

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Faculdade de Engenharia
Curso de Especialização em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto
Armado

Stella Maris Almeida Campos Arruda

ESTUDO DAS FLECHAS: comparativo

Belo Horizonte
2018

Stella Maris Almeida Campos Arruda

ESTUDO DAS FLECHAS: comparativo

Versão Final

Monografia de especialização apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço".

Orientador: Prof. Pedro Vianna Pessoa de Mendonça

Coorientador: Prof. Sebastião Salvador Real Pereira

Belo Horizonte

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
*Curso de Especialização em Análise e Dimensionamento de
Estruturas de Concreto Armado e Aço*

ATA DA DEFESA

“Estudo das Flechas - Comparativo”

STELLA MARIS ALMEIDA CAMPOS ARRUDA

Trabalho Final defendido perante a banca examinadora, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço”

Aprovada em 03 de agosto de 2018

Por:

Prof. M.Sc. Pedro Vianna Pessoa de Mendonça *Pedro V P de Mendonça*
Avaliador 1 – Orientador Nota: 80

Prof. Dr. Sebastião Salvador Real Pereira *Sebastião Salvador Real Pereira*
Avaliador 2 Nota: 80

Resumo

Nas peças de concreto armado sujeitas à flexão ocorre, para cargas de serviço, fissuração da parte tracionada de algumas seções transversais passando nelas a valer o estágio II com o concreto parcialmente ativo o que representa, em geral, significativa redução do momento de inércia. Porém, em outras seções a inércia continua ainda bruta (estágio I) o que pode influenciar bastante nos diferentes métodos de cálculo de flechas.

Neste trabalho é apresentado um estudo do valor máximo da flecha em uma das lajes de uma edificação já construída. Sendo esta edificação uma casa de dois pavimentos, toda estruturada, com lajes maciças. É mostrado um comparativo entre as flechas encontradas manualmente, pelo processo constante da ABNT NBR 6118:2014 com o uso do programa CAD TQS e a real medida in loco. A laje em estudo é uma laje de forro, maciça e com 22 cm de espessura.

Palavras-chave: concreto, flechas, software

Abstract

In structural members built with reinforced concrete and subject to bending moments caused by service loads cracks appear in some of the tensioned sections, when the maximum tensile strain and stress on the outer tensile fiber exceeds the concrete tensile capacity. The concrete and steel are effectively bonded together between cracks but a substantial reduction in member stiffness occurs due to the loss of much of the tensile concrete section which can influence a lot of the different calculation methods.

In this paper is presented a study of the maximum deflection in one of the slabs of a built building. And building a two-storey house, all structured, with massive slabs. This deflection will be evaluated by hand, using the prescriptions of ABNT NBR 6118:2014 with the use of the software CAD TQS and real deflection will be measured in loco and compared with the theoretical values found. The study is a slab on lining, massive slab and 22 cm thick.

Keywords: concrete, deflection, software

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1 - Forma do Forro da edificação residencial existente (Laje L14 em estudo)	11
Figura 6.1 - Forma do Forro da edificação residencial existente (Laje L14 em estudo)	18
Figura 6.2 – Diagrama de Momento Fletor Horizontal da laje L14 em estudo	19
Figura 6.3 – Diagrama de Momento Fletor Horizontal da laje L14 em estudo	20
Figura 6.4 – Diagrama de Flechas (deformações) da laje L14 em estudo	21
Figura 7.1 – Forma do Forro da edificação residencial existente (Laje L14 em estudo)	23

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVO	7
3	PROGRAMAS UTILIZADOS	8
4	CRITÉRIOS DE PROJETO	8
4.1	Concreto utilizado - $f_{ck} = 30 \text{ Mpa} = 3,0 \times 10^4 \text{ KN/m}^2$	8
4.2	Cobrimentos mínimos	8
4.3	Sobrecargas	9
4.4	Norma em uso	9
5	DESENVOLVIMENTO	9
6	CÁLCULO DA FLECHA PELO PROGRAMA CAD TQS	11
6.1	Critérios do programa (Gerenciados)	11
	Critérios gerais	11
	Ações	11
	Análise Estrutural	12
6.2	Forma	17
6.3	Momentos fletores	18
6.4	Deslocamentos (flecha)	20
6.5	Fissuração	21
7	CÁLCULO MANUAL DA FLECHA	22
7.1	Forma	22
7.2	Dados	23

