coeficiente de fluência baseado na NBR 6118:2003. Os valores dos coeficientes de fluência calculados e experimentais estão apresentados na tabelas 5.23 e 5.24.

Tabela 5.23. Coeficientes de Fluência segundo NBR 6118:2003 para as lajes novas

Coeficiente de fluência (ϕ) para tempos distintos de carregamento - segundo a NBR 6118:2003					
Laje/Dias	20	40	60	80	100
I	0,572	0,796	0,960	1,081	1,254
J	0,510	0,724	0,920	0,998	1,148
K	0,567	0,822	0,988	1,123	1,306
L	0,675	0,874	0,984	1,148	1,285
M	0,580	0,818	0,992	1,105	1,228
N	0,586	0,828	1,051	1,139	1,274
O	0,585	0,826	1,050	1,138	1,272
P	0,583	0,813	0,999	1,119	1,248

Tabela 5.24. Coeficientes de Fluência Experimental para as lajes novas

Coeficiente de fluência (ϕ) para tempos distintos de carregamento – experimental					
Laje/Dias	20	40	60	80	100
I	2,199	2,350	2,502	2,614	2,679
J	0,617	0,712	0,824	0,866	0,922
K	0,467	0,540	0,608	0,608	0,636
L	1,425	1,621	1,808	1,916	2,005
M	0,652	0,898	1,080	1,142	1,150
N	0,992	1,196	1,331	1,420	1,435
O	0,682	0,859	0,978	1,053	1,068
P	0,620	0,804	0,966	1,087	1,111

No gráfico 5.26. estão os valores teóricos de ϕ e os experimentais de CF para cem dias de carregamento.

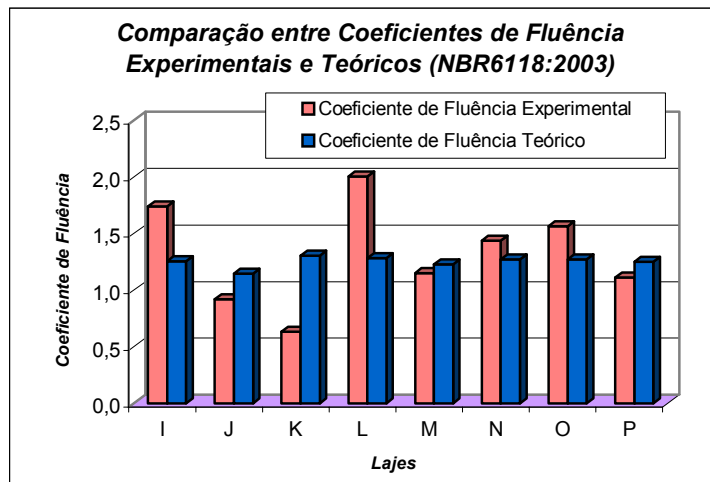


Gráfico 5.30. Comparação entre valores de fluência teóricos e experimentais para cem dias para os protótipos novos

A partir do gráfico 5.30, nota-se que tanto para as lajes isostáticas, quanto para as hiperestáticas, a diferença entre os valores calculados e experimentais do coeficiente de fluência é maior para as lajes fora da câmara, já que estes protótipos se encontram expostos às variações climáticas diárias, o que influencia bastante no comportamento reológico do concreto, principalmente nas primeiras idades.

Para a Laje N pode-se notar que o valor teórico supera o experimental, porém, isto se deve ao fato deste protótipo não ter sido tão bem controlado quanto à cura do concreto.

5.8.2. Comparação entre os Resultados Teóricos e Experimentais de Flecha.

Com o intuito de facilitar a aplicação dos modelos teóricos e comparação destes resultados com os dados experimentais, escolheram-se datas específicas para avaliação das flechas após o carregamento: 20, 40, 60, 80 e 100 dias. Os valores estão na tabela 5.25.

Tabela 5.25. Valores de flecha experimentais e teóricas para várias idades – protótipos I, J, K, L, M, N, O e P

Flecha experimental (mm)						
Laje/Dias	imediate	20	40	60	80	100
I	1,065	3,406	3,568	3,729	3,849	3,918
J	0,789	1,275	1,350	1,438	1,471	1,516
K	0,920	1,349	1,416	1,479	1,479	1,505
L	1,004	2,434	2,632	2,819	2,928	3,017
M	1,274	2,103	2,418	2,649	2,728	2,738
N	0,730	1,455	1,603	1,702	1,767	1,778
O	0,605	1,318	1,424	1,497	1,542	1,551
P	0,998	1,616	1,800	1,961	2,082	2,106
Flecha teórica (mm) segundo a NBR 6118:2003 (α_f)						
Laje/Dias	imediate	20	40	60	80	100
I	0,999	1,071	1,131	1,183	1,229	1,270
J	0,399	0,425	0,448	0,468	0,485	0,501
K	0,478	0,516	0,547	0,574	0,598	0,620
L	0,919	0,986	1,043	1,091	1,134	1,172
M	1,337	1,432	1,512	1,581	1,642	1,697
N	0,600	0,645	0,682	0,714	0,742	0,767
O	0,457	0,491	0,519	0,543	0,565	0,584
P	0,709	0,760	0,803	0,839	0,872	0,901

Modelo de SAMRA[1997]

Fazendo a previsão das flechas ao longo do tempo pelo modelo de SAMRA [1997] para os novos protótipos (I, J, K, L, M, N e O), utilizando o mesmo processo de cálculo do item 5.7, verifica-se que o modelo não se adequou às lajes pré-moldadas utilizadas nesta pesquisa, embora as hipóteses do modelo, após a fluência, estejam de acordo com os resultados teóricos obtidos.

A seguir são apresentadas as cinco hipóteses para depois da fluência do modelo de SAMRA [1997], assim como os resultados numéricos, para a laje isostática I, confirmando a ocorrência destas hipóteses no cálculo iterativo realizado nesta pesquisa:

- 1) O coeficiente relativo a distancia da linha neutra aumenta de 0,136 para 0,187;
- 2) A deformação específica máxima no concreto aumenta;
- 3) A tensão máxima no concreto diminui de 0,744 MPa para 0,446 MPa;
- 4) A tensão de tração na armadura continua, praticamente, a mesma: 37,3 MPa e 32,3 MPa;
- 5) Os deslocamentos (flechas) aumentam significativamente, principalmente depois de alguns anos sob carga.

Entretanto, o procedimento de determinação das flechas pelo modelo de SAMRA [1997] desconsidera no cálculo do momento, a parcela tracionada do concreto para peças não fissuradas. Esta parcela do momento foi calculada e corresponde a aproximadamente cinquenta e cinco por cento (55%) do momento aplicado total. Dessa forma, pode-se notar que no processo de cálculo, antes mesmo da primeira iteração, o momento não converge, como exemplificado a seguir, para a laje isostática I.

Comparação do momento calculado com o momento aplicado para laje I:

Momento calculado pelo modelo de SAMRA [1997]: 0,163kNm

Momento aplicado: 2,435kNm

Como é possível notar o momento calculado é quinze vezes menor que o aplicado, já indicando a não convergência do processo.

Provavelmente, outro motivo pelo qual não houve adequação dos resultados advindos do modelo de SAMRA [1997] para as lajes ensaiadas nesta pesquisa, é o fato dos protótipos não se encontrarem fissurados. Apenas o Protótipo M se encontra fissurado, ou melhor, possui momento de fissuração teórico muito próximo ao momento devido ao carregamento existente.

Neste sentido optou-se por não utilizar o modelo de SAMRA [1997] como base de comparação com os dados experimentais, necessitando de um estudo mais aprofundado, estudo este que não cabe aos objetivos desta pesquisa.

Tabela 5.25. Valores de flecha experimentais e teóricas para várias idades – protótipos I, J, K, L, M, N, O e P (cont).

Flecha teórica (mm) segundo a NBR 6118:1978 (R_t/R_{t0})						
Laje/Dias	imediate	20	40	60	80	100
I	0,999	2,169	2,236	2,285	2,321	2,372
J	0,399	0,862	0,889	0,913	0,923	0,942
K	0,478	1,030	1,063	1,085	1,103	1,127
L	0,919	2,036	2,095	2,127	2,175	2,216
M	1,337	2,916	3,016	3,135	3,088	3,187
N	0,600	1,311	1,357	1,416	1,400	1,442
O	0,457	1,004	1,041	1,089	1,075	1,109
P	0,709	1,542	1,591	1,657	1,631	1,684

Flecha teórica (mm) segundo a NBR 6118:2004 (peças não fissuradas)						
Laje/Dias	imediate	20	40	60	80	100
I	0,999	1,571	1,795	1,958	2,079	2,252
J	0,399	0,602	0,688	0,766	0,797	0,857
K	0,478	0,749	0,871	0,950	1,014	1,102
L	0,919	1,540	1,722	1,823	1,974	2,100
M	1,337	2,113	2,431	2,664	2,815	2,978
N	0,600	0,952	1,097	1,231	1,284	1,364
O	0,457	0,724	0,834	0,936	0,977	1,038
P	0,709	1,122	1,286	1,417	1,502	1,594

Nos gráficos 5.31 a 5.38, estão apresentadas as comparações entre os valores das flechas experimentais com as obtidas dos modelos teóricos em questão.

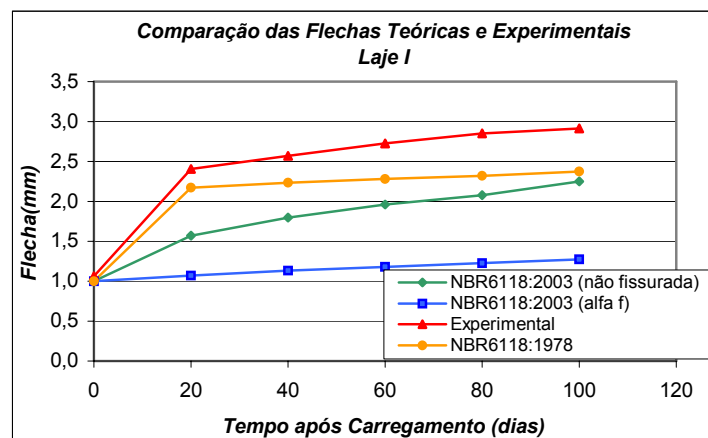


Gráfico 5.31. Evolução das flechas experimentais e teóricas para a Laje I

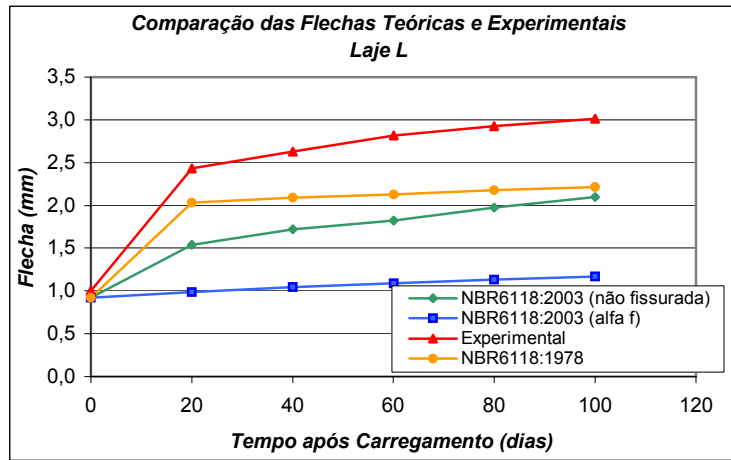


Gráfico 5.32. Evolução das flechas experimentais e teóricas para a Laje L

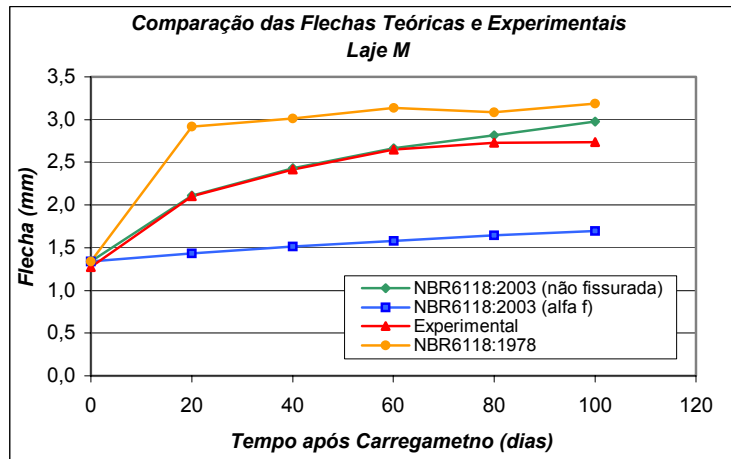


Gráfico 5.33. Evolução das flechas experimentais e teóricas para a Laje M

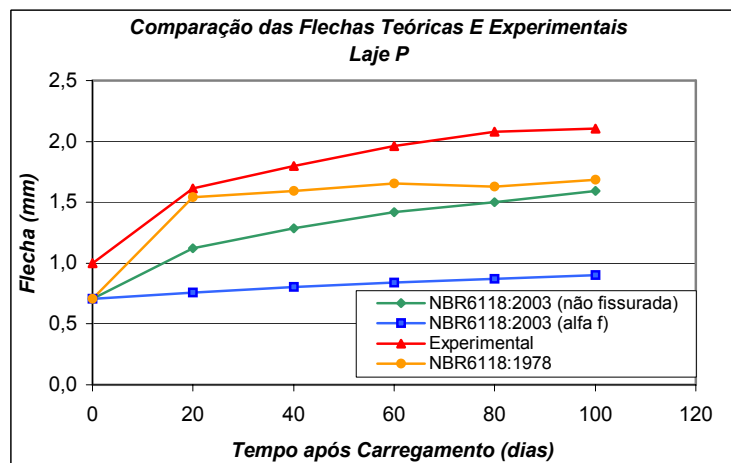


Gráfico 5.34. Evolução das flechas experimentais e teóricas para a Laje P

Analisando os gráficos 5.31 a 5.34 correspondentes aos protótipos isostáticos, verifica-se que, com exceção da Laje M (fissurada), todos os modelos teóricos subestimam o valor da flecha diferida para os cem primeiros dias após o carregamento. O modelo que mais se aproxima da flecha real medida é o da NBR6118:1978, enquanto que o modelo da NBR6118:2003 subestima a flecha experimental em aproximadamente quarenta e três por cento para a Laje I (cem dias após carregamento), podendo ser admitido como um modelo não adequado para as lajes não fissuradas.

Para a Laje M (fissurada), pode-se verificar que o modelo teórico da NBR6118:2003 para peças não fissuradas se ajusta bem aos valores experimentais para os primeiros cem dias após o carregamento. Embora a NBR6118:2003 prescreva o uso deste método de cálculo apenas para peças não fissuradas, verifica-se que para os protótipos não fissurados deste projeto, este modelo não apresentou boa aproximação.

Os gráficos 5.35 a 5.38 a seguir, que se referem aos protótipos hiperestáticos, apresentam, em média, flechas experimentais quase duas vezes menor quando comparadas com as flechas das lajes isostáticas.

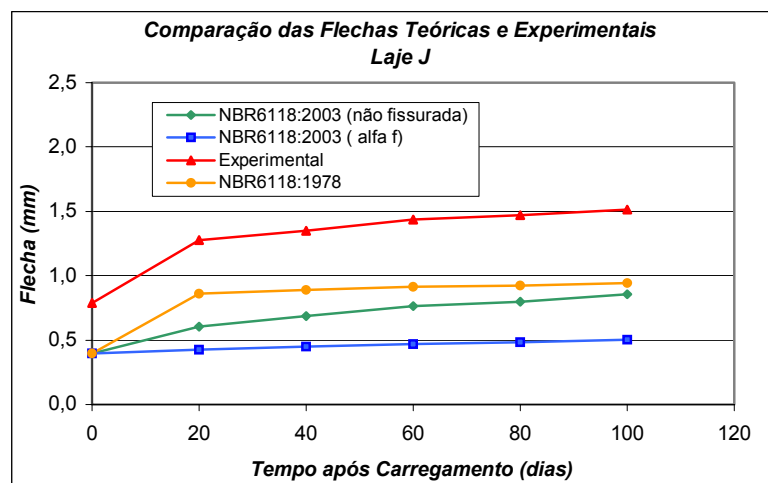


Gráfico 5.35. Evolução das flechas experimentais e teóricas para a Laje J

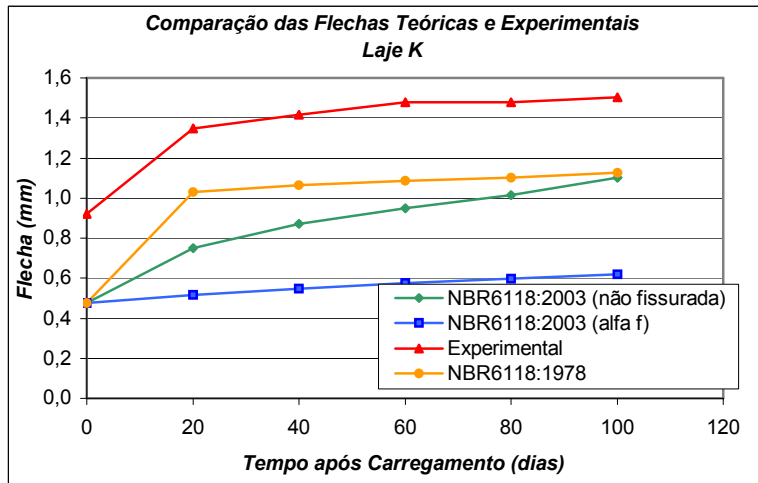


Gráfico 5.36. Evolução das flechas experimentais e teóricas para a Laje K

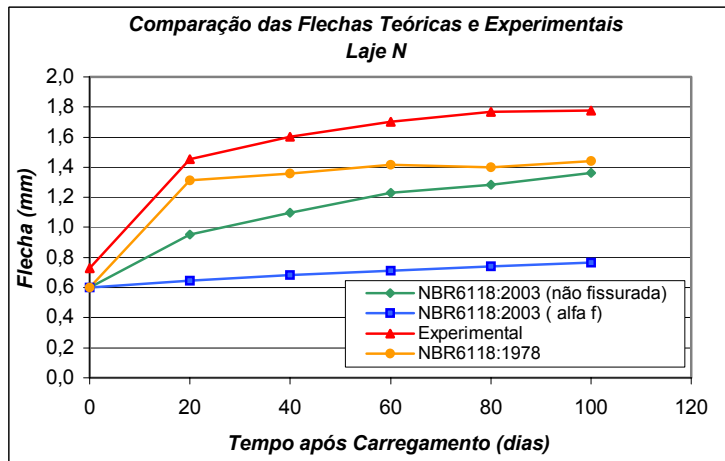


Gráfico 5.37. Evolução das flechas experimentais e teóricas para a Laje N

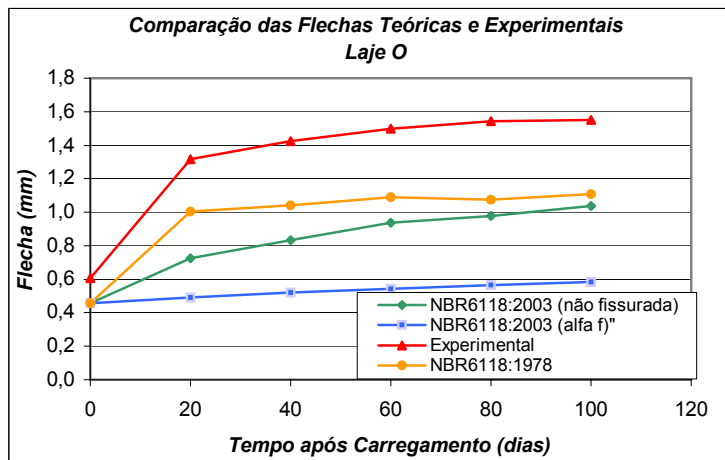


Gráfico 5.38. Evolução das flechas experimentais e teóricas para a Laje O

Analisando os gráficos das lajes hiperestáticas, pode-se notar que os modelos teóricos não conseguem representar de maneira satisfatória as deformações ao longo do tempo deste tipo de estrutura. O modelo que mais se afasta dos valores experimentais apresentados nos referidos gráficos é o da NBR6118:2003 (α_f), subestimando a flecha diferida em aproximadamente quarenta por cento para a Laje K (cem dias após carregamento).

