

Cálculo de flechas em pavimentos de concreto-armado

O tema deste artigo é o cálculo de flechas em pavimentos de concreto-armado, assunto que vem sendo constantemente abordado e que tem gerado bastante dúvidas em nossa comunidade.

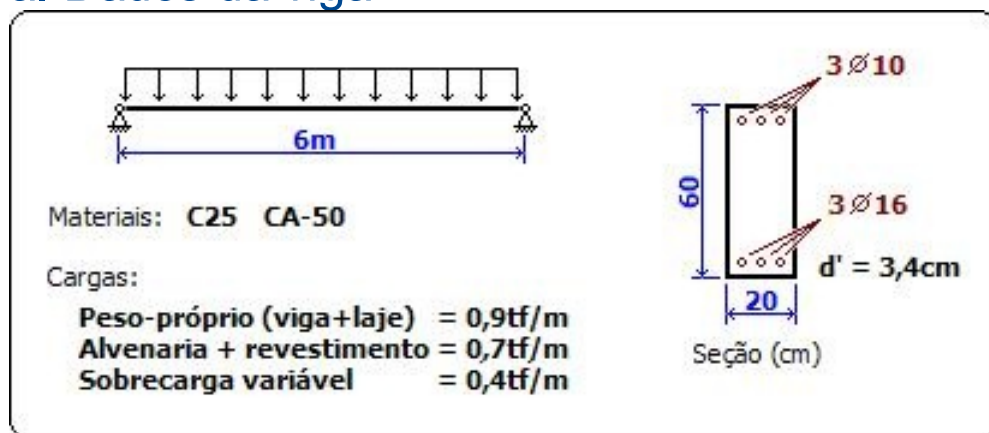
Antes de mais nada, gostaria de enfatizar e reiterar aqui algumas colocações que venho sempre fazendo. As flechas não são calculadas, mas sim estimadas! Analisar uma estrutura em serviço não é uma tarefa fácil! Nenhuma exatidão pode ser cobrada das formulações atuais, por mais refinadas que sejam!

Diante deste ponto de vista, muita gente então poderia até se questionar: "Se as flechas não podem ser calculadas com exatidão, para que me preocupar com elas? Qualquer aproximação grosseira já está de bom tamanho."

Não pretendo, em hipótese alguma, que este raciocínio equivocado se perpetue. Muito pelo contrário! Gostaria que as afirmações servissem de estímulo para que todos aprimorassem seus cálculos cada vez mais, de maneira que as inúmeras patologias existentes em nossos edifícios fossem minimizadas. Análises puramente elásticas devem ser evitadas. Torna-se cada vez mais evidente a importância das análises não-lineares que, sem sombra de dúvidas, passarão a ficar mais comuns no dia-a-dia de um engenheiro estrutural.

Bem, vamos ao que interessa. Apresentarei, de forma resumida, o cálculo de flechas e aberturas de fissuras para uma viga bi-apoiada, analisada tanto por processos aproximados como pela análise não-linear, incluindo a deformação lenta, bem como os efeitos na alvenaria. Utilizarei como base o exemplo já apresentado pelo nosso colega Samuel Pizzetti, a quem agradeço imensamente por ter me fornecido seus dados detalhados.

a. Dados da viga



b. Propriedades dos materiais

$$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 2,6 \text{ MPa}$$

$$E_{cs} = 23.800 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

c. Combinações de serviço (edifício residencial)

$$\text{Quase-permanente (CQP): } 1,72 \text{ tf/m}$$

$$\text{Frequente (CF): } 1,76 \text{ tf/m}$$

d. Momentos fletores no meio do vão ($L/2 = 3,0\text{m}$)

$$M_{CQP} = 7,74\text{tf.m}$$

$$M_{CF} = 7,92\text{tf.m}$$

e. Inércias

Inércia bruta (I_c) = 0,0036 m⁴

Inércia no estágio I com armaduras homogeneizadas (I_1) = 0,0041 m⁴

Inércia no estágio II puro (I_{2p}) = 0,0012 m⁴

Momento de fissuração (M_r) = 4,62 tf.m

Inércia equivalente proposta pela NBR6118:2003 para $M = 7,74$ tf.m (I_{eq}) = 0,0017 m⁴