7.3	Cálculo da flecha imediata	23
7.4	Verificação do momento de fissuração	24
7.5	Verificação da rigidez equivalente	25
7.6	Cálculo da flecha imediata no Estádio II	26
7.7	Cálculo da flecha no tempo infinito	26
7.8	Verificação da flecha	27
8	FLECHA REAL	28
9	CONCLUSÃO	28
10	NORMAS / BIBLIOGRAFIA ADOTADAS	29

1 INTRODUÇÃO

A flecha nos projetos estruturais atuais tem sido um fator relevante ao determinar o tipo de estrutura a ser adotada. Isso se deve as grandes tendências do mercado como a utilização de elementos estruturais mais esbeltos e o emprego de vãos livres cada vez maiores.

Diante disso, tornaram-se necessárias análises mais precisas do comportamento das lajes, visto que, problemas de deformações excessivas em uma laje podem causar transtornos para o empreendimento, até mesmo torná-lo inviável.

No entanto, há de se concordar com uma célebre frase do Eng. Zamarion Diniz: *“As flechas não são calculadas, mas sim estimadas! Analisar uma estrutura em serviço não é uma tarefa fácil! Nenhuma exatidão pode ser cobrada das formulações atuais, por mais refinadas que sejam!”*.

Por este raciocínio, há muitos que digam, *“se não há exatidão, porque refinar?”* e há muitos que vão além *“se não há exatidão, quanto mais refinado, melhor será”*.

Ficando este trabalho a favor da análise refinada, vale ressaltar a complexidade que envolve uma avaliação, sendo esta em ELS ou ELU. Para a avaliação de serviço, é conhecido o tamanho dos problemas que os engenheiros sofrem ao confrontar valores estimados em projeto com os valores reais obtidos em campo.

É usual os engenheiros trabalharem com segurança, onde cada um tem o seu critério, uma vez que sabem do tamanho do problema que uma deformação excessiva pode causar.

2 OBJETIVO

Esse trabalho tem como objetivo estudar as flechas de uma laje de uma edificação existente e compará-la com a real, obtida em campo, dando aos métodos adotados veracidade ou não.

3 PROGRAMAS UTILIZADOS

Para a análise estrutural, dimensionamento e detalhamento estrutural foi utilizado o sistema CAD/TQS na versão V17.13.5. Este programa utiliza o método de grelha não linear em sua análise, ou seja, considera a não linearidade física em seu processo.

4 CRITÉRIOS DE PROJETO

4.1 Concreto utilizado - $f_{ck} = 30 \text{ Mpa} = 3,0 \times 10^4 \text{ KN/m}^2$

Resistência: $3,0 \times 10^4 \text{ KN/m}^2$

Módulo de elasticidade secante do concreto: $E_{cs} \geq 26838 \text{ Mpa} = 26838405 \text{ KN/m}^2$

Relação água/cimento: $\leq 0,60$

Aço utilizado: CA 50 e CA 60

4.2 Cobrimentos mínimos

A definição do cobrimento foi feita com base na Classe de Agressividade Ambiental II (Moderada), de acordo com o item 7.4.7 e seus subitens da NBR 6118:2014.

Foi considerado que durante a execução do edifício será feito um rígido controle de qualidade e tolerância de medidas. Deste modo, cabe ao executor da obra a obediência do item 7.4.7.4 da NBR 6118:2014.

A seguir são apresentados os valores dos cobrimentos utilizados para os diversos elementos estruturais existentes no projeto:

- Vigas e pilares: 2,5 cm = 0,025 m
- Lajes: 2,0 cm = 0,02 m

4.3 Sobrecargas

Permanente: $pp + 2,0 \text{ kN/m}^2$ (revestimento/ impermeabilização)

Acidental: $1,0 \text{ kN/m}^2$ (forro)

4.4 Norma em uso

Na análise e dimensionamento foram utilizadas as prescrições indicadas pelas seguintes normas:

NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos;

NBR 6120:1980 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações - Procedimentos;

NBR 8681:2003 - Ações e segurança nas estruturas – Procedimentos.

5 DESENVOLVIMENTO

Foram estudados 2 (dois) métodos de cálculo de flecha de uma laje de um pavimento de uma edificação existente, comparando os resultados com a flecha real, medida no local.

Inicialmente, adotou o software de cálculo TQS, utilizando o grelha não linear e o resultado foi comparado com a flecha calculada manualmente.