No gráfico 5.39 são apresentados os valores de flecha teórica calculados para o infinito utilizando os três métodos já definidos anteriormente, além dos dados retirados dos ensaios para cem dias após o carregamento.

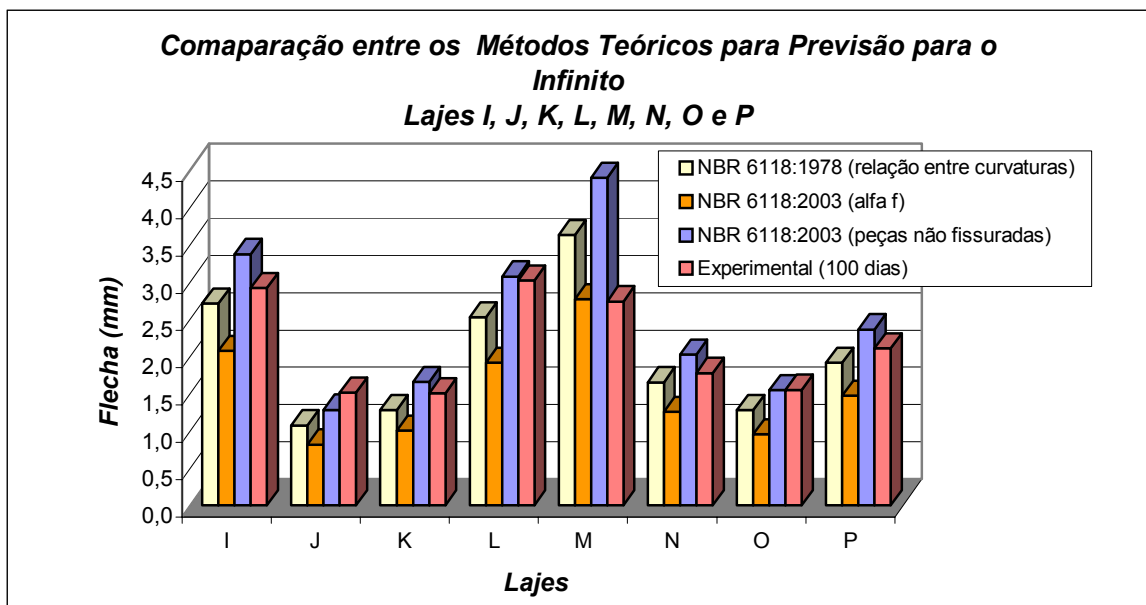


Gráfico 5.39. Flechas no infinito para os três métodos teóricos – comparação com os valores experimentais de 100 dias após o carregamento

Analisando-se o gráfico 5.39, pode-se notar que o modelo definido pela NBR6118:2003 (α_f) não fornece resultados satisfatórios para previsão de flechas, pois os valores calculados para o tempo infinito não alcançam os valores experimentais para cem dias. Na análise dos protótipos de ROGGE [2001] e ROGGE [2002] feita no item 5.6, foi visto que este modelo provavelmente também não será representativo futuramente.

Também é possível observar, tanto nos novos protótipos quanto para as lajes de ROGGE [2001] e ROGGE [2002], que a flecha experimental, com exceção dos protótipos J, M e O, apresenta valores de flecha entre as flechas calculadas pelos modelos da

NBR6118:2003 para peças não fissuradas e NBR6118:1978. O primeiro modelo, em geral, subestima os valores experimentais e o segundo superestima os mesmos.

Para os protótipos hiperestáticos J e O pode-se dizer que, existe grande dificuldade em se obter valores das flecha nos ensaios, já que as deformações que ocorrem nestes protótipos são pequenas. Dessa forma, pode haver uma imprecisão nos valores experimentais capazes de influenciar na análise e comparação com os modelos teóricos.

Para a laje M, única submetida a momento atuante superior ao momento de fissuração, pode-se dizer que seu comportamento difere das demais lajes. Isso ocorre pelo fato dos modelos de cálculo de flechas ao longo do tempo utilizarem valores de flecha inicial que considera a inércia média para efeito da fissuração. Desta forma, a flecha inicial deste protótipo fissurado tende a ser maior que a flecha dos demais com as mesmas características geométricas. Além disso, a relação p/E_{cs} , já discutida no item 5.5.2.1., também é maior para o protótipo fissurado, favorecendo o aumento da flecha imediata.

CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES

6

Capítulo

O primeiro objetivo do projeto foi alcançado na medida que houve um aumento de conhecimento sobre o tema no que se refere a:

- Constatação da variação da flecha ao longo do tempo com curvas próximas as do coeficiente de fluência do concreto;
- Comportamento distinto de peças fissuradas e não fissuradas;
- Comprovação da variação de deformação na armadura tracionada devido ao efeito da fluência;
- Dificuldade de se encontrar um processo teórico que avalie os deslocamentos de maneira adequada;
- Valor de flechas diferidas muito maiores que as iniciais, mostrando a importância da avaliação das mesmas;
- Avaliação da deformação das estruturas ao longo do tempo sob condições climáticas variáveis e constantes;
- Verificação da influência da fluência nos esforços solicitantes de elementos hiperestáticos;
- Determinação de coeficientes de fluência para o elemento estrutural laje pré-fabricada;
- Criação de um banco de dados de flechas experimentais para diversos protótipos que pode ser usado para “calibrar” modelos teóricos de avaliação de flechas já existentes.

As conclusões estão agrupadas em tópicos e descritas nos próximos itens. Alguns gráficos e tabelas do item 5 estão repetidos e renumerados neste item, para melhor compreensão das conclusões.

6.1. Protótipos de ROGGE [2001] e ROGGE [2002] (A, B, C e D)

A primeira conclusão que se pode verificar ao analisar os resultados dos protótipos de ROGGE [2001] e ROGGE [2002] é que realmente o estado de deformação excessiva é condição determinante para dimensionamento das lajes pré-fabricadas estudadas. Os protótipos de ROGGE [2001] e ROGGE [2002] foram dimensionados para suportar o estado limite último de flexão, ou seja, possuem altura da seção transversal e quantidade de armadura longitudinal que garantem o funcionamento da laje com o vão adotado (quatro metros), sem risco de ruptura. Fica claro, pelas deformações existentes após três anos e meio de medições, que a laje submetida às ações relativas a combinação quase permanente apresentam flechas superiores aos valores limites prescritos pela NBR6118:2003. Os valores experimentais medidos são em média iguais a 4,5 cm contra o limite de aceitabilidade sensorial visual de $\ell/250 = 1,60\text{cm}$. Assim, mesmo que se efetuasse uma contra flecha de (valor limite) igual a $\ell/350 = 1,14\text{cm}$, teria-se uma flecha final de $a = 4,50 - 1,14 = 3,36 \geq a_{\text{limite}}$, não obedecendo, portanto, as prescrições da NBR6118:2003.

Fazendo uma comparação entre os coeficientes de fluência aos cem dias dos protótipos de ROGGE [2001] e os novos protótipos, é possível verificar que a média dos coeficientes de fluência das lajes de ROGGE [2001] é aproximadamente 160% que a média do coeficiente de fluência das lajes isostáticas novas. Isto pode ser explicado por dois fatos: o primeiro, e provavelmente mais importante, é que os protótipos de ROGGE [2001] apresentam momentos máximos atuantes bem superiores ao de fissuração e, em segundo lugar, os protótipos de ROGGE [2001] foram carregados para uma idade menor do concreto. No caso de ROGGE [2001] as idades do concreto na data de carregamento estavam entre 8 a 28 dias, enquanto os novos estão em média em 40 dias.

As últimas medições nos protótipos de ROGGE [2001], com idade de três anos e meio, mostram que realmente há uma tendência de estabilização nos valores da flecha. Analisando o gráfico 6.1 percebe-se que no período de 1100 a 1400 dias de idade do concreto (últimos 300 dias de medição) houve um acréscimo médio de 4 mm nas flechas, enquanto no período correspondente de 300 a 600 dias da idade do concreto (intervalo de 300 dias) o acréscimo de deformação correspondente foi de aproximadamente 10 mm.

Para avaliar a flecha no tempo infinito dos protótipos de ROGGE [2001] utilizou-se o software EXCEL [2000]. Por exemplo, traçando uma curva de tendência para os valores das flechas da Laje D, obtém-se a equação: $Y = 7,0222\text{Ln}(X) - 6,2277$ com a variância de

$R^2 = 0,935$ (vide gráfico 6.1). Dessa forma, para o valor de $X= 10.000$ dias, obtém-se $Y= 58,4$ mm. Provavelmente esta flecha corresponde ao valor no tempo infinito nesta laje.

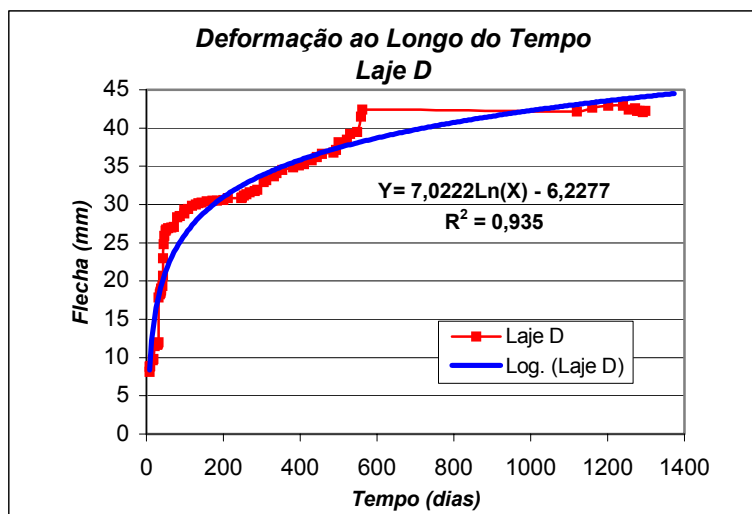


Gráfico 6.1. Flecha no Protótipo D e a curva de tendência.

6.2. Novos Protótipos (I, J, K, L, M, N e O)

Os novos protótipos apresentam duas diferenças básicas em relação aos protótipos de ROGGE [2001]. A primeira é que as novas lajes têm todas as seções (exceto a laje M) trabalhando no estádio I. A segunda é que foram carregadas com idades de concreto maiores que os protótipos de ROGGE [2001]. Assim, como previsto, as flechas decorrentes da fluência para os novos protótipos apresentam valores bem menores que os de ROGGE [2001].

As análises são feitas separadamente para as lajes isostáticas e hiperestáticas nos itens 6.2.1 e 6.2.2.

6.2.1. Protótipos Isostáticos

O primeiro resultado a se comentar seria que considerando-se até a última medição aos cento e vinte dias, a flecha final das lajes isostáticas apresenta um valor máximo de 3,1 mm, sendo o valor limite prescrito pela NBR6118:2003 de $\ell/250 = 8$ mm.

Assim como para os protótipos de ROGGE [2001], utiliza-se o software EXCEL [2000] para traçar uma curva de tendência para os valores das flechas da Laje L, obtendo a equação: $Y = 0,3036\text{Ln}(X) + 1,5216$ com variância de $R^2 = 0,9824$ (vide gráfico 6.2). Para o valor de $X= 10.000$ dias, obtém-se $Y= 4,32$ mm. Provavelmente esta flecha corresponde ao valor no tempo infinito nesta laje.

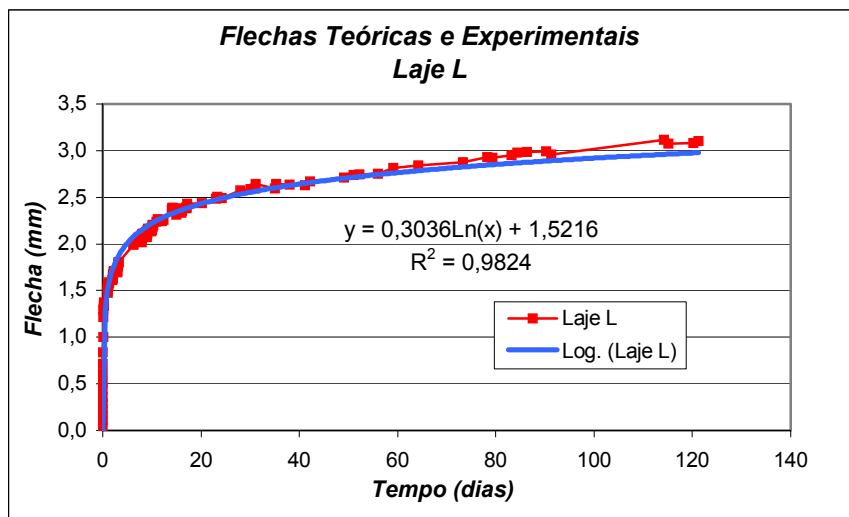


Gráfico 6.2. Flecha ao longo do tempo do protótipo L e a curva de tendência

Comparando o valor limite de aceitabilidade sensorial visual definido pela NBR6118:2003, com o valor calculado a partir da curva de tendência, conclui-se que: $a = 4,32\text{mm} \leq a_{\text{limite}} = 8\text{mm}$. Notar que no caso do ensaio, o carregamento atuante corresponde a uma combinação de $g_1+0,5q$ um pouco superior aos valores de combinação quase permanente usados para a verificação do estado limite de deformação excessiva.

6.2.2. Protótipos Hiperestáticos

Assim como para os protótipos isostáticos, o primeiro resultado a se comentar seria que considerando-se até a última medição aos cento e vinte dias, a flecha final das lajes hiperestáticas apresenta um valor máximo de 1,49 mm, sendo o valor limite prescrito pela NBR6118:2003 de $\ell/250 = 8\text{mm}$.

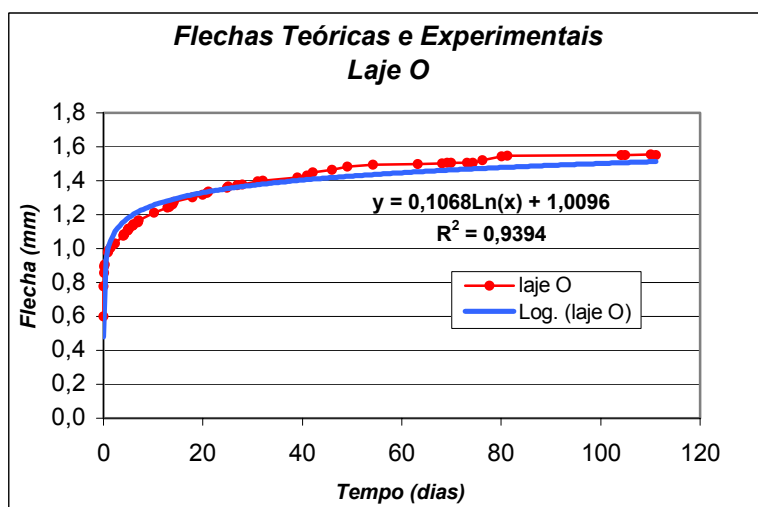


Gráfico 6.3. Flecha no Protótipo O das novas lajes e a curva de tendência

Repetindo o mesmo processo do item 6.2.2, traça-se uma curva de tendência para as flechas da laje O, obtendo a equação: $Y = 0,1068 \ln(X) + 1,0096$ com a variância de $R^2 = 0,9394$ (vide gráfico 6.3). Para o valor de $X = 10.000$ dias, obtém-se $Y = 1,99$ mm. Comparando este valor com o limite de aceitabilidade sensorial visual definido pela NBR6118:2003, conclui-se que: $a = 1,99 \text{ mm} \leq a_{\text{limite}} = 8 \text{ mm}$.

6.2.3. Comparação entre os Sistemas Isostático e Hiperestático

Comparando os protótipos isostáticos com os hiperestáticos, é possível verificar que a continuidade das lajes é um dos fatores que mais tem influência nas deformações. No caso dos protótipos estudados nesta pesquisa, as flechas das lajes isostáticas são superiores aproximadamente 50% que nas lajes hiperestáticas, salvo a laje isostática P que além de estar menos carregada se encontra sob controle de temperatura e umidade.

Os coeficientes de fluência obtidos, conforme demonstram os gráficos 6.4 e 6.5, para as lajes hiperestáticas aparentemente são menores que para lajes isostáticas.

Para as lajes isostáticas verifica-se que os protótipos sob controle de umidade e temperatura (P e M) apresentam coeficientes de fluência menores que as localizadas fora da câmara climatizada (I e L).

As lajes hiperestáticas locadas dentro da câmara (N e O) apresentaram maior coeficiente de fluência, pois o $f_{c,28}$ é cerca de 30% menor que os protótipos fora da câmara, ou seja, a resistência é o fator determinante neste caso.