Estádio	2
Iy (cm4)	1.685E+05
YLN (cm)	14.315
Mr (tf.m)	4.617
My (tf.m)	15.679
Mu (tf.m)	16.020
Ic (cm4)	3.600E+05
I1 (cm4)	4.060E+05
I2p (cm4)	1.169E+05

Inércia calculada

Calcular

Barra: 11

Fechar

f. Coeficiente de fluência proposto pela NBR6118:2003

$t_0 = 0,5$ meses

$t > 70$ meses

$a_f = 1,32$

g. Flechas considerando uma inércia única para toda a viga

Adotando inércia I_c : $f_{t=0} = 0,34$ cm; $f_{inf} = 0,79$ cm

Adotando inércia I_1 : $f_{t=0} = 0,30$ cm; $f_{inf} = 0,70$ cm

Adotando inércia I_{2p} : $f_{t=0} = 1,04$ cm; $f_{inf} = 2,41$ cm (*)

Adotando inércia I_{eq} : $f_{t=0} = 0,72$ cm; $f_{inf} = 1,67$ cm; $f_{após\ construção\ de\ alvenaria} = 0,94$ cm (**)

(*) Trata-se de uma situação irreal na qual todas seções estariam fissuradas. Foi calculada apenas para fins didáticos.

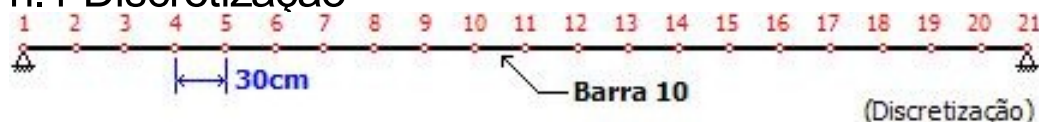
(**) Flecha após a construção da alvenaria = fluência das cargas permanentes + flecha imediata da carga variável reduzida.

h. Análise não-linear

Processado no TQS/Grelha não-linear

20 incrementos de cargas = 9 increm. (pp) + 7 increm. (alv. e revest.) + 4 increm. (variável)