A laje em estudo está indicada no desenho abaixo.

6 CÁLCULO DA FLECHA PELO PROGRAMA CAD TQS

Será apresentado o resultado da flecha da Laje L14 (h=22 cm) gerado pelo programa CAD TQS.

6.1 Critérios do programa (Gerenciados)

A seguir são apresentados alguns dos critérios de projeto utilizados.

Critérios gerais

1) Norma em uso

NBR 6118:2014

2) Verificação de fck mínimo

Ativada

3) Verificação de cobrimentos mínimos

Desativada

4) Verificação de dimensões mínimas

Verificadas segundo a ABNT NBR 6118:2014

Ações

1) Separação de cargas permanentes e variáveis

Com separação

2) Caso 1 agrupa outros casos

Casos de 2 a 4

3) Consideração de peso-próprio de lajes

Sim

4) Consideração de peso-próprio de vigas

Sim

5) Ponderadores

a) Ponderador do peso-próprio

1,4

b) Ponderador das demais ações permanentes (CV)

1,4

c) Ponderador das ações variáveis (CV)

1,4

Análise Estrutural

1) Modelo global do edifício

Modelo de vigas e pilares, flexibilizado conforme critérios

2) Trechos rígidos

Método para definir extensão de apoio

(1) em função da altura da viga

Multiplicador da altura da viga para extensão de apoio

(2) 0,3

3) Pórtico espacial

Vigas

(1) Consideração de seção T

Vigas com inércia de seção retangular

(2) Inércia p/ vigas s/ rigidez à torção

100

(3) Fator de engastamento parcial em vigas

1

b) Pilares

(1) Majoração da rigidez axial p/ efeitos construtivos

Considera majoração da rigidez axial

(2) Multiplicador da rigidez axial p/ efeitos construtivos

3

(3) Pilares não-retangulares c/ eixos principais

Calcula.

c) Ligações viga-pilar

(1) Flexibilização de ligações

Sim

(2) Multiplicador de largura de apoio p/ coeficiente de mola

1,5

(3) Divisor de coeficiente de mola

Sim

(4) Offset-rígido

Sim

d) Separação de modelos para ELU e ELS

Sim

e) Modelo ELU

(1) Não-linearidade física p/ vigas

0,4

(2) Não-linearidade física p/ pilares

0,8

(3) Não-linearidade física p/ lajes

0,3

f) Modelo ELS

(1) Não-linearidade física p/ lajes

1

g) Transferência de esforços

(1) Transferência dos esforços de 2ª ordem (GamaZ)

Sim

(2) Transferência de força normal para vigas

Sim

(3) Tolerância p/ transferência de forças das grelhas

0

(4) Tolerância p/ transferência de momentos das grelhas

0

4) Grelha

a) Vigas

(1) Consideração da seção T em vigas

Vigas com inércia de seção retangular

(2) Inércia p/ vigas s/ rigidez à torção

100

(3) Fator de engastamento parcial em vigas

1

b) Apoios (restrições)

(1) Apoio de vigas em pilares

Modelo p/ o apoio de vigas em pilares

Elástico independente

Multiplicador de largura de apoio p/ coeficiente de mola

1

Divisor de coeficiente de mola

4

Modelo p/ o apoio de nervuras em pilares

Sim

Modelo p/ o apoio de lajes maciças em pilares

Sim

c) Lajes maciças (planas)

(1) Divisor de inércia à torção em barras de lajes

4

(2) Consideração de Wood&Armer

Sim

(3) Espaçamento de barras em X

50

(4) Espaçamento de barras em Y

50

(5) Plastificação de barras de lajes apoiadas em vigas

Não

d) Multiplicador p/ deformação lenta

1

5) Grelha não-linear

a) Análise p/ todas combinações ELS

Adota todas combinações ELS definidas

b) Número total de incrementos de carga

12

c) Consideração da fissuração

Considera fissuração à flexão e à torção

d) Consideração da fluência

Correção do diagrama tensão-deformação do concreto pelos coeficientes de fluência.