Em vista dos resultados analisados recomenda-se aos projetistas, sempre que possível, considerarem a continuidade nas lajes pré-fabricadas. Para se ter uma idéia do que isso representa, os protótipos de ROGGE [2001], se fossem hiperestáticos, apresentariam uma flecha no tempo infinito de $a_{\infty} = 5,8/2 = 2,9 \text{ cm}$. Aplicando uma contraflecha de **1,6 cm** (valor máximo) resultaria em uma flecha no tempo infinito de $a_{\infty} = 2,9 - 1,60 = 1,3 \text{ cm} < a_{\text{limite}} = 1,6 \text{ cm}$. Concluindo que laje de espessura de **11 cm** poderia ser usada para um piso de residência atendendo as condições do estado limite último (ELU) e de serviço (ELS).

6.3. Coeficiente de Fluência (CF) de Lajes Pré-fabricadas

Conhecida a flecha inicial, o valor de CF definido no item 5.5.2.2, pode ser usado para calcular a flecha final. Porém, como era de se esperar, há uma grande variabilidade entre os resultados experimentais dos doze protótipos analisados. Isso devido a existência

de muitas variáveis envolvidas. Seria necessário um número maior de amostras (protótipos) para conseguir obter uma curva de tendência confiável. De qualquer maneira, os valores apresentados nos gráficos 6.4 e 6.5, mostram que:

- Os valores de **CF** das lajes isostáticas são maiores que o das hiperestáticas;
- Há uma tendência de menor variabilidade para os **CF** dos protótipos sob condições climáticas controladas;
- As lajes dentro da câmara apresentam **CF** inferiores às lajes com características semelhantes fora da câmara. Isso ocorre quando os valores da relação p/E_{ci} são próximos. Entretanto, quando esta diferença é mais significativa, a situação se inverte, ou seja, **CF** torna-se maior para lajes dentro da câmara.

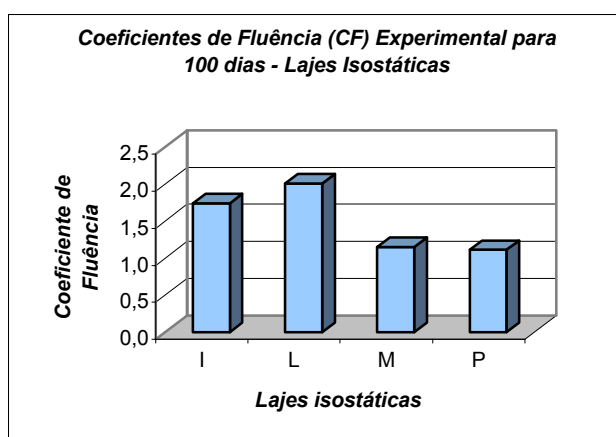


Gráfico 6.4. Coeficiente de Fluência CF das Lajes Isostáticas (I, L, M e P)

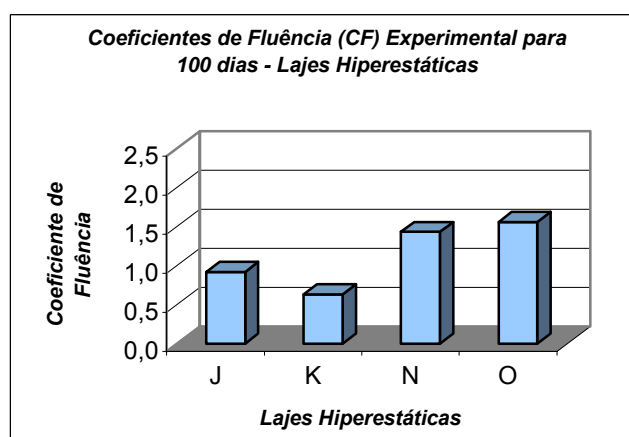


Gráfico 6.5. Coeficiente de Fluência CF das Lajes Hiperestáticas (J, K, N e O)

6.4. Condições Climáticas

Em relação às condições climáticas pode-se assegurar que para as lajes sob condição controlada de temperatura e umidade houve menor variabilidade nas deformações e conseqüentemente no coeficiente de fluência, como já visto no item 6.3.

Ao contrário do que se imaginava, as deformações das hiperestáticas sob condições ambientes controladas (Lajes N e O) apresentaram flechas maiores quando comparadas com os protótipos semelhantes situados fora da câmara (Lajes J e K). Assim, pode-se concluir que a relação entre carga aplicada e módulo de elasticidade (p/E_{ci}) é preponderante sobre os efeitos das variações de temperatura e umidade, no que se refere as deformações ao longo do tempo.

Durante o ensaio de deformação ao longo do tempo pôde-se notar que a flecha apresenta valores negativos durante o período de um dia, indicando que a flecha diminui.

Isso ocorre quando a temperatura ao longo do dia decresce. Este fenômeno já havia sido detectado e explicado por ROGGE [2002]. Porém só com a construção da câmara climatizada foi possível perceber melhor a influência da variação das condições climáticas sobre as deformações, por meio da comparação entre lajes similares sob condições climáticas controladas e não controladas.

Estabilizadas a temperatura em 23 ± 2 °C e umidade a 50 ± 5 %, pode-se notar que as lajes isostáticas (que apresentam praticamente as mesmas características geométricas, carregamento e resistência à compressão aos 28 dias) sob controle de temperatura e umidade tiveram flechas menores e velocidades de deformação menores que as lajes expostas as condições ambientais.

6.5. Precisão na Determinação da Flecha Inicial

Todos os processos de determinação de flecha ao longo do tempo baseiam-se na hipótese que a mesma em um certo tempo t depende do seu valor inicial. Assim, sempre é necessário avaliar a flecha inicial (instantânea) das estruturas para se obter a flecha final. O engenheiro projetista dispõe de poucas informações tais como características geométricas, resistência característica do concreto, quantidade de armadura da peça e expressões empíricas ou experimentais para poder avaliar a flecha instantânea. Mesmo tendo mais informações tais como: valores de resistência à compressão do concreto, resistência à tração do concreto tirados de corpos de prova do concreto utilizado, controle do processo de fabricação do concreto e de cura do concreto há discrepâncias entre os valores medidos e calculados teoricamente das flechas instantâneas, como pode ser visto nos gráficos 6.6 e 6.7.

A partir dos gráficos 6.6 e 6.7, pode-se notar que com exceção da Laje M a qual encontra-se fissurada, que os valores de flecha instantânea experimental são superiores aos valores teóricos. Porém a diferença é mais significativa para os protótipos hiperestáticos. Isso pode ser explicado pelo fato de que as deformações iniciais nos protótipos hiperestáticos serem pequenas (no limite de precisão dos aparelhos empregados).

De uma maneira geral para os novos protótipos as flechas instantâneas calculadas pela NBR:6118/2003 estiveram, na sua grande maioria, sempre a favor da segurança no caso das lajes isostáticas.

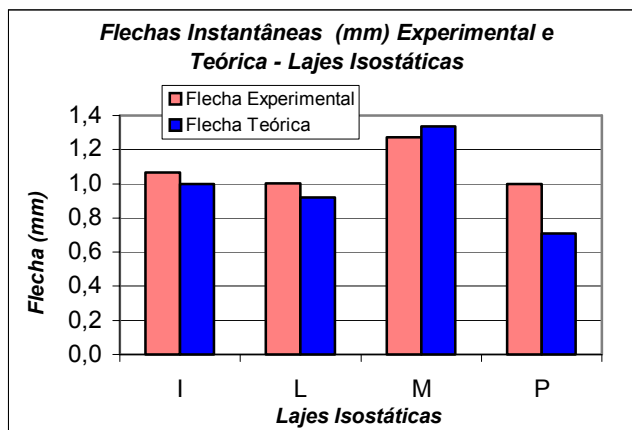


Gráfico 6.6. Flechas Instantâneas (experimental e teórica) das lajes isostáticas (I, L, M e P).

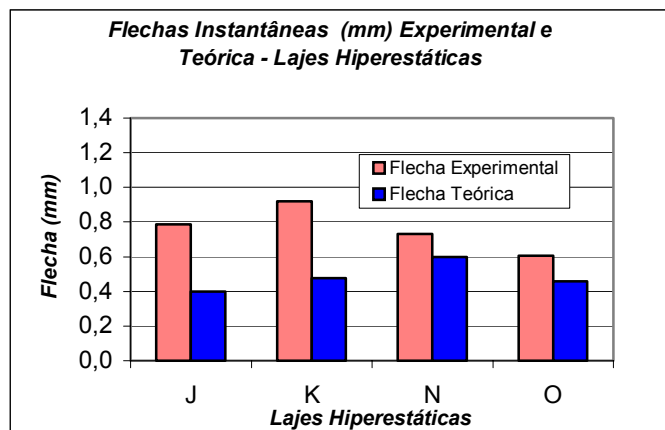


Gráfico 6.7. Flechas Instantâneas (experimental e teórica) das lajes hiperestáticas (J, K, N e O).

No caso dos protótipos de ROGGE [2001], como a concretagem dos protótipos ocorreu no mesmo dia e foram retirados poucos corpos-de-prova, considerou-se um único valor de resistência. Conseqüentemente, há uma única flecha teórica para os Protótipos A até E. Os valores experimentais das flechas instantâneas dos diversos protótipos de ROGGE [2001] estão indicados na tabela 6.1 e nos gráficos 6.8 e 6.9.

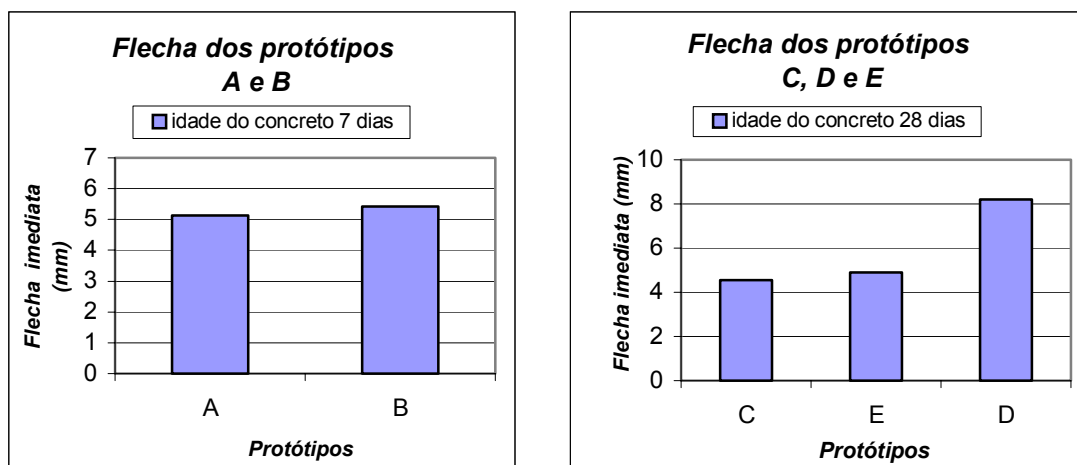
Tabela 6.1. Flecha Imediata dos Protótipos de ROGGE [2001].

Protótipo	A	B	C	D	E
Flecha (mm)	5,13	5,42	4,55	8,20	4,90
Idade do concreto (dias)	8	8	28	28	28
Ordem de concretagem	2	3	1	4	5

Como se pode perceber há uma certa variabilidade no valor da flecha. A laje D apresenta uma flecha muito grande por ter sido necessário aumentar a quantidade de água no concreto a fim de viabilizar a concretagem com adensamento manual. Isso demonstra que a perda de rigidez é muito grande quando se aumenta o fator água-cimento e embora, posteriormente este protótipo tenha apresentado uma “recuperação” na sua deformação.

O protótipo E teve que ser demolido para que o espaço ocupado pelo mesmo fosse usado para outros experimentos.

No gráfico 6.10 estão apresentadas as flechas teóricas e experimentais dos protótipos de ROGGE [2001]. A variabilidade é maior que no caso das novas lajes em virtude do número restrito de informações e também devido às seções dos protótipos estarem fissuradas, o que dificulta ainda mais o cálculo da flecha.



Gráficos 6.8 e 6.9. Flechas imediatas dos protótipos A, B, C, D e E

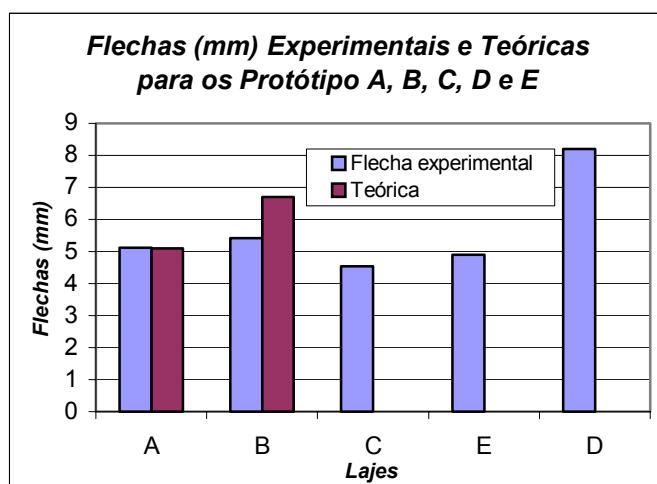


Gráfico 6.10. Flechas experimentais e teóricas dos protótipos de ROGGE [2001]

Resumindo, a determinação com maior precisão da flecha instantânea é mais uma das dificuldades do estudo da deformação de estruturas ao longo do tempo. Conseqüentemente, também há dificuldade na determinação das flechas ao longo do tempo, pois estas são dependentes da flecha instantânea.

6.6. Intensidade do Carregamento

De acordo com o item 5.5.1, percebe-se que a fissuração é fator amplificador da fluência. Sem dúvida a deformação ao longo do tempo é maior para peças fissuradas, como pode ser visto comparando o comportamento das lajes A, B, C e D com as lajes I, L e P.

6.7. Variação de Esforços Solicitantes devido à Fluência

Pela observação dos resultados do item 5.5.2.5, há variação tanto na tensão da armadura tracionada quanto na armadura comprimida, como já propunha SAMRA [1997]. Quanto ao concreto não se pode dizer o mesmo, pois a fluência pura corresponde ao aumento da deformação com o tempo sob carga constante. Assim, o aumento de deformação no concreto não indicaria um aumento na tensão.

Para as peças isostáticas, a mudança do estado de deformação ao longo do tempo não deve interferir nos esforços solicitantes. Entretanto, há uma solicitação pequena da armadura na medida que aumenta sua deformação, restando para o estado limite último um valor menor para armadura se deformar.

6.8. Modelos Numéricos de Avaliação de Flecha

A comparação entre os processos de cálculo da flecha ao longo do tempo está detalhadamente comentada, para os novos protótipos, no item 5.8 deste trabalho.

Neste item, acrescentam-se algumas informações e resumem-se as conclusões do assunto com algumas sugestões.

6.8.1. Modelo de SAMRA [1997]

O processo de SAMRA [1997], apesar de ser bem consistente e fundamentado em equilíbrio mecânico da seção transversal, não apresenta resultados satisfatórios. Usando este procedimento para os protótipos A até E, nota-se que as flechas são superestimadas. Nos trabalhos de ROGGE [2002] e TIRINTAN [2002] tentou-se fazer uma correção do procedimento, multiplicando as flechas no infinito por um percentual que leva em consideração a pequena espessura das lajes pré-fabricadas em cada idade. Mesmo assim, os valores obtidos não são satisfatórios quando comparados com os últimos resultados medidos, os quais indicam que as flechas destes protótipos estão se estabilizando.

Para as lajes novas, em que não há seções fissuradas, o processo simplesmente não se aplica. Isso ocorre, pois, como descrito no item 5.8.2, o momento resistido pelo concreto tracionado (estádio I) não é desprezível como considera SAMRA [1997]. Tentou-se adaptar o modelo para o estágio I, mas não houve sucesso. Assim, a recomendação é que não se pode aplicar o processo de SAMRA [1997] para avaliar flechas ao longo do tempo em lajes pré-fabricadas.

Sugere-se a adaptação deste modelo para futuras pesquisas em lajes pré-moldadas em concreto armado, visto que é um dos poucos modelos que leva em consideração muitas variáveis.

6.8.2. Modelo da NBR:6118:2003 (α_f)

Para os protótipos de ROGGE [2001], o coeficiente α_f introduzido pela NBR6118:2003 mostra-se incapaz de fornecer uma previsão razoável para a flecha no tempo de duzentos dias como pode ser visto pelo gráfico 6.11, que utiliza os resultados experimentais do protótipo A.

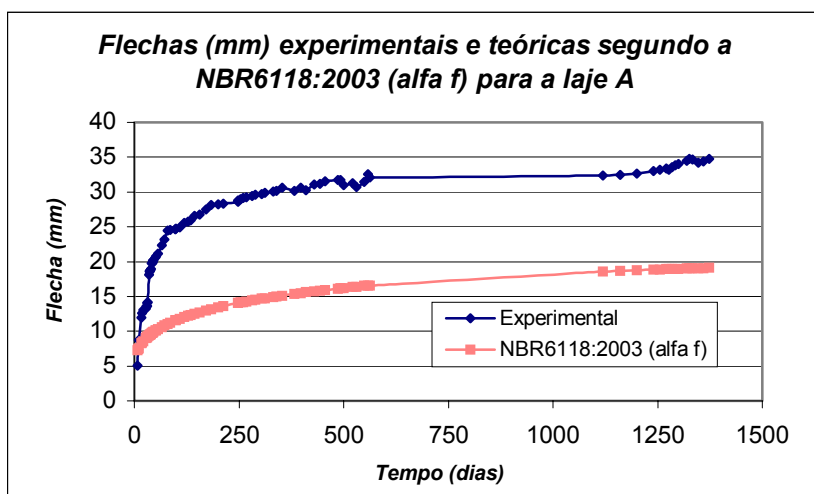


Gráfico 6.11. Evolução das flechas (mm) experimentais e teórica segundo a NBR6118:2003 (α_f) para a Laje A (isostática)

Para as lajes novas, o processo da NBR6118:2003 também não apresenta resultados razoáveis, como pode ser visto no gráfico 6.12 para o protótipo isostático I.