h.1 Discretização



h.2 Fissuração



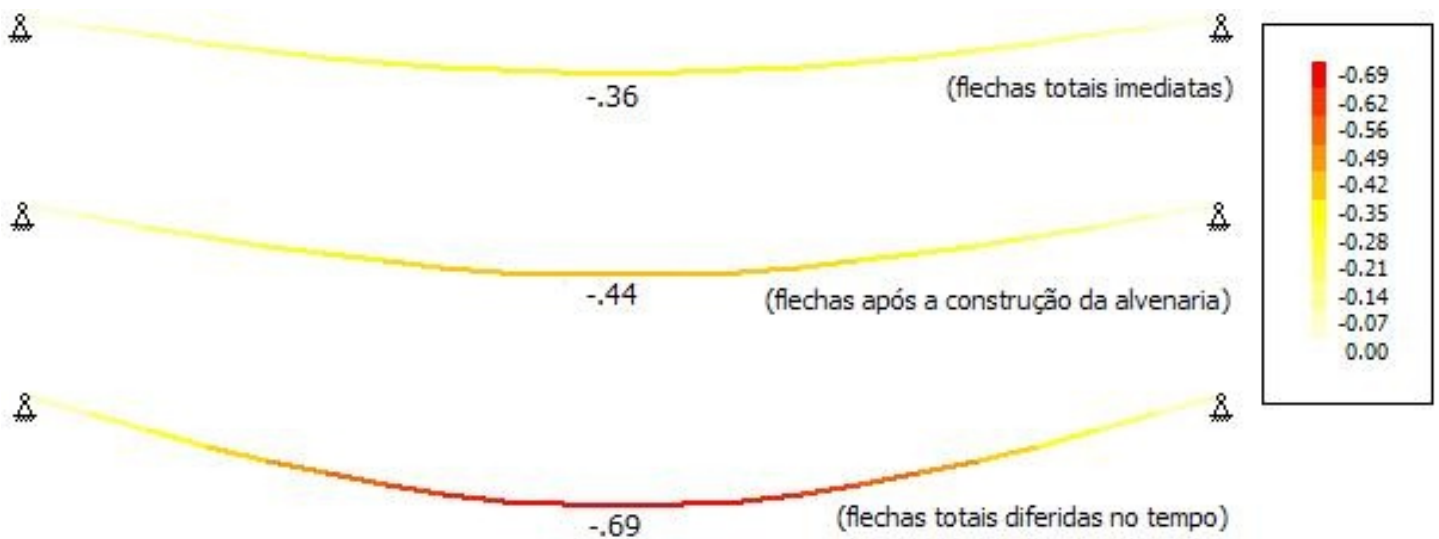
Barra	Incremento	Flexão			Torção		
		ly	Estádio	Variação (%)	Ix	Estádio	Variação (%)
10	.GRE	0.0036000	1	---	0.0012643	1	---
	c/ Armad.	0.0040597	1	13	0.0012643	1	00
	1	0.0040597	1	13	0.0012640	1	00
	2	0.0040597	1	13	0.0012640	1	00
	3	0.0040597	1	13	0.0012640	1	00
	4	0.0040597	1	13	0.0012640	1	00
	5	0.0040597	1	13	0.0012640	1	00
	6	0.0040597	1	13	0.0012640	1	00
	7	0.0040597	1	13	0.0012640	1	00
	8	0.0040597	1	13	0.0012640	1	00
	9	0.0040597	1	13	0.0012640	1	00
	10	0.0040597	1	13	0.0012640	1	00
	11	0.0040597	1	13	0.0012640	1	00
	12	0.0038087	2	06	0.0012640	1	00
	13	0.0030766	2	-15	0.0012640	1	00
	14	0.0026964	2	-25	0.0012640	1	00
	15	0.0024108	2	-33	0.0012640	1	00
	16	0.0021923	2	-39	0.0012640	1	00
	17	0.0020221	2	-44	0.0012640	1	00
	18	0.0018877	2	-48	0.0012640	1	00
19	0.0017801	2	-51	0.0012640	1	00	
20	0.0016930	2	-53	0.0012640	1	00	