6.3 Momentos fletores

DIAGRAMA DE MOMENTO FLETOR HORIZONTAL

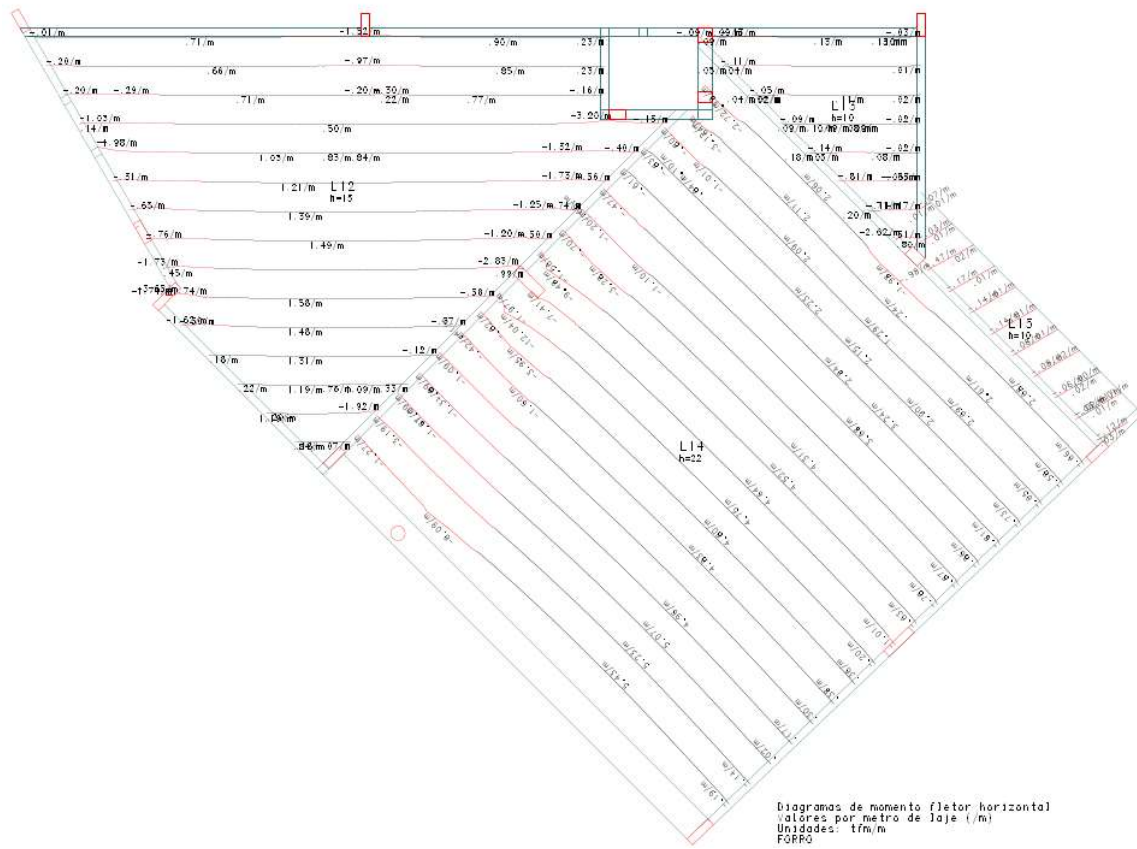


Figura 6.2 – Diagrama de Momento Fletor Horizontal da laje L14 em estudo

DIAGRAMA DE MOMENTO FLETOR VERTICAL

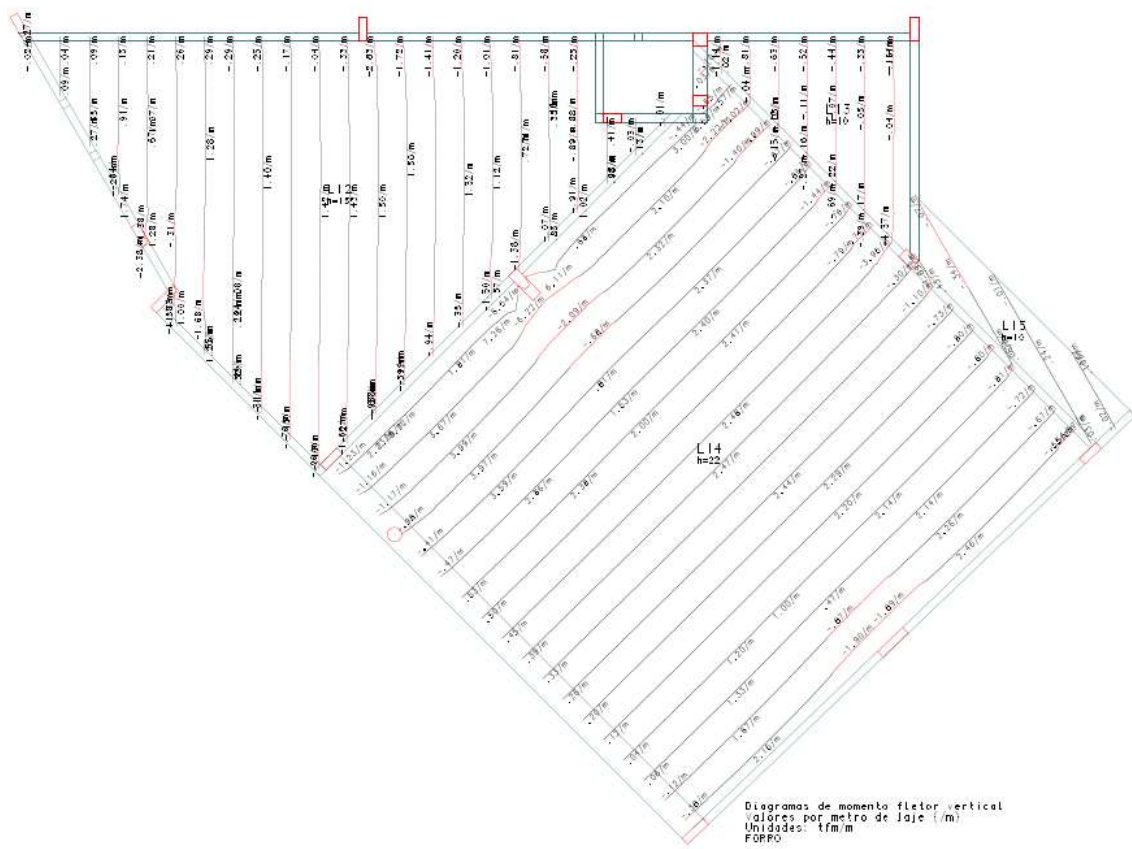


Figura 6.3 – Diagrama de Momento Fletor Vertical da laje L14 em estudo

6.4 Deslocamentos (flecha)

Para a avaliação das deformações do pavimento em serviço, foram realizadas análises considerando a não-linearidade física, onde através de incrementos de carga, as inércias reais das seções são estimadas considerando as armaduras de projeto e a fissuração nos estádios I, II ou III.

O programa TQS nos forneceu uma flecha de 3,64 cm = 0,0364 m.

DEFORMAÇÃO (RIGIDEZ FINAL)