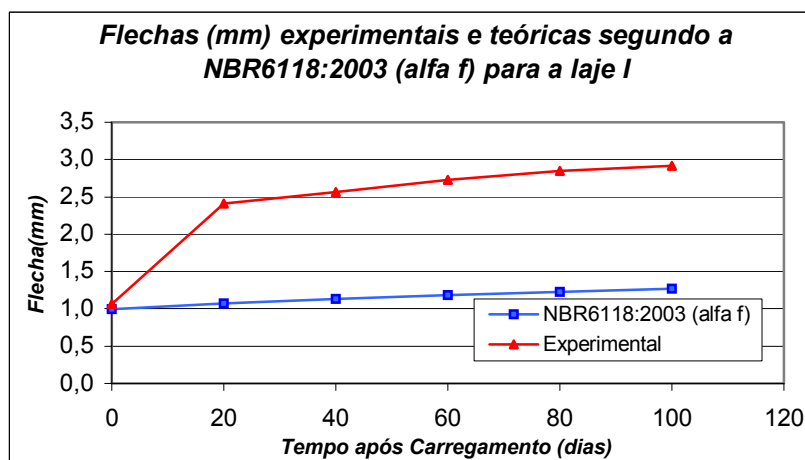


Gráfico 6.12. Evolução das flechas experimentais e teóricas segundo a NBR6118:2003 (α_f) para a Laje I (isostática)

Para os protótipos hiperestáticos, verifica-se o mesmo comportamento do processo α_f , em que os valores das flechas ao longo do tempo não estão a favor da segurança, como pode ser visto no gráfico 6.13.

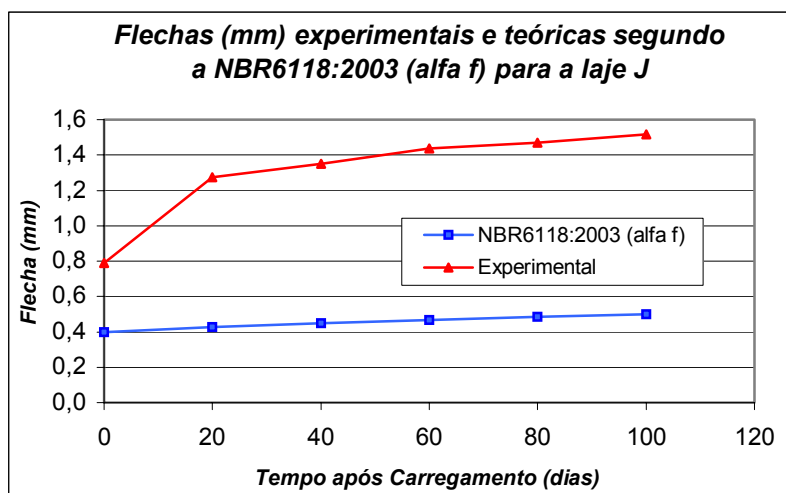


Gráfico 6.13. Evolução das flechas (mm) experimentais e teóricas segundo a NBR6118:2003 (α_f) para a Laje J (hiperestática)

Aparentemente, o uso do coeficiente α_f proposto pela NBR6118:2003 foi um grande retrocesso, pelo menos para as lajes pré-fabricadas deste projeto. Provavelmente, um dos motivos da não conformidade do processo com os dados experimentais, é o fato da NBR6118:2003 levar em consideração apenas o tempo, a flecha inicial e a armadura comprimida, desprezando as condições climáticas, tipo de cimento, etc. Além do número pequeno de variáveis considerado no processo, o valor limite máximo de α_f é menor do que o valor de ϕ estabelecido pela NBR6118:2003, sendo $\alpha_{f,máx}$ igual a 2 e $\phi_{máx}$ (tabela 8.1 da NBR6118:2003[2004]) chegando a 4,4, para peça com 20 cm de espessura fictícia, idade do concreto de 5 dias e umidade relativa de 40%.

6.8.3. Modelo da NBR6118:2003 (ϕ - para peças não fissuradas)

A versão de 2004 da NBR6118:2003, prescreve que, para avaliar as deformações diferidas de peças com armaduras ativas, utiliza-se o procedimento de multiplicar a flecha inicial por $(1 + \phi)$. De acordo com o texto, percebe-se que a idéia é considerar que o concreto, na maior parte das seções da peça, não está fissurado devido à ação da protensão. Assim, procedeu-se o cálculo de valores teóricos da flecha para os protótipos novos com esta expressão, indicado no item 5.8.2.

O gráfico 6.14 apresenta os coeficientes de fluência experimental (CF) da estrutura e o coeficiente de fluência segundo a NBR6118:2003.

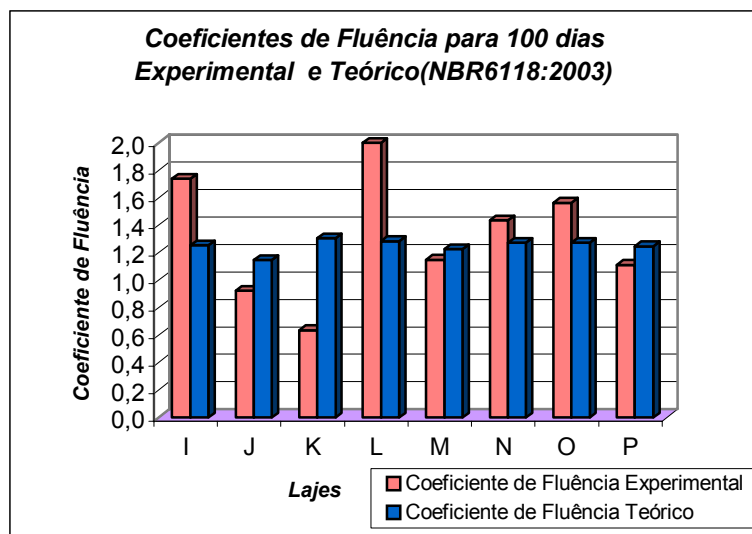


Gráfico 6.14. Coeficientes de fluência teóricos e experimentais para os protótipos novos

Nota-se que no gráfico 6.14 tanto para as lajes isostáticas quanto para as hiperestáticas a diferença entre os valores calculados e experimentais de ϕ é maior para as lajes fora da câmara, já que estes protótipos se encontram expostos às variações climáticas diárias. Essas variações influenciam bastante no comportamento reológico do concreto, principalmente nas primeiras idades. Apenas para a Laje N pode-se notar o valor teórico superou o experimental, porém, sabe-se que isto se deve ao fato deste protótipo não ter sido tão bem controlado quanto à cura do concreto.

Para os protótipos de ROGGE [2001], o processo da NBR6118:2003 utilizando o coeficiente ϕ apresentou os melhores resultados, apresentado flechas previstas por este modelo, na maioria dos casos, a favor da segurança cerca de 15%.

Para os protótipos novos, pode-se notar que este modelo apresenta resultados mais coerentes que o processo α_f . Entretanto, os resultados são inferiores quando comparados com os dados experimentais e o modelo NBR6118:1978, para as lajes não fissuradas. Portanto, o modelo da NBR6118:2003 para peças não fissuradas não se demonstrou satisfatório, entretanto somente para os protótipos não fissurados desta pesquisa. A única laje fissurada M apresenta boa aderência dos resultados das flechas experimentais com os valores teóricos calculados pela NBR6118:2003 para peças não fissuradas, estando a favor da segurança em 8%.

Resumindo, o processo do Coeficiente ϕ apresentou melhores resultados para as peças fissuradas do que as não fissuradas.

6.8.4. Modelo da NBR6118:1978 (Relação entre Curvaturas)

Dos modelos estudados, este parece ser um dos mais interessantes pois, em princípio, permite levar os efeitos das diversas variáveis do fenômeno no concreto a partir do coeficiente ϕ e também considerar a situação em carregamento da peça, ou trecho dela, quando se considera a flecha diferida proporcional a relação entre as curvaturas inicial e em um tempo t .

Para os protótipos de ROGGE [2001], embora o modelo da NBR6118:1978 apresente boa aderência aos dados experimentais, na maioria dos casos, subestima o valor da flecha aproximadamente em 18%. Para os protótipos novos, este modelo apresenta os melhores resultados, embora subestime as flechas das lajes não fissuradas, em aproximadamente 25%. Somente na laje M (única laje fissurada) este método está a favor da segurança.

Os resultados deste processo foram mais satisfatórios para o caso de lajes não fissuradas, embora subestimando um pouco as flechas. A novidade é que a precisão foi aproximadamente a mesma, tanto para as lajes isostáticas quanto para as hiperestáticas.

Ao verificar que há variação na tensão na armadura (vide item 5.5.2.5.) tracionada das lajes ao longo do tempo, pode-se melhorar o processo em questão considerando esta alteração. O cálculo da curvatura num instante t fica então dada por:

$$R(t) = \frac{(1 + \phi) \cdot |\varepsilon_c| + \phi_s \varepsilon_s}{d} \text{ ao invés de: } R(t) = \frac{(1 + \phi) \cdot |\varepsilon_c| + \varepsilon_s}{d}$$

Onde:

ϕ - coeficiente de fluência do concreto;

ϕ_s - coeficiente de “fluência” da armadura - este valor deverá ser obtido experimentalmente das leituras dos protótipos.

O valor da curvatura no tempo zero não sofreria alteração, sendo dada por:

$$R(t_0) = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d}$$

A flecha diferida no tempo é dada segundo a NBR6118:1978 pela expressão:

$$a(t) = a(t_0) + a(t_0) \cdot \frac{R_t}{R_{t_0}}$$

Considerando, porém:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{EI}$$

Que usando o princípio dos trabalhos virtuais:

$$a = \int_0^{\ell} \frac{M \bar{M}}{EI} dx$$

tem-se:

$$a(t) = \int_0^{\ell} \left(\frac{1}{r} \right)_t \cdot \bar{M} dx \approx \sum \left(\frac{1}{r} \right)_{t,i} \cdot \bar{M}_i \cdot \Delta x_i$$

Como sugestão para pesquisa, este procedimento pode ser testado mesmo porque o valor de ϕ ainda depende de uma quantidade maior de dados experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI Committee 209; *Prediction of Creep Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures*; Publication SP-76. Detroit, Michigan 1982, pp.193-300.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; *Cálculo e Execução de Estruturas de Concreto Armado*; Rio de Janeiro; 1978 (NBR 6118/78).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; *Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento*; Rio de Janeiro; 2003 (NBR 6118).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; *Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento*; Rio de Janeiro; 2004 (NBR 6118) – revisão da NBR6118:2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; *Projeto de Estruturas de Concreto Protendido*; Rio de Janeiro; 1984 (NBR 7197/89).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; *Peneiras para Ensaio com Telas de Tecido Metálico*; Rio de Janeiro; 1997 (NBR 5734).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; *Agregado – Determinação da Composição Granulométrica*; Rio de Janeiro; 2003 (NBR 7217).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; *Agregado para Concreto*; Rio de Janeiro; 1983 (NBR 7211).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; *Amostragem de Agregados*; Rio de Janeiro; 2001 (NBR 7216).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; *Agregado em Estado Solto – Determinação da Massa Unitária*; Rio de Janeiro; 1982 (NBR 7251).

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; *Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por meio do frasco de Chapman*; Rio de Janeiro; 2003 (NBR 9776).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; *Agregados – Determinação da Absorção e da Massa Específica de Agregado Graúdo*; Rio de Janeiro; 2003 (NBR 9937).
- BRANSON, D. E.; *Procedures for Computing Deflections*; ACI Journal; New York; Setembro de 1968.
- CALAVERA, J. et al.; *Estudio experimental sobre el comportamiento en servicio y agotamiento por flexion de forjados unidireccionales de hormigón armado*. Madrid, España – Escuela tecnica superior de ingenieros de Caminos – 1988.
- CARVALHO, R. C., *Análise não-linear de pavimentos de edificios de concreto através da analogia de grelha*. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos – USP Janeiro de 1994.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO J.R.; *Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado*. EDUFSCar, São Carlos, 2004, 2ª Edição.
- CEB-FIP; *Model Code for Concrete Structures*. Paris, 1978 (MC-78).
- FLÓRIO, M. C.; *Projeto e Execução de Lajes Pré-Fabricadas Unidirecionais com vigotas em Concreto Armado*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de São Carlos - UFSCar – Dezembro de 2003. São Carlos, SP, Brasil.
- GHALI, A.; FAVRE R.; *CONCRETE STRUCTURES: Stresses and Deformations* – Chapman and Hall Ltd. London, Britain 1986.
- KATAOKA, L. T. MELLO A L. V., ROGGE A., CARVALHO R. C.; FIGUEIREDO FILHO J.R.; *Estudo Experimental da Deformação ao Longo do Tempo de Lajes Contínuas e Simplesmente Apoiadas Executadas com Vigotas Pré-Moldadas*. 46º Ibracon – Congresso Brasileiro de Concreto, 14 a 18 de agosto de 2004. Florianópolis, SC, Brasil.
- MACHADO, C. P. *Tensões, Deformações e Deslocamentos em Estruturas de Concreto Armado e Protendido* Dissertação de Mestrado – EPUSP – São Paulo 1989
- MAGALHÃES, F. L.; *Estudos dos Momentos Fletores Negativos nos Apoios de Lajes Formadas por elementos pré-moldados tipo nervuras com armação treliçada*. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP – São Carlos 2001.
- MESQUITA V. V. *Escolha da altura de lajes pré-moldadas para pavimentos de edificações considerando as verificações do estado limite último e de deformação excessiva*. RELATÓRIO FINAL, PROCESSO 99/00612-7 São Carlos, Dezembro de 1999.

- MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M.; **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. PINI, São Paulo, 1994.
- MOLINA JR. V. E.; **Verificação automática do Estado Limite de Deformação Excessiva de Pavimentos de Concreto Armado Considerando a Fissuração e Fluência do Concreto**. Relatório final de iniciação científica do PIBIC, São Carlos, ago 1999.
- NEVILLE, Adam M.; **Properties of concrete**. Pitman Publishing. London, 1975, 2ª Edição.
- NEWMARK, N. M.; **Numerical Procedure for Computing Deflections, Moments, and Buckling Loads Transactions**, ASCE, V.108, 1943, pp. 1161-1233.
- OJDROVIC R. P., ZARGHAMEE, M. S. **Previsão da fluência e da retração a partir de ensaios de curto prazo** ACI MATERIALS JOURNAL TECHNICAL PAPER, Volume 93, nº2 – Março/Abril 1996.
- PEIXOTO, E. M. O.; **Os Efeitos da Vibração Mecânica e Cura Controlada do Concreto no Comportamento à Flexão de Lajes com Vigotas Pré-Moldadas**. Relatório final de iniciação científica – Processo 01/06803-0, FAPESP, São Carlos, Setembro de 2002.
- PETRUCCI, E. G.; **Concreto de Cimento Portland** Ed.Globo – Porto Alegre – 2ª Ed. 1973.
- ROGGE, A. C.; **Estudo Experimental da Deformação ao Longo do Tempo de Lajes com Nervuras Pré-Moldadas**, Relatório final de iniciação científica – Processo 00/01898-0, FAPESP, São Carlos, Setembro de 2001
- ROGGE, A. C.; **Estudo Experimental da Deformação ao Longo do Tempo de Lajes Contínuas e Simplesmente Apoiadas Executadas com Vigotas Pré-Moldadas** Relatório final de iniciação científica – Processo 00/01898-0, FAPESP, São Carlos, Setembro de 2002.
- SABATINI, F. H.; CEOTTO, L. H., FRANÇA, RICARDO **Palestra – Temas Controversos II – Fluência** Ibracon - 46º Congresso de Concreto do Brasil – Florianópolis, 14 a 18 de Agosto 2004
- SAMPAIO, C. D. C., BITTENCOURT, T. N., FIGUEIREDO, A. R.; **Comparação entre a Modelagem Numérica e Experimental da Deformação por Fluência em Vigas de Concreto Armado**. IBRACON – Volume VI – Projeto de Estruturas de Concreto – Trabalho CBC 0143 – pg. VI 479 a VI 491. 2004.
- SAMRA, R. M.; **Time-Dependent Deflections of Reinforced Concrete Beams Revisited**. Journal of Structural Engineering. Jun 1997.
- SAMRA R.; **Renewed assessment of creep and shrinkage effects in reinforced concrete beams**. ACI-Structural Journal. v 94 n 6 Nov-Dec 1997.

-
- TAKEUTI, A. R.; ***Comportamento Resistente Imediato e ao Longo do Tempo de Pilares Reforçados por meio de Encamisamento com Concreto de Alto desempenho***
Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos – USP. 2003. São Carlos, SP, Brasil.
- TAKEYA, T.; ***Notas de Aula – Análise Experimental de Estruturas***. Apostila – Escola de Engenharia de São Carlos – USP. Abril de 2000, São Carlos – SP, Brasil.
- TIRINTAN, M. A.; ***Estudo da Deformação devida à Fluência do Concreto em Lajes com Nervuras Pré-Moldadas***. Relatório Final de Iniciação Científica – Processo 01/02880-0, FAPESP. Setembro de 2002. São Carlos – SP, Brasil.
- VANDEWALLE, L.; ***Concrete creep and shrinkage at cyclic ambient conditions***
Cement & Concrete Composites, nº22, Janeiro de 2000, p 201-208.

ANEXO A – VALORES EXPERIMENTAIS DAS FLECHAS AO LONGO DO TEMPO DAS LAJES I, J, K, L, M, N E O

Neste anexo são apresentados os valores experimentais das flechas obtidos para as lajes isostáticas (I, L, M e P) e as lajes hiperestáticas (J, K, N e O), nas tabelas AI a AVIII, respectivamente.

Tabela AI. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje isostática I

Laje I							
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas Relativas		Medidas Reais	
				Nervura 1	Nervura 2	Nervura 1	Nervura 2
1	9:51	29/09/04	xxxx	1,565	1,390	xxxx	xxxx
2	10:28		0,026	1,730	1,445	0,165	0,055
3	10:32		0,028	1,980	1,742	0,415	0,352
4	10:36		0,031	2,330	2,085	0,765	0,695
5	10:40		0,034	2,670	2,415	1,105	1,025
6	11:07		0,053	2,888	2,635	1,323	1,245
7	12:10		0,097	3,010	2,765	1,445	1,375
8	12:50		0,124	3,060	2,810	1,495	1,420
9	14:42		0,202	3,130	2,890	1,565	1,500
10	15:44		0,245	3,160	2,915	1,595	1,525
11	16:40		0,284	3,172	2,930	1,607	1,540
12	17:30		0,319	3,185	2,940	1,620	1,550
13	8:50	30/09/04	0,958	3,295	3,030	1,730	1,640
14	10:00		1,006	3,305	3,035	1,740	1,645
15	11:12		1,056	3,340	3,080	1,775	1,690
16	12:15		1,100	3,362	3,109	1,797	1,719
17	14:00		1,173	3,400	3,145	1,835	1,755
18	15:05		1,218	3,420	3,165	1,855	1,775
19	16:05		1,260	3,442	3,172	1,877	1,782
20	17:30		1,319	3,442	3,171	1,877	1,781
21	8:20	01/10/04	1,937	3,440	3,155	1,875	1,765
22	9:20		1,978	xxxx	3,160	xxxx	1,770
23	10:20		2,020	xxxx	3,169	xxxx	1,779
24	11:20		2,062	xxxx	3,179	xxxx	1,789
25	12:26		2,108	xxxx	3,203	xxxx	1,813
26	13:20		2,145	xxxx	3,212	xxxx	1,822
27	14:20		2,187	xxxx	3,232	xxxx	1,842
28	16:20		2,270	xxxx	3,240	xxxx	1,850
29	17:35		2,322	xxxx	3,241	xxxx	1,851
30	9:30	02/10/04	2,985	xxxx	3,281	xxxx	1,891
31	14:37		3,199	xxxx	3,319	xxxx	1,929
32	22:30		3,527	xxxx	3,319	xxxx	1,929
33	10:00	03/10/04	4,006	xxxx	3,314	xxxx	1,924
34	12:30		4,110	xxxx	3,319	xxxx	1,929
35	19:24		4,398	xxxx	3,322	xxxx	1,932
36	12:50	05/10/04	6,124	xxxx	3,438	xxxx	2,048
37	14:10		6,180	xxxx	3,460	xxxx	2,070
38	15:10		6,222	xxxx	3,471	xxxx	2,081
39	16:00		6,256	xxxx	3,480	xxxx	2,090

Tabela AI. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje isostática I (cont.)