Barras: De 1 até 20

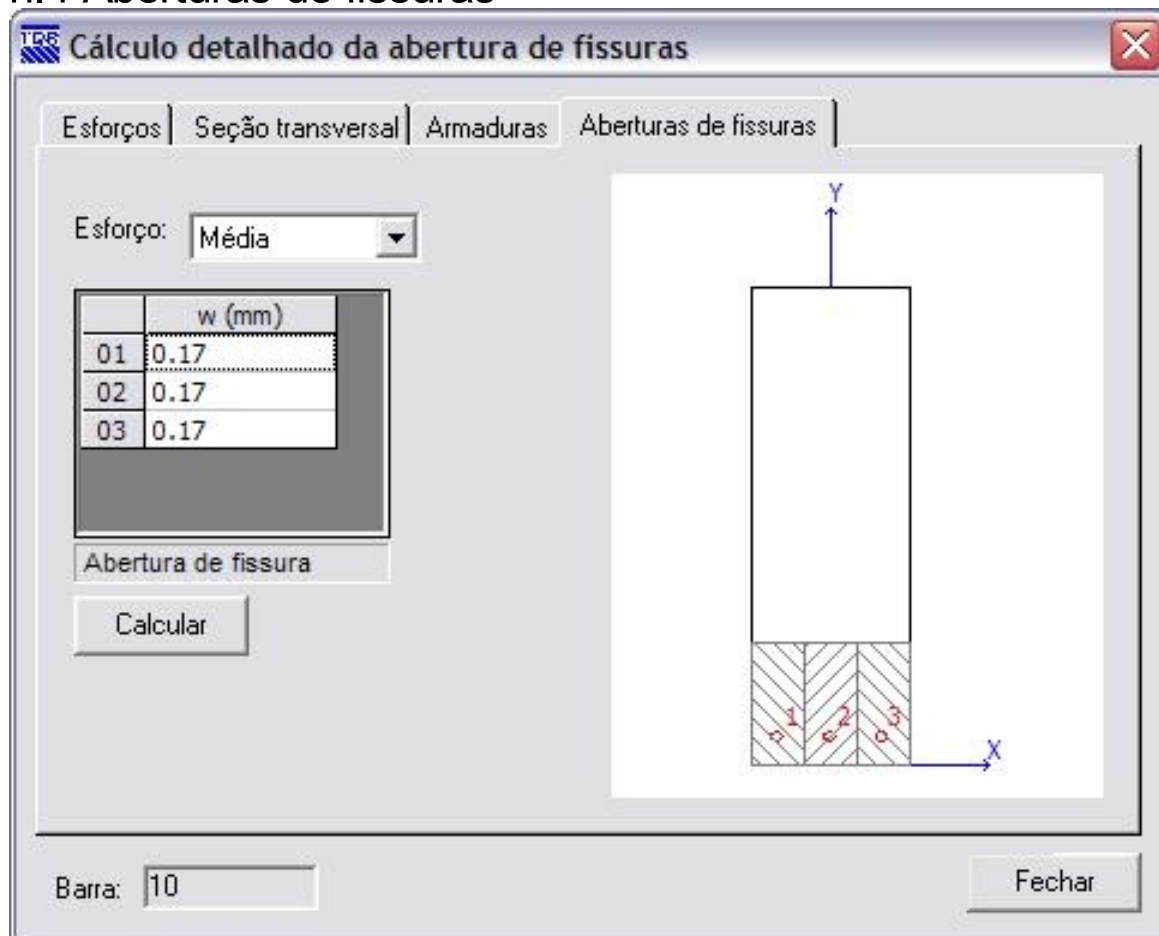
Localizar Barra

Fechar

h.3 Flechas



h.4 Aberturas de fissuras



i. Verificações dos limites de norma

i.1 Aceitabilidade sensorial

Limite ($L/250$) = 2,40 cm

Para inércia I_{eq} única para toda a viga: $f_{inf} = 1,67 \text{ cm} < 2,40 \text{ cm}$ (OK)

Pela análise não-linear: $f_{inf} = 0,69 \text{ cm} < 2,40 \text{ cm}$ (OK)

i.2 Flechas após a construção da alvenaria

Limite ($L/500$) = 1,20 cm $>$ 1,00 cm. Portanto, adota-se 1,00 cm

Limite de rotação = 0,0017 rad

Para inércia I_{eq} única para toda a viga: $f_{\text{após construção de alvenaria}} = 0,94\text{cm} < 1,00\text{cm}$ (OK)

$\varphi_{\text{após construção de alvenaria}} = 0,0016 \text{ rad} < 0,0017 \text{ rad}$ (OK)

Pela análise não-linear: $f_{\text{após construção de alvenaria}} = 0,44 \text{ cm} < 1,00\text{cm}$ (OK)

$\varphi_{\text{após construção de alvenaria}} = 0,0007 \text{ rad} < 0,0017 \text{ rad}$ (OK)

i.3 Aberturas de fissuras

Limite (w_{lim}) = 0,20 mm

Pela análise não-linear: $w_k = 0,17 \text{ mm} < 0,20 \text{ mm}$ (OK)

j. Conclusões

Pela tabela do item h.2, nota-se que o ponto mais solicitado da viga, o meio do vão (barra 10), somente entra no estágio II (fissuração) após a aplicação do 12º incremento. Nos extremos da viga onde os momentos fletores são pequenos, as seções permanecem no estágio I, mesmo após a aplicação da carga total. Isto justifica os valores de flechas maiores obtidos nos processos aproximados, na qual adota-se uma inércia única para toda a viga (item g).

Tanto pela análise aproximada com a inércia I_{eq} única para toda viga, como pela análise não-linear, os valores das flechas e aberturas de fissuras obtidas na viga estão dentro dos limites de norma.

No entanto, fica bem claro que os resultados não-lineares calculados por um processo incremental de cargas, retratam o comportamento em serviço da viga de forma muito mais realista e coerente.

Alio E. Kimura

TQS Informática Ltda.