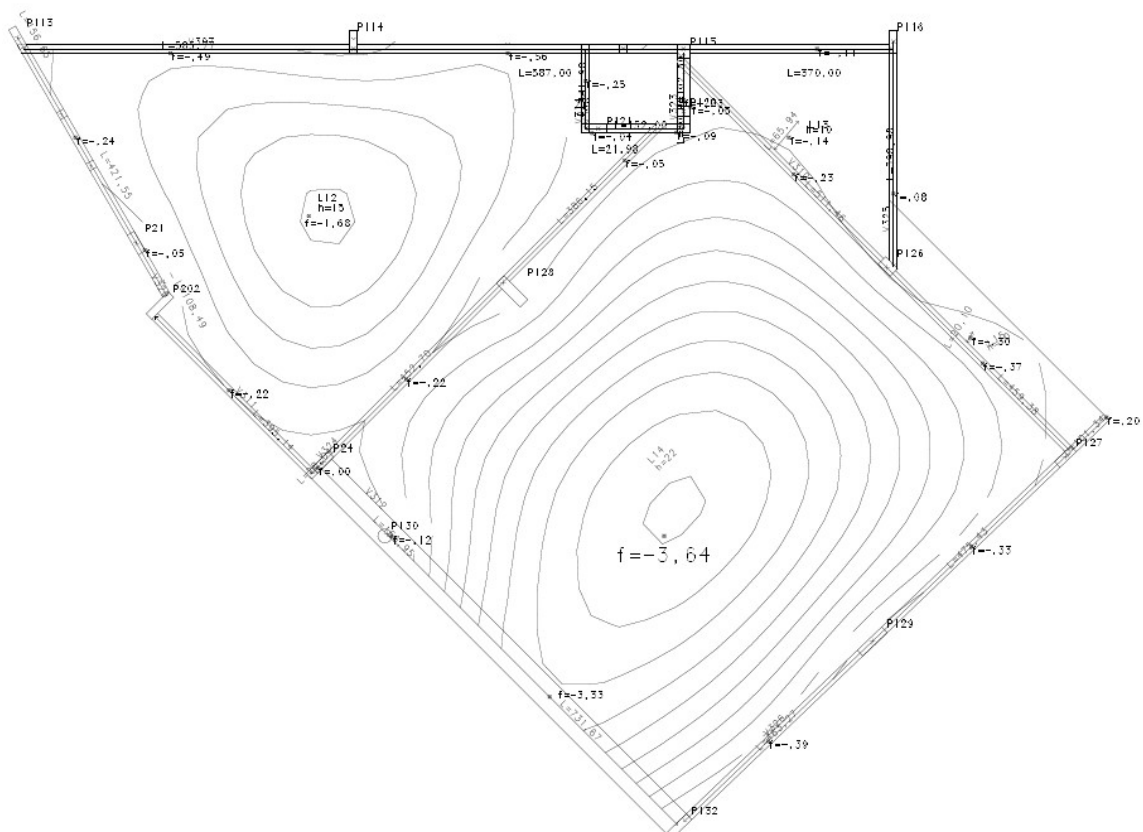


Figura 6.4 – Diagrama de Flechas (deformações) da laje L14 em estudo

Flecha admissível = $914/250 = 3,65 \text{ cm} = 0,0365 \text{ m}$

Pelo cálculo utilizando o software a flecha atuante na laje é menor do que a flecha admissível.

6.5 Fissuração