Laje I							
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas Relativas		Medidas Reais	
				Nervura 1	Nervura 2	Nervura 1	Nervura 2
40	9:40	06/10/04	6,992	xxxx	3,419	xxxx	2,029
41	11:25		7,065	xxxx	3,440	xxxx	2,050
42	14:30		7,194	xxxx	3,478	xxxx	2,088
43	17:35		7,322	xxxx	3,489	xxxx	2,099
44	10:00	07/10/04	8,006	xxxx	3,430	xxxx	2,040
45	12:10		8,097	xxxx	3,459	xxxx	2,069
46	14:35		8,197	xxxx	3,491	xxxx	2,101
47	10:11	08/10/04	9,014	xxxx	3,470	xxxx	2,080
48	11:30		9,069	xxxx	3,491	xxxx	2,101
49	14:00		9,173	xxxx	3,542	xxxx	2,152
50	10:35	10/10/04	11,031	xxxx	3,590	xxxx	2,200
51	15:38	11/10/04	12,241	xxxx	3,615	xxxx	2,225
52	10:15	14/10/04	15,017	xxxx	3,692	xxxx	2,302
53	17:45		15,329	xxxx	3,727	xxxx	2,337
54	9:55	15/10/04	16,003	xxxx	3,706	xxxx	2,316
55	15:25		16,232	xxxx	3,714	xxxx	2,324
56	10:27	19/10/04	20,025	xxxx	3,797	xxxx	2,407
57	11:00	21/10/04	22,048	xxxx	3,795	xxxx	2,405
58	9:33	22/10/04	22,988	xxxx	3,809	xxxx	2,419
59	14:25		23,190	xxxx	3,860	xxxx	2,470
60	10:20	26/10/04	27,020	xxxx	3,830	xxxx	2,440
61	16:07		27,261	xxxx	3,882	xxxx	2,492
62	11:10	28/10/04	29,055	xxxx	3,841	xxxx	2,451
63	11:00	29/10/04	30,048	xxxx	3,865	xxxx	2,475
64	12:50	01/11/04	33,124	xxxx	3,891	xxxx	2,501
65	13:30	02/11/04	34,152	xxxx	3,919	xxxx	2,529
66	11:30	09/11/04	41,069	xxxx	3,965	xxxx	2,575
67	11:45	11/11/04	43,079	xxxx	3,960	xxxx	2,570
68	16:00	12/11/04	44,256	xxxx	4,030	xxxx	2,640
69	11:30	16/11/04	48,069	xxxx	4,010	xxxx	2,620
70	14:20	19/11/04	51,187	xxxx	4,069	xxxx	2,679
71	16:00	24/11/04	56,256	xxxx	4,112	xxxx	2,722
72	16:30	03/12/04	65,277	xxxx	4,130	xxxx	2,740
73	15:40	08/12/04	70,242	xxxx	4,199	xxxx	2,809
74	16:10	09/12/04	71,263	xxxx	4,185	xxxx	2,795
75	10:10	10/12/04	72,013	xxxx	4,141	xxxx	2,751
76	14:40	13/12/04	75,201	xxxx	4,205	xxxx	2,815
77	18:30	14/12/04	76,360	xxxx	4,255	xxxx	2,865
78	16:45	16/12/04	78,288	xxxx	4,240	xxxx	2,850
79	15:10	20/12/04	82,222	xxxx	4,237	xxxx	2,847
80	17:10	21/12/04	83,305	xxxx	4,209	xxxx	2,819
81	16:40	13/01/05	106,284	xxxx	4,345	xxxx	2,955
82	11:30	14/01/05	107,069	xxxx	4,300	xxxx	2,910
83	15:40	19/01/05	112,242	xxxx	4,295	xxxx	2,905
84	15:55	20/01/05	113,253	xxxx	4,311	xxxx	2,921

Tabela AII. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje isostática L

Laje L					
N^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas Relativas	Medidas Reais
1	10:00	21/09/04	xxxx	2,315	xxxx
2	10:08		0,006	2,362	0,047
3	10:15		0,010	2,422	0,107
4	10:22		0,015	2,481	0,166
5	10:30		0,021	2,539	0,224
6	10:38		0,026	2,602	0,287
7	10:45		0,031	2,672	0,357
8	10:53		0,037	2,751	0,436
9	11:00		0,042	2,831	0,516
10	11:09		0,048	2,925	0,610
11	11:16		0,053	3,030	0,715
12	11:23		0,058	3,155	0,840
13	11:35		0,066	3,319	1,004
14	12:30		0,104	3,528	1,213
15	14:30		0,188	3,615	1,300
16	15:30		0,229	3,645	1,330
17	16:30		0,271	3,672	1,357
18	17:20		0,306	3,685	1,370
19	9:30	22/09/04	0,979	3,789	1,474
20	10:30		1,021	3,812	1,497
21	11:30		1,063	3,840	1,525
22	12:30		1,104	3,855	1,540
23	13:40		1,153	3,870	1,555
24	14:40		1,194	3,884	1,569
25	15:40		1,236	3,891	1,576
26	16:40		1,278	3,900	1,585
27	17:30		1,313	3,900	1,585
28	9:40	23/09/04	1,986	3,925	1,610
29	10:30		2,021	3,940	1,625
30	11:40		2,069	3,966	1,651
31	12:30		2,104	3,989	1,674
32	15:50		2,243	4,020	1,705
33	16:50		2,285	4,027	1,712
34	8:55	24/09/04	2,955	4,010	1,695
35	9:55		2,997	4,032	1,717
36	11:40		3,069	4,075	1,760
37	14:07		3,172	4,101	1,786
38	15:10		3,215	4,114	1,799

Tabela AII. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje isostática L (cont.)

Laje L					
N^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas Relativas	Medidas Reais
39	16:00	27/09/04	3,250	4,120	1,805
40	15:50		6,243	4,307	1,992
41	17:09		6,298	4,310	1,995
42	14:50	28/09/04	7,201	4,365	2,050
43	15:50		7,243	4,379	2,064
44	16:50		7,285	4,379	2,064
45	8:20	29/09/04	7,931	4,332	2,017
46	10:00		8,000	4,369	2,054
47	11:07		8,047	4,400	2,085
48	12:10		8,090	4,415	2,100
49	12:51		8,119	4,419	2,104
50	14:45		8,198	4,422	2,107
51	15:44		8,239	4,420	2,105
52	16:40		8,278	4,419	2,104
53	17:30		8,313	4,410	2,095
54	10:00		30/09/04	9,000	4,390	2,075
55	11:12	9,050		4,410	2,095
56	12:15	9,094		4,432	2,117
57	14:00	9,167		4,460	2,145
58	15:05	9,212		4,470	2,155
59	16:05	9,253		4,474	2,159
60	17:30	9,313	4,474	2,159	
61	8:20	01/10/04	9,931	4,450	2,135
62	9:20		9,972	4,462	2,147
63	10:20		10,014	4,464	2,149
64	11:20		10,056	4,481	2,166
65	12:26		10,101	4,500	2,185
66	13:20		10,139	4,507	2,192
67	14:20		10,181	4,515	2,200
68	16:20		10,264	4,520	2,205
69	9:30	02/10/04	10,979	4,549	2,234
70	14:37		11,192	4,577	2,262
71	22:30		11,521	4,565	2,250
72	10:00	03/10/04	12,000	4,561	2,246
73	12:30		12,104	4,569	2,254
74	19:24		12,392	4,570	2,255
75	12:50	05/10/04	14,118	4,674	2,359
76	14:10		14,174	4,690	2,375
77	15:10		14,215	4,695	2,380
78	16:00		14,250	4,700	2,385
79	9:40	06/10/04	14,986	4,631	2,316
80	11:25		15,059	4,650	2,335
81	14:30		15,188	4,681	2,366
82	17:35		15,316	4,685	2,370
83	10:00	07/10/04	16,000	4,645	2,330
84	12:10		16,090	4,671	2,356
85	14:35		16,191	4,695	2,380

Tabela AII. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje isostática L (cont.)

Laje L					
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas Relativas	Medidas Reais
86	10:11	08/10/04	17,008	4,694	2,379
87	11:30		17,063	4,713	2,398
88	14:00		17,167	4,743	2,428
89	15:38	11/10/04	20,235	4,750	2,435
90	10:15	14/10/04	23,010	4,799	2,484
91	17:45		23,323	4,821	2,506
92	9:55	15/10/04	23,997	4,807	2,492
93	15:25		24,226	4,808	2,493
94	10:27	19/10/04	28,019	4,889	2,574
95	11:00	21/10/04	30,042	4,901	2,586
96	9:33	22/10/04	30,981	4,910	2,595
97	14:25		31,184	4,957	2,642
98	10:20	26/10/04	35,014	4,910	2,595
99	16:07		35,255	4,955	2,640
100	11:10	29/10/04	38,049	4,950	2,635
101	12:50	01/11/04	41,118	4,945	2,630
102	13:30	02/11/04	42,146	4,985	2,670
103	11:30	09/11/04	49,063	5,025	2,710
104	11:45	11/11/04	51,073	5,050	2,735
105	16:00	12/11/04	52,250	5,060	2,745
106	11:30	16/11/04	56,063	5,070	2,755
107	14:20	19/11/04	59,181	5,130	2,815
108	16:00	24/11/04	64,250	5,155	2,840
109	16:30	03/12/04	73,271	5,190	2,875
110	15:40	08/12/04	78,236	5,245	2,930
111	16:10	09/12/04	79,257	5,238	2,923
112	14:40	13/12/04	83,194	5,265	2,950
113	18:30	14/12/04	84,354	5,290	2,975
114	16:45	16/12/04	86,281	5,303	2,988
115	15:10	20/12/04	90,215	5,310	2,995
116	17:10	21/12/04	91,299	5,272	2,957
117	16:40	13/01/05	114,278	5,430	3,115
118	11:30	14/01/05	115,063	5,390	3,075
119	15:40	19/01/05	120,236	5,395	3,080
120	15:55	20/01/05	121,247	5,420	3,105

Tabela AIII. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje isostática M

Laje M								
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas Relativas		Medidas Reais		
				Nervura 1	Nervura 2	Nervura 1	Nervura 2	
1	10:50	24/09/04	Xxxx	2,722	2,700	xxxx	xxxx	
2	11:05		0,010	2,701	xxxx	-0,021	xxxx	
3	11:22		0,022	2,660	xxxx	-0,062	xxxx	
4	11:32		0,029	2,772	3,160	0,050	0,460	
5	11:50		0,042	3,145	3,551	0,423	0,851	
6	12:04		0,051	3,849	4,120	1,127	1,420	
7	14:05		0,135	3,965	4,230	1,243	1,530	
8	15:10		0,181	3,990	4,258	1,268	1,558	
9	16:00		0,215	4,010	4,270	1,288	1,570	
10	15:50		27/09/04	3,208	4,350	4,605	1,628	1,905
11	17:09	3,263		4,380	4,615	1,658	1,915	
12	14:50	28/09/04	4,167	4,440	4,660	1,718	1,960	
13	15:50		4,208	4,440	4,660	1,718	1,960	
14	16:50		4,250	4,440	4,660	1,718	1,960	
15	8:20	29/09/04	4,896	4,443	4,665	1,721	1,965	
16	10:00		4,965	4,448	4,665	1,726	1,965	
17	11:07		5,012	4,450	4,670	1,728	1,970	
18	12:10		5,056	4,459	4,680	1,737	1,980	
19	12:25		5,066	4,459	4,680	1,737	1,980	
20	14:45		5,163	4,460	4,680	1,738	1,980	
21	15:44		5,204	4,460	4,680	1,738	1,980	
22	16:40		5,243	4,460	4,681	1,738	1,981	
23	17:30		5,278	4,460	4,680	1,738	1,980	
24	8:50		30/09/04	5,917	4,480	4,700	1,758	2,000
25	10:00	5,965		4,480	4,700	1,758	2,000	
26	11:12	6,015		4,480	4,700	1,758	2,000	
27	12:15	6,059		4,480	4,700	1,758	2,000	
28	14:00	6,132		4,480	4,700	1,758	2,000	
29	15:05	6,177		4,481	4,700	1,759	2,000	
30	16:05	6,219		4,481	4,700	1,759	2,000	
31	17:30	6,278		4,481	4,700	1,759	2,000	
32	8:20	01/10/04		6,896	4,499	4,710	1,777	2,010
33	9:20			6,938	4,502	xxxx	1,780	xxxx
34	10:20		6,979	4,505	xxxx	1,783	xxxx	
35	11:20		7,021	4,498	xxxx	1,776	xxxx	
36	12:26		7,067	4,499	xxxx	1,777	xxxx	
37	13:20		7,104	4,502	xxxx	1,780	xxxx	
38	14:20		7,146	4,502	xxxx	1,780	xxxx	
39	16:20		7,229	4,504	xxxx	1,782	xxxx	
40	17:35	7,281	4,504	xxxx	1,782	xxxx		
41	9:30	02/10/04	7,944	4,519	xxxx	1,797	xxxx	
42	14:37		8,158	4,528	xxxx	1,806	xxxx	
43	22:30		8,486	4,532	xxxx	1,810	xxxx	
44	10:00	03/10/04	8,965	4,550	xxxx	1,828	xxxx	
45	12:30		9,069	4,553	xxxx	1,831	xxxx	
46	19:24		9,357	4,560	xxxx	1,838	xxxx	

Tabela AIII. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje isostática M
(cont.)

Laje M							
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas Relativas		Medidas Reais	
				Nervura 1	Nervura 2	Nervura 1	Nervura 2
47	12:50	05/10/04	11,083	4,610	Xxxx	1,888	xxxx
48	14:10		11,139	4,611	Xxxx	1,889	xxxx
49	15:10		11,181	4,612	Xxxx	1,890	xxxx
50	16:00		11,215	4,612	Xxxx	1,890	xxxx
51	9:40	06/10/04	11,951	4,621	Xxxx	1,899	xxxx
52	11:25		12,024	4,625	Xxxx	1,903	xxxx
53	14:30		12,153	4,629	Xxxx	1,907	xxxx
54	15:35		12,198	4,630	Xxxx	1,908	xxxx
55	10:00	07/10/04	12,965	4,647	Xxxx	1,925	xxxx
56	12:10		13,056	4,651	Xxxx	1,929	xxxx
57	14:35		13,156	4,651	Xxxx	1,929	xxxx
58	10:11		13,973	4,670	Xxxx	1,948	xxxx
59	11:30	08/10/04	14,028	4,671	Xxxx	1,949	xxxx
60	14:00		14,132	4,676	xxxx	1,954	xxxx
61	15:38	11/10/04	17,200	4,770	xxxx	2,048	xxxx
62	10:15	14/10/04	19,976	4,825	xxxx	2,103	xxxx
63	17:45		20,288	4,830	xxxx	2,108	xxxx
64	9:55	15/10/04	20,962	4,853	xxxx	2,131	xxxx
65	15:25		21,191	4,856	xxxx	2,134	xxxx
66	10:27	19/10/04	24,984	4,856	xxxx	2,134	xxxx
67	11:00	21/10/04	27,007	4,969	xxxx	2,247	xxxx
68	9:33	22/10/04	27,947	4,990	xxxx	2,268	xxxx
69	14:25		28,149	4,994	xxxx	2,272	xxxx
70	10:20		26/10/04	31,979	5,060	xxxx	2,338	xxxx
71	16:07	32,220		5,070	xxxx	2,348	xxxx
72	11:10	28/10/04	34,014	5,095	xxxx	2,373	xxxx
73	11:00	29/10/04	35,007	5,104	xxxx	2,382	xxxx
74	12:50	01/11/04	38,083	5,123	xxxx	2,401	xxxx
75	13:30	02/11/04	39,111	5,132	xxxx	2,410	xxxx
76	11:30	09/11/04	46,028	5,192	xxxx	2,470	xxxx
77	11:45	11/11/04	48,038	5,210	xxxx	2,488	xxxx
78	16:00	12/11/04	49,215	5,275	xxxx	2,553	xxxx
79	11:30	16/11/04	53,028	5,305	xxxx	2,583	xxxx
80	14:20	19/11/04	56,146	5,340	xxxx	2,618	xxxx
81	16:00	24/11/04	61,215	5,381	xxxx	2,659	xxxx
82	16:30	03/12/04	70,236	5,424	xxxx	2,702	xxxx
83	15:40	08/12/04	75,201	5,430	xxxx	2,708	xxxx
84	16:10	09/12/04	76,222	5,440	xxxx	2,718	xxxx
85	10:10	10/12/04	76,972	5,444	xxxx	2,722	xxxx
86	14:40	13/12/04	80,160	5,450	xxxx	2,728	xxxx
87	18:30	14/12/04	81,319	5,452	xxxx	2,730	xxxx
88	16:45	16/12/04	83,247	5,454	xxxx	2,732	xxxx
89	15:10	20/12/04	87,181	5,457	xxxx	2,735	xxxx
90	17:10	21/12/04	88,264	5,458	xxxx	2,736	xxxx
91	16:40	13/01/05	111,243	5,462	xxxx	2,740	xxxx
92	11:30	14/01/05	112,028	5,464	xxxx	2,742	xxxx

Laje M							
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas Relativas		Medidas Reais	
				Nervura 1	Nervura 2	Nervura 1	Nervura 2
93	15:40	19/01/05	117,201	5,469	xxxx	2,747	xxxx
94	15:55	20/01/05	118,212	5,480	xxxx	2,758	xxxx