De acordo com a análise feita pelo programa CAD/TQS a fissuração está dentro do limite admissível.

7 CÁLCULO MANUAL DA FLECHA

Será apresentado o cálculo manual da flecha da Laje L14 (h= 22 cm) maciça.

7.1 Forma

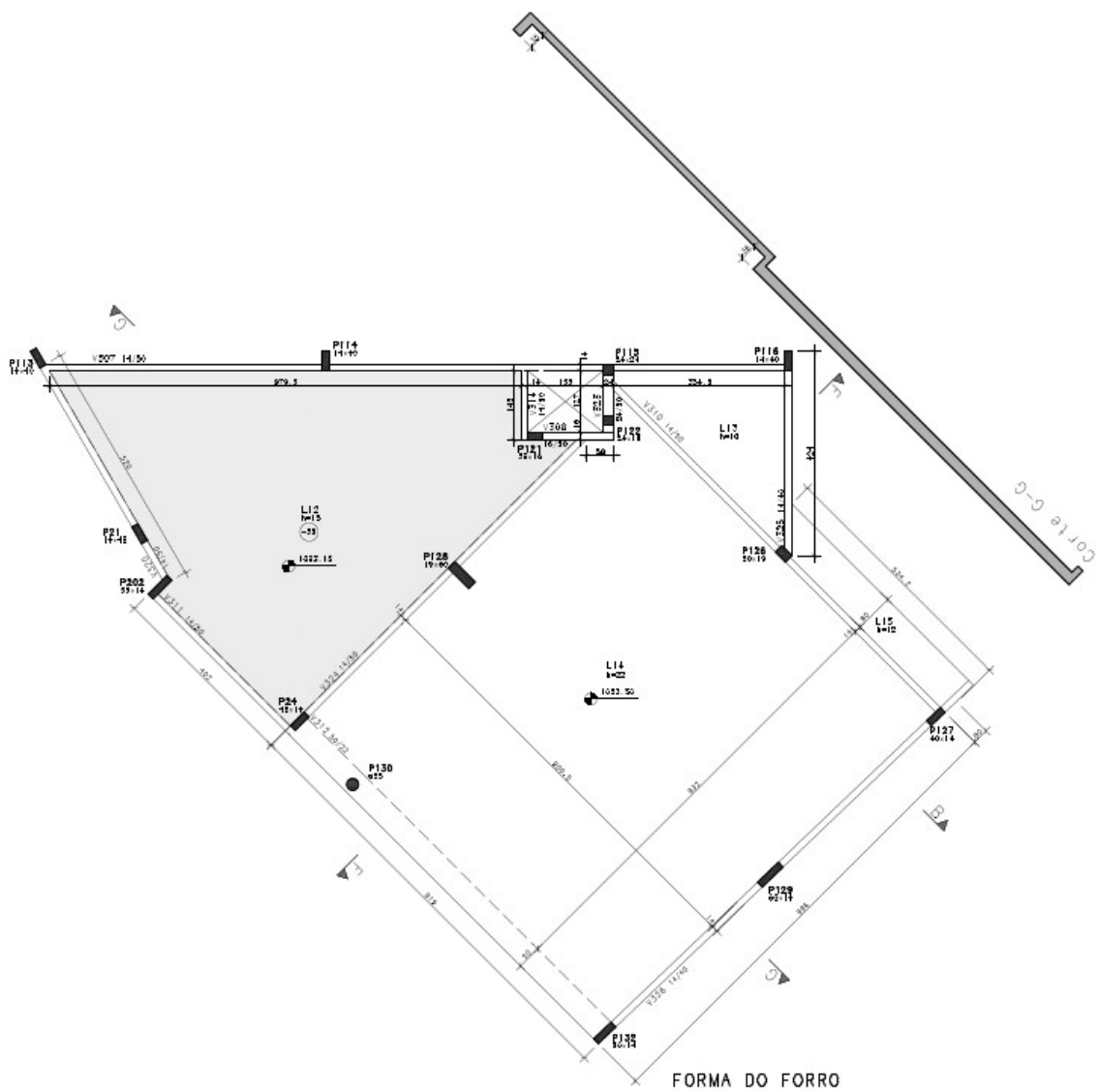
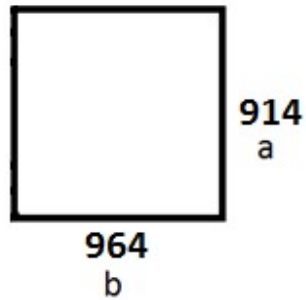


Figura 7.1 – Forma do Forro da edificação residencial existente (Laje L14 em estudo)

7.2 Dados



Medidas da laje: 9,64 m x 9,14 m

Concreto $f_{ck} = 30 \text{ Mpa} = 3,0 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$

Cobrimento = 2,0 cm = 0,02 m

Cargas:

Peso próprio = 5,5 kN/m² (laje com 22 cm de espessura)

Revestimento = 2,0 kN/m² (impermeabilização)

Sobrecarga = 1,0 kN/m² (forro)

7.3 Cálculo da flecha imediata

$$\frac{b}{a} = \frac{9,64}{9,14} = 1,05 \text{ (Laje armada em 2 direções)}$$

Pela combinação quase permanente de serviço, a carga atuante em serviço será:

$$p = 5,5 + 2,0 + (1,0 \times 0,4) = 7,9 \text{ KN/m}^2$$

O valor da flecha imediata é obtido usando a tabela de Tepedino para cálculo de flechas em lajes retangulares, baseada nas tabelas de Bares.

$$f_1 = 0,053$$

$$f_i = \frac{f_1 x (p x a^4)}{E c s x h^3}$$

$$f_i = \frac{0,053 x (7,9 x 9,14^4)}{26838405 x 0,22^3} = 0,0102 \text{ m} = 1,02 \text{ cm}$$

7.4 Verificação do momento de fissuração

$$M_a = 4,83 \text{ t.m/m} = 48,3 \text{ KN.m/m} \quad (\text{Obtido dos esforços gerados pelo CAD TQS})$$

$$M_r = \frac{150 f_{ctm} x h^2}{6}$$

M_a : Momento fletor máximo atuante

M_r : Momento de Fissuração

f_{ctm} : resistência média a tração

h = espessura da laje

$$f_{ctm} = 0,3 (f_{ck})^{\frac{2}{3}} \quad (\text{MPa})$$

$$f_{ctm} = 0,3 (30)^{\frac{2}{3}} = 2,896 \text{ MPa} = 2896 \text{ kN/m}^2 = 0,2896 \text{ kN/cm}^2$$

$$M_r = \frac{150 x 0,2896 x 22^2}{6} = 3504 \text{ kN.cm} = 35,04 \text{ kN.m}$$

$M_a > M_r$ (Laje no estágio II)

7.5 Verificação da rigidez equivalente

$$(EI)_{eq} = Ecs \left(\left(\frac{Mr}{Ma} \right)^3 xIc + \left(1 - \left(\frac{Mr}{Ma} \right)^3 \right) xI_{II} \right)$$