Tabela AIV. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje isostática P

Laje P							
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas Relativas		Medidas Reais	
				Nervura 1	Nervura 2	Nervura 1	Nervura 2
1	12:00	29/09/04	xxxx	0,645	0,405	xxxx	xxxx
2	12:03		0,002	0,690	0,810	0,045	0,405
3	12:07		0,005	0,745	0,870	0,100	0,465
4	12:11		0,008	0,805	0,935	0,160	0,530
5	12:16		0,011	0,861	0,990	0,216	0,585
6	12:20		0,014	0,930	1,060	0,285	0,655
7	12:23		0,016	1,000	1,130	0,355	0,725
8	12:26		0,018	1,085	1,214	0,440	0,809
9	12:30		0,021	1,170	1,290	0,525	0,885
10	12:35		0,024	1,255	1,380	0,610	0,975
11	12:38		0,026	1,355	1,470	0,710	1,065
12	12:46		0,032	1,470	1,575	0,825	1,170
13	12:55		0,038	1,500	1,600	0,855	1,195
14	14:42		0,113	1,540	1,655	0,895	1,250
15	15:44		0,156	1,550	1,662	0,905	1,257
16	16:40		0,194	1,565	1,672	0,920	1,267
17	17:30		0,229	1,571	1,685	0,926	1,280
18	8:50	30/09/04	0,868	1,710	1,815	1,065	1,410
19	10:00		0,917	1,715	1,825	1,070	1,420
20	11:12		0,967	1,715	1,830	1,070	1,425
21	12:15		1,010	1,720	1,838	1,075	1,433
22	14:00		1,083	1,735	1,839	1,090	1,434
23	15:05		1,128	1,735	1,839	1,090	1,434
24	16:05		1,170	1,735	1,839	1,090	1,434
25	17:30		1,229	1,735	1,839	1,090	1,434
26	8:20	01/10/04	1,847	1,805	1,910	1,160	1,505
27	9:20		1,889	1,815	xxxx	1,170	xxxx
28	10:20		1,931	1,819	xxxx	1,174	xxxx
29	11:20		1,972	1,820	xxxx	1,175	xxxx
30	12:26		2,018	1,825	xxxx	1,180	xxxx
31	13:20		2,056	1,837	xxxx	1,192	xxxx
32	14:20		2,097	1,837	xxxx	1,192	xxxx
33	16:20		2,181	1,838	xxxx	1,193	xxxx
34	17:35		2,233	1,839	xxxx	1,194	xxxx
35	9:30		2,896	1,870	xxxx	1,225	xxxx
36	14:37	02/10/04	3,109	1,885	xxxx	1,240	xxxx
37	22:30		3,438	1,892	xxxx	1,247	xxxx
38	10:00	03/10/04	3,917	1,900	xxxx	1,255	xxxx
39	12:30		4,021	1,900	xxxx	1,255	xxxx
40	19:24		4,308	1,920	xxxx	1,275	xxxx

Tabela AIV. Flechas (mm) exp. ao longo do tempo da laje isostática P (cont.)

Laje P							
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas Relativas		Medidas Reais	
				Nervura 1	Nervura 2	Nervura 1	Nervura 2
41	12:50	05/10/04	5,035	1,980	xxxx	1,335	xxxx
42	14:10		6,090	1,999	xxxx	1,354	xxxx
43	15:10		6,132	2,000	xxxx	1,355	xxxx
44	16:00		6,167	2,000	xxxx	1,355	xxxx
45	9:40	06/10/04	6,903	2,020	xxxx	1,375	xxxx
46	11:25		6,976	2,020	xxxx	1,375	xxxx
47	14:30		7,104	2,020	xxxx	1,375	xxxx
48	17:35		7,233	2,021	xxxx	1,376	xxxx
49	10:00	07/10/04	7,917	2,039	xxxx	1,394	xxxx
50	12:10		8,007	2,039	xxxx	1,394	xxxx
51	14:35		8,108	2,045	xxxx	1,400	xxxx
52	10:11	08/10/04	8,924	2,061	xxxx	1,416	xxxx
53	11:30		8,979	2,065	xxxx	1,420	xxxx
54	14:00		9,083	2,066	xxxx	1,421	xxxx
55	15:38	11/10/04	12,151	2,130	xxxx	1,485	xxxx
56	10:15	14/10/04	14,927	2,180	xxxx	1,535	xxxx
57	17:45		15,240	2,180	xxxx	1,535	xxxx
58	9:55	15/10/04	15,913	2,202	xxxx	1,557	xxxx
59	15:25		16,142	2,202	xxxx	1,557	xxxx
60	10:27	19/10/04	19,935	2,260	xxxx	1,615	xxxx
61	11:00	21/10/04	21,958	2,293	xxxx	1,648	xxxx
62	9:33	22/10/04	22,898	2,305	xxxx	1,660	xxxx
63	14:25		23,101	2,306	xxxx	1,661	xxxx
64	10:20	26/10/04	26,931	2,330	xxxx	1,685	xxxx
65	16:07		27,172	2,350	xxxx	1,705	xxxx
66	11:10	28/10/04	28,965	2,350	xxxx	1,705	xxxx
67	11:00	29/10/04	29,958	2,372	xxxx	1,727	xxxx
68	12:50	01/11/04	33,035	2,411	xxxx	1,766	xxxx
69	13:30	02/11/04	34,063	2,412	xxxx	1,767	xxxx
70	11:30	09/11/04	40,979	2,450	xxxx	1,805	xxxx
71	11:45	11/11/04	42,990	2,499	xxxx	1,854	xxxx
72	16:00	12/11/04	44,167	2,480	xxxx	1,835	xxxx
73	11:30	16/11/04	47,979	2,485	xxxx	1,840	xxxx
74	14:20	19/11/04	51,097	2,549	xxxx	1,904	xxxx
75	16:00	24/11/04	56,167	2,575	xxxx	1,930	xxxx
76	16:30	03/12/04	65,188	2,649	xxxx	2,004	xxxx
77	15:40	08/12/04	70,153	2,670	xxxx	2,025	xxxx
78	16:10	09/12/04	71,174	2,699	xxxx	2,054	xxxx
79	10:10	10/12/04	71,924	2,700	xxxx	2,055	xxxx
80	14:40	13/12/04	75,111	2,710	xxxx	2,065	xxxx
81	18:30	14/12/04	76,271	2,724	xxxx	2,079	xxxx
82	16:45	16/12/04	78,198	2,750	xxxx	2,105	xxxx
83	15:10	20/12/04	82,132	2,699	xxxx	2,054	xxxx
84	17:10	21/12/04	83,215	2,700	xxxx	2,055	xxxx
85	16:40	13/01/05	106,194	2,770	xxxx	2,125	xxxx
86	11:30	14/01/05	106,979	2,770	xxxx	2,125	xxxx
87	15:40	19/01/05	112,153	2,769	xxxx	2,124	xxxx
88	15:55	20/01/05	113,163	2,769	xxxx	2,124	xxxx

Tabela AV. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje hiperestática J

Laje J								
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas Relativas		Medidas Reais		
				Vão 1	Vão 2	Vão 1	Vão 2	Média dos Vãos
1	12:51	01/10/04	xxxx	4,039	3,047	xxxx	xxxx	xxxx
2	12:55		0,003	4,103	3,119	0,064	0,072	0,068
3	12:59		0,006	4,155	3,185	0,116	0,138	0,127
4	13:02		0,008	4,192	3,218	0,153	0,171	0,162
5	13:05		0,010	4,229	3,268	0,190	0,221	0,206
6	13:08		0,012	4,262	3,300	0,223	0,253	0,238
7	13:11		0,014	4,293	3,330	0,254	0,283	0,269
8	13:15		0,017	4,328	3,379	0,289	0,332	0,311
9	13:21		0,021	4,363	3,410	0,324	0,363	0,344
10	13:26		0,024	4,398	3,456	0,359	0,409	0,384
11	13:32		0,028	4,440	3,505	0,401	0,458	0,430
12	13:38		0,033	4,480	3,550	0,441	0,503	0,472
13	13:43		0,036	4,525	3,605	0,486	0,558	0,522
14	13:50		0,041	4,604	3,700	0,565	0,653	0,609
15	13:56		0,045	4,710	3,953	0,671	0,906	0,789
16	16:20		0,145	4,779	4,047	0,740	1,000	0,870
17	17:35		0,197	4,790	4,059	0,751	1,012	0,882
18	9:30	02/10/04	0,860	4,845	4,105	0,806	1,058	0,932
19	14:37		1,074	4,879	4,130	0,840	1,083	0,962
20	22:30		1,402	4,880	4,131	0,841	1,084	0,963
21	10:00	03/10/04	1,881	4,878	4,132	0,839	1,085	0,962
22	12:30		1,985	4,880	4,140	0,841	1,093	0,967
23	19:24		2,273	4,880	4,140	0,841	1,093	0,967
24	12:50	05/10/04	3,999	4,991	4,230	0,952	1,183	1,068
25	14:10		4,055	5,009	4,240	0,970	1,193	1,082
26	15:10		4,097	5,019	4,249	0,980	1,202	1,091
27	16:00		4,131	5,025	4,259	0,986	1,212	1,099
28	9:40	06/10/04	4,867	4,974	4,248	0,935	1,201	1,068
29	11:25		4,940	4,990	4,259	0,951	1,212	1,082
30	14:30		5,069	5,020	4,275	0,981	1,228	1,105
31	17:35		5,197	5,029	4,290	0,990	1,243	1,117
32	10:00	07/10/04	5,881	4,971	4,269	0,932	1,222	1,077
33	12:10		5,972	4,997	4,285	0,958	1,238	1,098
34	14:35		6,072	5,020	4,300	0,981	1,253	1,117
35	10:11	08/10/04	6,889	5,000	4,300	0,961	1,253	1,107
36	11:30		6,944	5,016	4,310	0,977	1,263	1,120
37	14:00		7,048	5,049	4,329	1,010	1,282	1,146
38	10:35	10/10/04	8,906	5,080	4,300	1,041	1,253	1,147
39	15:38	11/10/04	10,116	5,095	4,390	1,056	1,343	1,200
40	10:15	14/10/04	12,892	5,120	4,389	1,081	1,342	1,212
41	17:45		13,204	5,142	4,398	1,103	1,351	1,227
42	9:55	15/10/04	13,878	5,120	4,394	1,081	1,347	1,214
43	10:27	19/10/04	17,900	5,175	4,450	1,136	1,403	1,270
44	11:00	21/10/04	19,923	5,168	4,467	1,129	1,420	1,275
45	9:33	22/10/04	20,863	5,170	4,475	1,131	1,428	1,280
46	14:25		21,065	5,210	4,497	1,171	1,450	1,311
47	10:20	26/10/04	25,098	5,190	4,488	1,151	1,441	1,296

Tabela AV. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje hiperestática J
(cont.)

Laje J								
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas Relativas		Medidas Reais		
48	16:07		25,339	5,232	4,510	1,193	1,463	1,328
49	11:10	28/10/04	27,133	5,186	4,498	1,147	1,451	1,299
50	11:00	29/10/04	28,126	5,197	4,510	1,158	1,463	1,311
51	12:50	01/11/04	30,202	5,230	4,529	1,191	1,482	1,337
52	13:30	02/11/04	31,230	5,250	4,540	1,211	1,493	1,352
53	11:30	09/11/04	38,147	5,240	4,560	1,201	1,513	1,357
54	11:45	11/11/04	40,157	5,235	4,550	1,196	1,503	1,350
55	16:00	12/11/04	41,334	5,270	4,595	1,231	1,548	1,390
56	11:30	16/11/04	45,147	5,255	4,580	1,216	1,533	1,375
57	14:20	19/11/04	48,265	5,289	4,590	1,250	1,543	1,397
58	16:00	24/11/04	53,334	5,330	4,630	1,291	1,583	1,437
59	16:30	03/12/04	62,355	5,319	4,644	1,280	1,597	1,439
60	15:40	08/12/04	67,320	5,350	4,660	1,311	1,613	1,462
61	16:10	09/12/04	68,341	5,340	4,658	1,301	1,611	1,456
62	10:10	10/12/04	69,091	5,310	4,640	1,271	1,593	1,432
63	14:40	13/12/04	72,278	5,345	4,670	1,306	1,623	1,465
64	18:30	14/12/04	73,438	5,380	4,705	1,341	1,658	1,500
65	16:45	16/12/04	75,365	5,370	4,686	1,331	1,639	1,485
66	15:10	20/12/04	79,299	5,361	4,673	1,322	1,626	1,474
67	17:10	21/12/04	80,383	5,368	4,657	1,329	1,610	1,470
68	16:40	13/01/05	103,362	5,412	4,721	1,373	1,674	1,524
69	11:30	14/01/05	104,147	5,380	4,700	1,341	1,653	1,497
70	15:40	19/01/05	109,320	5,375	4,700	1,336	1,653	1,495
71	15:55	20/01/05	110,331	5,380	4,710	1,341	1,663	1,502

Tabela AVI. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje hiperestática K

Laje K								
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas Relativas		Medidas Reais		
				Vão 1	Vão 2	Vão 1	Vão 2	Média dos Vãos
1	10:10	30/09/04	xxxx	0,472	0,420	xxxx	xxxx	xxxx
2	10:12		0,001	0,525	0,510	0,053	0,090	0,072
3	10:16		0,004	0,535	0,545	0,063	0,125	0,094
4	10:20		0,007	0,595	0,580	0,123	0,160	0,142
5	10:23		0,009	0,649	0,537	0,177	0,207	0,192
6	10:28		0,013	0,705	0,603	0,233	0,273	0,253
7	10:31		0,015	0,765	0,647	0,293	0,317	0,305
8	10:34		0,017	0,825	0,685	0,353	0,355	0,354
9	10:38		0,019	0,890	0,740	0,418	0,410	0,414
10	10:41		0,022	0,950	0,795	0,478	0,465	0,472
11	10:45		0,024	1,015	0,835	0,543	0,505	0,524
12	10:49		0,027	1,080	0,885	0,608	0,555	0,582
13	10:52		0,029	1,144	0,955	0,672	0,625	0,649
14	10:56		0,032	1,209	1,010	0,737	0,680	0,709
15	11:01		0,035	1,275	1,055	0,803	0,725	0,764

Tabela AVI. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje hiperestática K
(cont.)

Laje K								
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas Relativas		Medidas Reais		
16	11:05		0,038	1,350	1,120	0,878	0,790	0,834
17	11:10		0,042	1,472	1,240	1,000	0,910	0,955
18	12:15		0,087	1,541	1,315	1,069	0,985	1,027
19	14:00		0,160	1,574	1,324	1,102	0,994	1,048
20	15:05		0,205	1,585	1,333	1,113	1,003	1,058
21	16:05		0,247	1,600	1,334	1,128	1,004	1,066
22	17:30		0,306	1,599	1,330	1,127	1,000	1,064
23	8:20	01/10/04	0,924	1,605	1,339	1,133	1,009	1,071
24	9:20		0,965	1,607	1,340	1,135	1,010	1,073
25	10:20		1,007	1,612	1,340	1,140	1,010	1,075
26	11:20		1,049	1,619	1,354	1,147	1,024	1,086
27	12:26		1,094	1,635	1,367	1,163	1,037	1,100
28	13:20		1,132	1,642	1,375	1,170	1,045	1,108
29	14:20		1,174	1,645	1,360	1,173	1,030	1,102
30	16:20		1,257	1,645	1,360	1,173	1,030	1,102
31	17:35		1,309	1,645	1,364	1,173	1,034	1,104
32	9:30		02/10/04	1,972	1,652	1,373	1,180	1,043	1,112
33	14:37	2,185		1,672	1,395	1,200	1,065	1,133
34	22:30	2,514		1,678	1,394	1,206	1,064	1,135
35	10:00	03/10/04	2,993	1,675	1,392	1,203	1,062	1,133
36	12:30		3,097	1,675	1,392	1,203	1,062	1,133
37	19:24		3,385	1,674	1,392	1,202	1,062	1,132
38	12:50	05/10/04	5,111	1,745	1,445	1,273	1,115	1,194
39	14:10		5,167	1,757	1,455	1,285	1,125	1,205
40	15:10		5,208	1,760	1,460	1,288	1,130	1,209
41	16:00		5,243	1,760	1,466	1,288	1,136	1,212
42	9:40	06/10/04	5,979	1,737	1,468	1,265	1,138	1,202
43	11:25		6,052	1,748	1,475	1,276	1,145	1,211
44	14:30		6,181	1,769	1,486	1,297	1,156	1,227
45	17:35		6,309	1,775	1,491	1,303	1,161	1,232
46	10:00	07/10/04	6,993	1,745	1,496	1,273	1,166	1,220
47	12:10		7,083	1,767	1,514	1,295	1,184	1,240
48	14:35		7,184	1,780	1,525	1,308	1,195	1,252
49	10:11	08/10/04	8,001	1,779	1,535	1,307	1,205	1,256
50	11:30		8,056	1,787	1,544	1,315	1,214	1,265
51	14:00		8,160	1,812	1,555	1,340	1,225	1,283
52	10:35	10/10/04	10,017	1,840	1,605	1,368	1,275	1,322
53	15:38	11/10/04	11,228	1,870	1,650	1,398	1,320	1,359
54	10:15	14/10/04	14,003	1,881	1,553	1,409	1,223	1,316
55	17:45		14,316	1,881	1,556	1,409	1,226	1,318
56	9:55	15/10/04	14,990	1,879	1,545	1,407	1,215	1,311
57	15:25		15,219	1,878	1,544	1,406	1,214	1,310
58	10:27	19/10/04	19,012	1,901	1,585	1,429	1,255	1,342
59	11:00	21/10/04	21,035	1,901	1,615	1,429	1,285	1,357
60	9:33	22/10/04	21,974	1,910	1,614	1,438	1,284	1,361
61	14:25		22,177	1,933	1,626	1,461	1,296	1,379
62	10:20	26/10/04	26,007	1,915	1,614	1,443	1,284	1,364

Tabela AVI. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje hiperestática K
(cont.)

Laje K								
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas Relativas		Medidas Reais		
63	16:07		26,248	1,939	1,625	1,467	1,295	1,381
64	11:10	28/10/04	28,042	1,919	1,625	1,447	1,295	1,371
65	11:00	29/10/04	29,035	1,939	1,645	1,467	1,315	1,391
66	12:50	01/11/04	32,111	1,951	1,637	1,479	1,307	1,393
67	13:30	02/11/04	33,139	1,960	1,645	1,488	1,315	1,402
68	11:00	09/11/04	40,035	1,965	1,670	1,493	1,340	1,417
69	11:45	11/11/04	42,066	1,925	1,650	1,453	1,320	1,387
70	16:00	12/11/04	43,243	2,000	1,685	1,528	1,355	1,442
71	11:30	16/11/04	47,056	1,999	1,684	1,527	1,354	1,441
72	14:20	19/11/04	53,503	2,010	1,685	1,538	1,355	1,447
73	16:00	24/11/04	58,573	2,030	1,733	1,558	1,403	1,481
74	16:30	03/12/04	67,594	2,040	1,710	1,568	1,380	1,474
75	15:40	08/12/04	75,042	2,050	1,724	1,578	1,394	1,486
76	16:10	09/12/04	76,063	2,048	1,717	1,576	1,387	1,482
77	10:10	10/12/04	76,813	2,025	1,704	1,553	1,374	1,464
78	14:40	13/12/04	85,260	2,065	1,747	1,593	1,417	1,505
79	18:30	14/12/04	86,420	2,080	1,785	1,608	1,455	1,532
80	16:45	16/12/04	88,347	2,083	1,715	1,611	1,385	1,498
81	15:10	20/12/04	92,281	2,069	1,714	1,597	1,384	1,491
82	17:10	21/12/04	93,365	2,085	1,714	1,613	1,384	1,499
83	16:40	13/01/05	116,344	2,089	1,755	1,617	1,425	1,521
84	11:30	14/01/05	117,128	2,060	1,740	1,588	1,410	1,499
85	15:40	19/01/05	122,302	2,060	1,729	1,588	1,399	1,494
86	15:55	20/01/05	123,313	2,060	1,727	1,588	1,397	1,493

Tabela AVII. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje hiperestática N

Laje N								
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo(dias)	Medidas relativas		Medidas reais		
				Vão 1	Vão 2	Vão 1	Vão 2	Média dos Vãos
1	11:00	01/10/04	xxxx	0,765	1,010	xxxx	xxxx	xxxx
2	11:10		0,007	1,495	1,740	0,730	0,730	0,730
3	11:20		0,014	1,619	1,900	0,854	0,890	0,872
4	12:26		0,060	1,684	1,961	0,919	0,951	0,935
5	13:20		0,097	1,710	1,975	0,945	0,965	0,955
6	14:20		0,139	1,730	1,995	0,965	0,985	0,975
7	16:20		0,222	1,755	2,020	0,990	1,010	1,000
8	17:35		0,274	1,765	2,030	1,000	1,020	1,010
9	9:30	02/10/04	0,938	1,844	2,109	1,079	1,099	1,089
10	14:37		1,151	1,862	2,120	1,097	1,110	1,104
11	22:30		1,479	1,875	2,140	1,110	1,130	1,120
12	10:00	03/10/04	1,958	1,890	2,165	1,125	1,155	1,140
13	12:30		2,063	1,892	2,170	1,127	1,160	1,144
14	19:24		2,350	1,900	2,181	1,135	1,171	1,153

Tabela AVII. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje hiperestática N
(cont.)

Laje N								
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo(dias)	Medidas relativas		Medidas reais		
15	12:50	05/10/04	4,076	1,971	2,230	1,206	1,220	1,213
16	14:10		4,132	1,979	2,230	1,214	1,220	1,217
17	15:10		4,174	1,980	2,230	1,215	1,220	1,218
18	16:00		4,208	1,980	2,231	1,215	1,221	1,218
19	9:40	06/10/04	4,944	1,983	2,255	1,218	1,245	1,232
20	11:25		5,017	1,995	2,258	1,230	1,248	1,239
21	14:30		5,146	2,005	0,439	1,240	1,248	1,244
22	17:35		5,274	2,006	0,439	1,241	1,248	1,244
23	10:00	07/10/04	5,958	2,009	0,460	1,244	1,269	1,257
24	12:10		6,049	2,019	0,460	1,254	1,269	1,262
25	14:35		6,149	2,021	0,460	1,256	1,269	1,263
26	10:11	08/10/04	6,966	2,034	0,480	1,269	1,289	1,279
27	11:30		7,021	2,040	0,480	1,275	1,289	1,282
28	14:00		7,125	2,055	0,479	1,290	1,288	1,289
29	15:38	11/10/04	10,193	2,100	0,530	1,335	1,339	1,337
30	10:15	14/10/04	12,969	2,140	0,568	1,375	1,377	1,376
31	17:45		13,281	2,150	0,570	1,385	1,379	1,382
32	9:55	15/10/04	13,955	2,150	0,580	1,385	1,389	1,387
33	15:25		14,184	2,151	0,580	1,386	1,389	1,388
34	10:27	19/10/04	17,977	2,205	0,620	1,440	1,429	1,435
35	11:00	21/10/04	20,000	2,220	0,645	1,455	1,454	1,455
36	9:33	22/10/04	20,940	2,235	0,650	1,470	1,459	1,465
37	14:25		21,142	2,258	0,646	1,493	1,455	1,474
38	10:20	26/10/04	24,972	2,275	0,679	1,510	1,488	1,499
39	16:07		25,213	2,290	0,680	1,525	1,489	1,507
40	11:10	28/10/04	27,007	2,290	0,699	1,525	1,508	1,517
41	11:00	29/10/04	28,000	2,300	0,705	1,535	1,514	1,525
42	12:50	01/11/04	31,076	2,330	0,730	1,565	1,539	1,552
43	13:30	02/11/04	32,104	2,340	0,735	1,575	1,544	1,560
44	11:30	09/11/04	39,021	2,370	0,771	1,605	1,580	1,593
45	11:45	11/11/04	41,031	2,389	0,795	1,624	1,604	1,614
46	16:00	12/11/04	42,208	2,398	0,800	1,633	1,609	1,621
47	11:30	16/11/04	46,021	2,414	0,819	1,649	1,628	1,639
48	14:20	19/11/04	49,139	2,430	0,830	1,665	1,639	1,652
49	16:00	24/11/04	54,208	2,465	0,841	1,700	1,650	1,675
50	16:30	03/12/04	63,229	2,489	0,900	1,724	1,709	1,717
51	15:40	08/12/04	68,194	2,512	0,909	1,747	1,718	1,733
52	16:10	09/12/04	69,215	2,512	0,910	1,747	1,719	1,733
53	10:10	10/12/04	69,965	1,880	0,920	1,715	1,729	1,722
54	14:40	13/12/04	73,153	2,515	0,920	1,750	1,729	1,740
55	18:30	14/12/04	74,313	2,530	0,921	1,765	1,730	1,748
56	16:45	16/12/04	76,240	2,530	0,930	1,765	1,739	1,752
57	15:10	20/12/04	80,174	2,550	0,941	1,785	1,750	1,768
58	17:10	21/12/04	81,257	2,552	0,946	1,787	1,755	1,771
59	16:40	13/01/05	104,236	2,529	0,985	1,764	1,794	1,779
60	11:30	14/01/05	105,021	2,580	0,981	1,815	1,790	1,803
61	15:40	19/01/05	110,194	2,580	0,980	1,815	1,789	1,802

Tabela AVIII. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje hiperestática O

Laje O								
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas relativas		Medidas reais		
				Vão 1	Vão 2	Vão 1	Vão 2	Média dos Vãos
1	12:30	01/10/04	xxxx	0,450	0,330	xxxx	xxxx	xxxx
2	12:40		0,007	1,040	0,940	0,590	0,610	0,600
3	13:20		0,035	1,234	1,100	0,784	0,770	0,777
4	14:20		0,076	1,234	1,260	0,784	0,930	0,857
5	16:20		0,160	1,280	1,291	0,830	0,961	0,896
6	17:35		0,212	1,290	1,300	0,840	0,970	0,905
7	9:30	02/10/04	0,875	1,342	1,389	0,892	1,059	0,976
8	14:37		1,088	1,359	1,400	0,909	1,070	0,990
9	22:30		1,417	1,370	1,420	0,920	1,090	1,005
10	10:00	03/10/04	1,896	1,385	1,439	0,935	1,109	1,022
11	12:30		2,000	1,390	1,442	0,940	1,112	1,026
12	19:24		2,288	1,392	1,451	0,942	1,121	1,032
13	12:50	05/10/04	4,014	1,439	1,495	0,989	1,165	1,077
14	14:10		4,069	1,449	1,499	0,999	1,169	1,084
15	15:10		4,111	1,450	1,499	1,000	1,169	1,085
16	16:00		4,146	1,441	1,497	0,991	1,167	1,079
17	9:40	06/10/04	4,882	1,463	1,529	1,013	1,199	1,106
18	11:25		4,955	1,470	1,530	1,020	1,200	1,110
19	14:30		5,083	1,472	1,539	1,022	1,209	1,116
20	17:35		5,212	1,474	1,541	1,024	1,211	1,118
21	10:00	07/10/04	5,896	1,489	1,560	1,039	1,230	1,135
22	12:10		5,986	1,490	1,565	1,040	1,235	1,138
23	14:35		6,087	1,495	1,569	1,045	1,239	1,142
24	10:11	08/10/04	6,903	1,508	1,585	1,058	1,255	1,157
25	11:30		6,958	1,512	1,590	1,062	1,260	1,161
26	14:00		7,063	1,515	1,595	1,065	1,265	1,165
27	15:38	11/10/04	10,131	1,565	1,640	1,115	1,310	1,213
28	10:15	14/10/04	12,906	1,593	1,673	1,143	1,343	1,243
29	17:45		13,219	1,602	1,670	1,152	1,340	1,246
30	9:55	15/10/04	13,892	1,615	1,685	1,165	1,355	1,260
31	15:25		14,122	1,645	1,685	1,195	1,355	1,275
32	10:27	19/10/04	17,915	1,653	1,730	1,203	1,400	1,302
33	11:00	21/10/04	19,938	1,665	1,749	1,215	1,419	1,317
34	9:33	22/10/04	20,877	1,685	1,750	1,235	1,420	1,328
35	14:25		21,080	1,695	1,757	1,245	1,427	1,336
36	10:20	26/10/04	24,910	1,715	1,781	1,265	1,451	1,358
37	16:07		25,151	1,721	1,789	1,271	1,459	1,365
38	11:10	28/10/04	26,944	1,730	1,796	1,280	1,466	1,373
39	11:00	29/10/04	27,938	1,732	1,800	1,282	1,470	1,376
40	12:50	01/11/04	31,014	1,752	1,819	1,302	1,489	1,396
41	13:30	02/11/04	32,042	1,760	1,819	1,310	1,489	1,400
42	11:30	09/11/04	38,958	1,785	1,832	1,335	1,502	1,419
43	11:45	11/11/04	40,969	1,792	1,848	1,342	1,518	1,430
44	16:00	12/11/04	42,146	1,810	1,870	1,360	1,540	1,450
45	11:30	16/11/04	45,958	1,815	1,890	1,365	1,560	1,463
46	14:20	19/11/04	49,076	1,835	1,910	1,385	1,580	1,483
47	16:00	24/11/04	54,146	1,852	1,920	1,402	1,590	1,496

**Tabela AVIII. Flechas (mm) experimentais ao longo do tempo da laje hiperestática O
(cont.)**

Laje O								
N ^{os} de medições	Hora	Data	Tempo (dias)	Medidas relativas		Medidas reais		
48	16:30	03/12/04	63,167	1,868	1,907	1,418	1,577	1,498
49	15:40	08/12/04	68,132	1,875	1,911	1,425	1,581	1,503
50	16:10	09/12/04	69,153	1,879	1,911	1,429	1,581	1,505
51	10:10	10/12/04	69,903	1,880	1,910	1,430	1,580	1,505
52	14:40	13/12/04	73,090	1,879	1,912	1,429	1,582	1,506
53	18:30	14/12/04	74,250	1,880	1,915	1,430	1,585	1,508
54	16:45	16/12/04	76,177	1,890	1,931	1,440	1,601	1,521
55	15:10	20/12/04	80,111	1,890	1,975	1,440	1,645	1,543
56	17:10	21/12/04	81,194	1,891	1,981	1,441	1,651	1,546
57	16:40	13/01/05	104,174	1,915	1,970	1,465	1,640	1,553
58	11:30	14/01/05	104,958	1,915	1,970	1,465	1,640	1,553
59	15:40	19/01/05	110,132	1,917	1,970	1,467	1,640	1,554
60	15:55	20/01/05	111,142	1,915	1,970	1,465	1,640	1,553

ANEXO B – DEFORMAÇÃO DAS PAREDES DE APOIO DAS LAJES L E M

Neste anexo serão apresentados os valores experimentais das deformações das alvenarias de apoio das lajes istostáticas L e M, nas tabelas BI a BII, respectivamente.

Tabela BI. Deformação das paredes (mm) de apoio da laje L – relógios 1, 2, 3, 5, 6 e 7

MEDIDA DA RETRAÇÃO NA ALVENARIA DE APOIO - LAJE L (mm)						
DATA/HORA	RELÓGIO 1	RELÓGIO 2	RELÓGIO 3	RELÓGIO 5	RELÓGIO 6	RELÓGIO 7
21/9/04 10:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
21/9/04 10:08	0,001	0,000	0,000	0,000	0,003	0,004
21/9/04 10:15	0,002	0,000	0,000	-0,004	0,004	0,005
21/9/04 10:22	0,004	0,000	0,000	-0,004	0,000	0,009
21/9/04 10:30	0,009	0,001	0,000	-0,005	0,001	0,009
21/9/04 10:38	0,009	0,001	-0,001	-0,005	0,003	0,009
21/9/04 10:45	0,010	0,002	-0,001	-0,005	0,003	0,011
21/9/04 10:53	0,010	0,002	-0,002	-0,006	0,003	0,012
21/9/04 11:00	0,010	0,002	-0,003	-0,006	-0,003	0,013
21/9/04 11:09	0,011	0,002	-0,006	-0,006	-0,004	0,013
21/9/04 11:16	0,011	0,002	-0,008	-0,006	-0,004	0,015
21/9/04 10:23	0,012	0,001	-0,010	-0,006	-0,003	0,015
21/9/04 11:35	0,015	0,000	-0,013	-0,006	-0,003	0,016
21/9/04 12:30	0,015	0,000	-0,015	-0,006	-0,006	0,018
21/9/04 14:30	0,018	0,000	-0,015	-0,005	-0,006	0,019
21/9/04 15:30	0,020	0,000	-0,016	-0,005	-0,007	0,019
21/9/04 16:30	0,020	0,000	-0,020	-0,006	-0,014	0,019
21/9/04 17:30	0,020	0,000	-0,022	-0,005	-0,023	0,019
22/9/04 9:30	0,010	-0,010	-0,030	-0,010	-0,035	0,008
22/9/04 10:30	0,015	-0,010	-0,030	-0,010	-0,035	0,009
22/9/04 11:30	0,019	-0,010	-0,030	-0,010	-0,032	0,010
22/9/04 12:30	0,019	-0,010	-0,030	-0,007	-0,027	0,011
22/9/04 13:40	0,021	-0,008	-0,033	-0,005	-0,027	0,015
22/9/04 14:40	0,021	-0,008	-0,033	-0,006	-0,027	0,016
22/9/04 15:40	0,021	-0,008	-0,032	-0,006	-0,028	0,017
22/9/04 16:40	0,021	-0,008	-0,032	-0,007	-0,028	0,017
22/9/04 17:30	0,021	-0,008	-0,032	-0,006	-0,029	0,016
23/9/04 9:40	0,020	-0,011	-0,035	-0,006	-0,047	0,009
23/9/04 10:30	0,020	-0,011	-0,035	-0,005	-0,044	0,010
23/9/04 11:40	0,020	-0,011	-0,033	-0,005	-0,044	0,011
23/9/04 12:30	0,028	-0,010	-0,032	-0,005	-0,040	0,012
23/9/04 15:50	0,028	-0,010	-0,035	-0,005	-0,040	0,015
23/9/04 16:50	0,028	-0,010	-0,032	-0,005	-0,040	0,019
24/9/04 8:55	0,021	-0,011	-0,035	-0,005	-0,064	0,005
24/9/04 9:55	0,029	-0,011	-0,031	-0,004	-0,059	0,008
24/9/04 11:40	0,030	-0,011	-0,030	0,004	X	0,019
24/9/04 14:07	0,041	-0,009	-0,030	0,005	X	0,020
24/9/04 15:10	0,041	-0,010	-0,030	0,005	X	0,020
24/9/04 16:00	0,041	-0,010	-0,030	0,005	X	0,020
27/9/04 15:50	0,039	-0,028	-0,045	-0,003	X	0,010
27/9/04 17:09	0,040	-0,028	-0,042	-0,004	X	0,015

Tabela BI. Deformação das paredes (mm) de apoio da laje L – relógios 1, 2, 3, 5, 6 e 7
(cont.)

DATA/HORA	RELÓGIO 1	RELÓGIO 2	RELÓGIO 3	RELÓGIO 5	RELÓGIO 6	RELÓGIO 7
28/9/04 14:50	0,040	-0,030	-0,041	0,005	X	0,010
28/9/04 15:50	0,041	-0,028	-0,041	0,005	X	0,015
28/9/04 16:50	0,041	-0,028	-0,043	0,005	X	0,015
29/9/04 8:20	0,025	-0,029	-0,035	0,005	X	0,005
29/9/04 10:00	0,035	-0,030	-0,030	X	X	X
29/9/04 11:07	0,040	-0,030	-0,030	X	X	X
29/9/04 12:10	0,045	X	X	X	X	X
29/9/04 12:51	0,045	X	X	X	X	X
29/9/04 14:45	0,045	X	X	X	X	X
29/9/04 15:54	0,042	X	X	X	X	X
29/9/04 16:40	0,040	X	X	X	X	X
29/9/04 17:30	0,039	X	X	X	X	X
30/9/04 10:00	0,010	X	X	X	X	X
30/9/04 11:12	0,011	X	X	X	X	X
30/9/04 12:15	0,015	X	X	X	X	X
30/9/04 14:00	0,019	X	X	X	X	X

Tabela BII. Deformação das paredes (mm) de apoio da laje M – relógios 1 e 3

DADOS DE DEFORMAÇÃO NA ALVENARIA DE APOIO - LAJE M (mm)		
DATA/HORA	RELÓGIO 1	RELÓGIO 3
24/9/04 11:00	2,709	4,220
24/9/04 11:05	2,700	4,220
24/9/04 11:22	2,700	4,220
24/9/04 11:32	2,702	4,220
24/9/04 11:50	2,690	4,220
24/9/04 12:04	2,678	4,220
24/9/04 14:05	2,730	4,215
24/9/04 15:10	2,670	4,215
24/9/04 16:00	2,667	4,215
27/9/04 15:50	2,650	4,210
27/9/04 17:09	2,649	4,210
28/9/04 14:50	2,645	4,210
28/9/04 15:50	2,645	4,210
28/9/04 16:50	2,645	4,210
29/9/04 8:20	2,645	4,210
29/9/04 10:00	2,645	4,210
29/9/04 11:07	2,645	4,210
29/9/04 12:10	2,645	4,210
29/9/04 12:51	2,645	4,210
29/9/04 14:45	2,645	4,210
29/9/04 15:44	2,645	4,210
29/9/04 16:40	2,645	4,210
29/9/04 17:30	2,645	4,210
30/9/04 8:50	2,645	4,210

ANEXO C – VALORES EXPERIMENTAIS DAS TEMPERATURAS E UMIDADES DENTRO E FORA DA CÂMARA CLIMATIZADA

A seguir são apresentados os valores experimentais da temperatura e umidade relativas instantâneas, tanto dentro quanto fora da câmara climatizada, em que foram mantidas a temperatura média de vinte e três graus Celsius e umidade de cinquenta por cento. Além destes são representados os resultados de temperatura e umidade máximas e mínimas do dia, assim como os respectivos gradientes, conforme as tabelas CI e CII.