Ecs: módulo de elasticidade secante do concreto

Ic: momento de inércia da seção bruta do concreto

I_{II}: momento de inércia da seção fissurada do concreto no estágio II

Ma: momento fletor máximo atuante

Mr: momento de fissuração

$$Ecs = 0,875 \times 5600 \times \sqrt{30} = 26838 \text{ MPa} = 26838405 \text{ kN/m}^2$$

$$Ic = \frac{100 \times 22^3}{12} = 88733 \text{ cm}^4$$

$$I_{II} = \frac{bxX_{II}^3}{3} + \alpha_e xAsx(d - X_{II})^2$$

$$\alpha_e = \frac{Es}{Ecs} = \frac{21000}{2683} = 7,82$$

$$X_{II} = -A + \sqrt{A^2 + B}$$

$$A = \frac{\alpha_e xAs}{b} = \frac{7,82 \times 9,11}{100} = 0,712$$

$$B = \frac{2x(\alpha_e xAsxd)}{b} = \frac{2x(7,82 \times 9,11 \times 19,5)}{100} = 27,78$$

$$X_{II} = -0,712 + \sqrt{0,712^2 + 27,78} = 4,60$$

$$I_{II} = \frac{100 \times 4,60^3}{3} + 7,82 \times 9,11(19,5 - 4,60)^2$$

$$I_{II} = 19060,57 \text{ cm}^4$$

$$(EI)_{eq} = 2683 \left(\left(\frac{3504}{4830} \right)^3 \times 88733 + \left(1 - \left(\frac{3504}{4830} \right)^3 \right) \times 19060 \right)$$

$$(EI)_{eq} = 122,51 \times 10^6$$

$$EI = 2683 \times 88733 = 238,07 \times 10^6$$

$$\frac{(EI)_{eq}}{EI} = \frac{122,51 \times 10^6}{238,07 \times 10^6} = 0,51$$

7.6 Cálculo da flecha imediata no Estádio II

$$f_i = \frac{1,02}{0,51} = 2,0 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$$

7.7 Cálculo da flecha no tempo infinito

$$f_{\infty} = f_i \times (\alpha_f + 1)$$

$$f_{\infty} = 2,0 \times (1,46 + 1) = 4,92 \text{ cm} = 0,0492 \text{ m}$$

O cálculo manualmente nos forneceu uma flecha de 4,92 cm = 0,0492 m.

7.8 Verificação da flecha

Flecha admissível = $914/250 = 3,65$ cm

Pelo cálculo manual, a flecha atuante na laje é maior do que a flecha admissível. Quando isso acontece é possível dar uma contra-flecha máxima de $L/350 = 914/350 = 2,61$ cm.

Flecha = $4,92 - 2,61 = 2,31 <$ flecha admissível.

8 FLECHA REAL

O valor real da flecha, medida no local, foi de 3,5 cm. Utilizei uma trena comum para fazer a medida do piso até o centro da laje de forro em estudo.

Fecha Real: 3,5 cm = 0,035 m.

9 CONCLUSÃO

A flecha encontrada pelo programa ($f= 3,64$ cm) e calculada manualmente ($f= 4,92$ cm) divergem uma da outra. Isso pode ser explicado pelo fato da laje estar trabalhando no estágio II e também pela grande variabilidade dos parâmetros.

Sabemos que, quando o momento de fissuração é maior que o momento em serviço, apenas parte da laje trabalha no estágio II, próxima ao momento máximo. Por tanto ao calcular manualmente a rigidez equivalente, não levamos isso em consideração. Podendo ser este o motivo da diferença das flechas calculadas.

Define-se, então, que para o cálculo “exato” da rigidez equivalente o melhor é utilizar um software, que considera as seções fissuradas, trabalhando parte da laje no estágio I e parte no estágio II.

A partir dos dois valores calculados, é possível compará-los com o valor real, medido em obra. Este valor, de 3,5 cm, é menor do que o encontrado pelo programa e também menor que o encontrado pelo método manual, e está dentro do limite de deformação em serviço admissível para a laje.

10 NORMAS / BIBLIOGRAFIA ADOTADAS

NBR-6118 / 2014 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.

NBR-8681 / 2003 – Ações e Segurança nas Estruturas.

Apostila do Curso de Especialização em Estruturas – Projeto de Estruturas de Concreto I do
Professore: Ney Amorim Silva.

Biblioteca digital TQS.