Tabela CI. Temperatura (°C) e umidade (%) relativa instantânea dentro e fora da câmara climatizada

DIAS	FORA DA CÂMARA		DENTRO DA CÂMARA	
	TEMP. (°C)	UMID. (%)	TEMP. (°C)	UMID. (%)
0,000	24,7	34,0	22,2	46,4
0,069	26,8	42,0	21,7	46,7
0,116	29,2	39,0	22,6	47,0
0,160	30,6	37,0	22,1	47,0
0,188	30,4	36,0	21,8	42,8
0,267	29,5	36,0	21,7	45,1
0,308	29,0	36,0	21,5	44,1
0,347	28,5	37,0	22,0	47,4
0,382	27,7	39,0	21,6	42,8
1,021	20,0	59,0	21,7	49,3
1,069	20,8	57	21,5	49,6
1,119	22,4	54	21,9	47,9
1,163	23,7	52	21,5	48,6
1,236	25,7	47	22,6	51,3
1,281	26,0	45	21,6	46,1
1,323	25,7	45	21,6	45,6
1,382	24,6	45	21,8	47,2
2,000	18,6	68,0	21,8	51,0
2,042	18,7	69,0	21,5	48,2
2,083	18,7	72,0	21,8	50,9
2,125	19,5	72,0	21,9	52,8
2,171	20,4	70,0	21,9	59,0
2,208	21,1	69,0	21,5	51,7
2,250	21,3	68,0	22,2	52,9
2,333	21,1	70,0	22,0	50,5
2,385	21,1	71,0	21,7	51,7
3,049	20,5	72,0	22,3	48,8
3,262	22,6	68,0	22,4	52,0
3,590	19,7	76,0	22,4	52,9
4,069	18,5	81,0	22,4	56,4
4,174	18,8	80,0	22,5	55,3
4,461	17,9	81,0	22,4	56,0
6,188	25,6	58,0	21,5	58,2
6,243	27,1	51,0	21,7	55,9
6,285	27,4	50,0	21,8	52,7
6,319	27,6	48,0	21,7	49,8

Tabela CI. Temperatura (°C) e umidade (%) relativa instantânea dentro e fora da câmara climatizada (cont.)

DIAS	FORA DA CÂMARA		DENTRO DA CÂMARA	
	TEMP. (°C)	UMID. (%)	TEMP. (°C)	UMID. (%)
7,056	20,1	62,0	21,4	47,5
7,128	22,4	57,0	22,2	50,7
7,257	25,6	47,0	21,6	48,2
7,385	24,9	44,0	21,5	46,9
8,069	17,2	53,0	21,0	49,4
8,160	20,0	44,0	21,8	48,2
8,260	22,5	40,0	21,4	47,6
9,077	18,5	54,0	21,5	47,3
9,132	21,2	46,0	22,2	46,5
9,236	25,0	39,0	21,6	46,6
12,304	26,0	61,0	21,4	48,4
15,080	24,4	77,0	21,4	53,3
15,392	26,6	65,0	21,9	55,6
16,066	22,3	82,0	21,2	48,6
16,295	22,5	80,0	21,4	52,3
20,088	25,2	74,0	20,5	49,4
22,111	22,0	66,0	20,6	48,4
23,051	21,9	68,0	20,5	48,6
27,083	23,3	78,0	20,3	47,3
27,324	28,8	56,0	20,6	48,0
29,118	22,6	54,0	20,7	53,4
30,111	23,3	65,0	21,0	56,7
32,188	27,4	60,0	21,6	59,3
33,215	30,6	51,0	21,4	56,2
40,132	24,3	60,0	21,2	59,9
42,142	22,5	76,0	23,5	54,6
43,319	25,5	49,0	23,2	50,6
47,132	22,2	88,0	23,4	51,9
53,503	24,4	75,0	23,5	53,0
58,573	30,0	40,0	23,2	50,4
67,594	25,7	68,0	23,4	41,9
75,042	30,3	54,0	23,2	33,3
76,063	28,2	60,0	23,7	35,8
76,813	23,6	76,0	23,4	35,4
85,260	28,3	46,0	23,5	34,8
88,347	31,2	52,0	23,4	49,1
92,281	28,8	62,0	23,4	51,7
93,365	23,2	74,0	23,0	47,0
116,344	28,8	53,0	23,4	68,3
117,128	25,9	71,0	23,2	66,4
122,302	22,8	91,0	23,4	65,9
123,313	23,9	90,0	23,5	67,0

Tabela CII. Temperatura máxima e mínima do dia (°C), umidade (%) máxima e mínima do dia e gradiente de temperatura (°C) e umidade (%)

DIAS	TEMP. MÁX. (°C)	TEMP. MÍN. (°C)	UMID. MÁX. (%)	UMID. MÍN. (%)	GRADIENTE TEMPERATURA(°C)	GRADIENTE DE UMIDADE (%)
0,000	33,4	22,0	49	27	11,4	22
4,013	35,5	22,0	54	24	13,5	30
5,000	35,5	22,0	54	24	13,5	30
7,028	35,5	18,4	68	24	17,1	44
8,031	23,2	18,0	72	24	5,2	48
11,965	27,7	15,9	83	24	11,8	59
13,031	27,7	17,0	69	42	10,7	27
13,906	22,7	17,2	53	40	5,5	13
14,882	25,1	13,7	64	39	11,4	25
17,950	30,9	17,1	79	32	13,8	47
21,038	28,2	21,3	82	60	6,9	22
21,941	26,5	21,1	83	65	5,4	18
53,503	32,1	15,6	89	60	16,5	29
67,594	32,5	17,1	87	30	15,4	57
76,813	32,0	20,3	82	40	11,7	42
88,347	31,5	23,5	75	51	8,0	24
92,281	31,5	22,4	81	51	9,1	30
93,365	30,2	21,6	83	59	8,6	24
117,128	29,1	21,2	78	63	7,9	15
122,302	32,3	22,2	91	49	10,1	42
123,313	23,9	21,3	95	89	2,6	6

ANEXO D – DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA LONGITUDINAL UTILIZANDO MÉTODO ADIMENSIONAL

Neste item será apresentado o procedimento de cálculo utilizado para dimensionamento no estado limite último da armadura longitudinal, segundo CARVALHO E FIGUEIREDO [2004].

A fim de facilitar o emprego de diversos sistemas de unidades e permitir a utilização de tabelas de modo mais racional, CARVALHO E FIGUEIREDO [2004] trabalham com fórmulas adimensionais, para dimensionamento da armadura longitudinal.

D.I. Definições e Nomenclatura

Antes de apresentar a teoria que possibilita o dimensionamento das peças de concreto armado, é conveniente definir as principais nomenclaturas das grandezas envolvidas no cálculo, empregadas pela NBR 6118:2004 e pela maioria das normas internacionais.

- d** – **altura útil**: distância entre o centro de gravidade da armadura longitudinal tracionada até à fibra mais comprimida de concreto.
- d'** – distância entre o centro de gravidade da armadura transversal comprimida e a face mais próxima do elemento estrutural (fibra mais comprimida de concreto).
- M_{Sd}** – **momento fletor solicitante de cálculo** na seção (na continuação será chamado apenas de **M_d**): no dimensionamento é obtido multiplicando-se o momento em serviço pelo coeficiente de ponderação γ_f .
- M_{Rd}** – **momento fletor resistente de cálculo** (calculado com f_{cd} e f_{yd}): máximo momento fletor que a seção pode resistir (deve-se ter sempre $M_{Sd} \leq M_{Rd}$).
- b_w** – **largura** da seção transversal de vigas de seção retangular ou da nervura (parte mais estreita da seção transversal), também chamada de alma das vigas de seção T.
- h** – altura total da seção transversal de uma peça.
- z** – **braço de alavanca**: distância entre o ponto de aplicação das resultantes das tensões normais de compressão no concreto e de tração no aço (distância entre o centro de gravidade da armadura de tração e o centro de gravidade da região comprimida de concreto).
- x** – altura (profundidade) da linha neutra: distância da borda mais comprimida do concreto ao ponto que tem deformação e tensão nulas (distância da linha neutra ao ponto de maior encurtamento da seção transversal de uma peça fletida).
- y** – **altura da linha neutra convencional**: altura do diagrama retangular de tensões de compressão no concreto, na seção transversal de uma peça fletida; é uma idealização que simplifica o equacionamento do problema e conduz a resultados bem próximos daqueles que seriam obtidos com o diagrama parábola-retângulo ($y = 0,8 \cdot x$).

D.II. Cálculo da Armadura Longitudinal de Vigas sob Flexão Normal Utilizando Fórmulas Adimensionais e Tabela para Dimensionamento de Seções Retangulares

O cálculo da quantidade de armadura longitudinal, para seções transversais retangulares, conhecidos a resistência do concreto (f_{ck}), largura da seção (b_w), altura útil (d) e tipo de aço (f_{yd} e ϵ_{yd}) é feito, de maneira simples, a partir do equilíbrio das forças atuantes na seção. O dimensionamento pode ser utilizado para a flexão normal pura e simples, que é representada pelos domínios 2, 3, 4 e 4a de acordo com CARVALHO E FIGUEIREDO [2004].

D.II.I. Equacionamento

Neste item será apresentado um breve roteiro do equacionamento para determinação da armadura longitudinal de vigas submetidas à flexão simples:

a) Equilíbrio das forças atuantes normais à seção transversal: como não há força externa, a força atuante no concreto (F_c) deve ser igual à força atuante na armadura (F_s):

$$\sum F = 0 \rightarrow F_s - F_c = 0 \rightarrow F_s = F_c$$

b) Equilíbrio dos momentos: o momento das forças internas em relação a qualquer ponto (no caso, em relação ao C.G. da armadura) deve ser igual ao momento externo de cálculo:

$$\sum M = M_d \rightarrow M_d = F_c \cdot z$$

Sendo:

$$F_c = (0,85 \cdot f_{cd}) \cdot (b_w) \cdot (0,8 \cdot x)$$

$$z = d - 0,4 \cdot x \quad (\text{braço de alavanca})$$

Tem-se:

$$M_d = (0,68 \cdot x \cdot d - 0,272 \cdot x^2) \cdot b_w \cdot f_{cd}$$

Resolvendo esta equação obtém-se x , o qual define a posição da linha neutra, necessário para determinação da armadura. Nota-se que a variação de x não é linear com o esforço solicitante M_d , mas segue um polinômio do segundo grau.

c) Cálculo da área necessária de armadura (A_s)

Com o valor de x determinado é possível encontrar A_s . A força na armadura (F_s) vem do produto da área de aço (A_s) pela tensão atuante no aço (f_s).

$$\text{Tem-se } \frac{M_d}{z} = F_s = f_s \cdot A_s \text{ resultando}$$

$$A_s = \frac{M_d}{z \cdot f_s}$$

Admitindo que a peça esteja trabalhando nos domínios 2 ou 3, para um melhor aproveitamento da armadura, tem-se $\epsilon_s \geq \epsilon_{yd}$, resultando que a tensão na armadura é a de escoamento ($f_s = f_{yd}$); caso contrário, tira-se o valor de ϵ_s do diagrama de tensão×deformação do aço e calcula-se f_s , ficando:

$$A_s = \frac{M_d}{z \cdot f_{yd}}$$

D.II.II. Equacionamento Adimensional

Dessa forma, a forma adimensional das equações de dimensionamento é dada por:

a) Equação de M_d

- dividindo ambos os membros da equação de M_d por $b_w d^2 f_{cd}$ tem-se:

$$\frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{(0,68 \cdot x \cdot d - 0,272 \cdot x^2) \cdot b_w \cdot f_{cd}}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \left(0,68 \cdot \frac{x}{d} - 0,272 \cdot \frac{x^2}{d^2} \right)$$

- chamando $\frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = KMD$ e $\frac{x}{d} = KX$ a equação acima fica:

$$KMD = 0,68 \cdot (KX) - 0,272 \cdot (KX)^2$$

esta equação contém apenas termos adimensionais, e KX só pode variar de 0 a 1 ($x = 0$ e $x = d$):

$$x = 0 \text{ (início do domínio 2)} \rightarrow KX = \frac{x}{d} = 0 \rightarrow KMD = 0$$

$$x = d \text{ (fim do domínio 4)} \rightarrow KX = \frac{x}{d} = 1 \rightarrow KMD = 0,408$$

b) Expressão que fornece o braço de alavanca z ($z = d - 0,4 \cdot x$)

- dividindo os dois termos por d resulta:

$$\frac{z}{d} = \frac{d - 0,4 \cdot x}{d} = 1 - 0,4 \cdot \frac{x}{d}$$

- chamando $\frac{z}{d} = KZ$ e lembrando que $KX = \frac{x}{d}$, da equação anterior obtém-se KZ :

$$KZ = 1 - 0,4 \cdot KX$$

c) Expressão para o cálculo da armadura

$A_s = \frac{M_d}{z \cdot f_s}$ e, como $z = (KZ) \cdot d$, resulta:

$$A_s = \frac{M_d}{(KZ) \cdot d \cdot f_s}$$

d) Equação que relaciona as deformações com a altura da linha neutra

$\frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}$ e, como $\frac{x}{d} = KX$ resulta

$$KX = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s}$$

Como KX só admite valores de 0 a 1, pode-se construir a tabela DI em que a cada KX arbitrado entre 0 e 1 corresponde: um valor de **KMD**; um de **KZ**; conhecendo-se ε_c (**EC**), um de ε_s (**ES**). É importante destacar que conhecido o par de deformações (ε_c ; ε_s) conhece-se o domínio em que a peça está trabalhando. Na tabela, por praticidade, foram dados valores a **KMD** e calculados os demais, mantidos os limites de validade para **KX**.

Tabela DI. Valores para cálculo de armadura longitudinal de seções retangulares

KMD	KX	KZ	EC	ES
0,0100	0,0148	0,9941	0,1502	10,000
0,0200	0,0298	0,9881	0,3068	10,000
0,0300	0,0449	0,9820	0,4704	10,000
0,0400	0,0603	0,9759	0,6414	10,000
0,0500	0,0758	0,9697	0,8205	10,000
0,0550	0,0836	0,9665	0,9133	10,000
0,0600	0,0916	0,9634	1,0083	10,000
0,0650	0,0995	0,9602	1,1056	10,000
0,0700	0,1076	0,9570	1,2054	10,000
0,0750	0,1156	0,9537	1,3077	10,000
0,0800	0,1238	0,9505	1,4126	10,000
0,0850	0,1320	0,9472	1,5203	10,000
0,0900	0,1403	0,9439	1,6308	10,000
0,0950	0,1485	0,9406	1,7444	10,000
0,1000	0,1569	0,9372	1,8611	10,000
0,1050	0,1654	0,9339	1,9810	10,000
0,1100	0,1739	0,9305	2,1044	10,000
0,1150	0,1824	0,9270	2,2314	10,000
0,1200	0,1911	0,9236	2,3621	10,000
0,1250	0,1998	0,9201	2,4967	10,000
0,1300	0,2086	0,9166	2,6355	10,000
0,1350	0,2175	0,9130	2,7786	10,000
0,1400	0,2264	0,9094	2,9263	10,000
0,1450	0,2354	0,9058	3,0787	10,000
0,1500	0,2445	0,9022	3,2363	10,000
0,1550	0,2536	0,8985	3,3391	10,000
0,1600	0,2630	0,8948	3,5000	9,8104
0,1650	0,2723	0,8911	3,5000	9,3531
0,1700	0,2818	0,8873	3,5000	8,9222
0,1750	0,2913	0,8835	3,5000	8,5154
0,1800	0,3009	0,8796	3,5000	8,3106
0,1850	0,3106	0,8757	3,5000	7,7662
0,1900	0,3205	0,8718	3,5000	7,4204
0,1950	0,3305	0,8678	3,5000	7,0919
0,2000	0,3405	0,8638	3,5000	6,7793
0,2050	0,3506	0,8597	3,5000	6,4814
0,2100	0,3609	0,8556	3,5000	6,1971
0,2150	0,3714	0,8515	3,5000	5,9255
0,2200	0,3819	0,8473	3,5000	5,6658
0,2250	0,3925	0,8430	3,5000	5,4170
0,2300	0,4033	0,8387	3,5000	5,1785
0,2350	0,4143	0,8343	3,5000	4,9496
0,2400	0,4253	0,8299	3,5000	4,7297
0,2450	0,4365	0,8254	3,5000	4,5181
0,2500	0,4479	0,8208	3,5000	4,3144
0,2550	0,4594	0,8162	3,5000	4,1181
0,2600	0,4711	0,8115	3,5000	3,9287
0,2650	0,4830	0,8068	3,5000	3,7459
0,2700	0,4951	0,8020	3,5000	3,5691
0,2750	0,5074	0,7970	3,5000	3,3981
0,2800	0,5199	0,7921	3,5000	3,2324
0,2850	0,5326	0,7870	3,5000	3,0719
0,2900	0,5455	0,7818	3,5000	2,9162
0,2950	0,5586	0,7765	3,5000	2,7649
0,3000	0,5721	0,7712	3,5000	2,6179
0,3050	0,5858	0,7657	3,5000	2,4748
0,3100	0,5998	0,7601	3,5000	2,3355
0,3150	0,6141	0,7544	3,5000	2,1997
0,3200	0,6287	0,7485	3,5000	2,0672
0,3300	0,6590	0,7364	3,5000	1,8100
0,3400	0,6910	0,7236	3,5000	1,5652
0,3500	0,7249	0,7100	3,5000	1,3283
0,3600	0,7612	0,6955	3,5000	1,0983
0,3700	0,8003	0,6799	3,5000	0,8732
0,3800	0,8433	0,6627	3,5000	0,6506