



PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DE DESLOCAMENTOS DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Mykaell Vieira Noronha

Márcio André Araújo Cavalcante

mykaell93@hotmail.com

marcio.cavalcante@ctec.ufal.br

Universidade Federal de Alagoas - UFAL

Rodovia AL 145, Km 3, Nº 3849, Cidade Universitária, Delmiro Gouveia, Alagoas, Brasil.

Resumo. *Uma correta avaliação dos deslocamentos de vigas de concreto armado, assim como uma análise prévia da região de fissuração do concreto tracionado, são informações importantes para o projeto de estruturas de concreto armado. No entanto, estas análises necessitam de um maior grau de sofisticação, devido a fatores complicadores, como a heterogeneidade do concreto armado e o comportamento frágil do concreto na tração. A NBR 6118/2014 propõem o emprego de fórmulas simplificadas para o cálculo da flecha imediata de vigas de concreto armado. Estas fórmulas apresentam um caráter semi-empírico, e estão sujeitas a erros quando aplicadas a vigas com condições de carregamento e de vinculação diferentes daquelas utilizadas nos trabalhos experimentais nos quais elas se baseiam. Neste trabalho, propõe-se um procedimento puramente teórico para avaliação destes deslocamentos, onde são adotadas as considerações ou restrições cinemáticas da teoria de vigas de Euler-Bernoulli. Além disso, admitindo-se um comportamento quase-estático do carregamento, propõe-se um procedimento incremental, onde a região de fissuração do concreto tracionado evolui durante a análise. Desta forma, além de permitir a avaliação das deflexões de uma viga de concreto armado considerando a sua heterogeneidade e o comportamento frágil do concreto na tração, este procedimento também permite estimar a região de fissuração do concreto tracionado. Os deslocamentos obtidos por este procedimento são comparados com os valores avaliados pelas fórmulas recomendadas pela NBR 6118/2014 e com os deslocamentos determinados pelo método da seção transversal equivalente. Por fim, estes deslocamentos também são comparados com resultados experimentais, mostrando uma melhor concordância do procedimento proposto com os resultados obtidos experimentalmente.*

Palavras-chave: *Vigas de concreto armado, NBR 6118/2014, Flecha imediata, Teoria de vigas de Euler-Bernoulli, Método da seção transversal equivalente.*

1 INTRODUÇÃO

O constante crescimento demográfico somado a outras demandas das necessidades humanas, acarretaram em um aumento excessivo de obras da construção civil. Nesse cenário, nota-se que o material preponderantemente utilizado para tais construções é o concreto armado. Segundo Andrade (2006), o concreto armado é o segundo recurso mais utilizado mundialmente, sobretudo devido ao seu amplo grau de aceitabilidade global e disponibilidade dos materiais constituintes.

Diante do exposto, frisa-se que esta ampla utilização do concreto armado fomentou diversos estudos do seu comportamento estrutural, a saber, estudo do fenômeno de fissuração, balanceamento dos seus constituintes, deslocamentos imediatos e fluência em vigas, dentre outros. Nesse quadro, vale destacar que os deslocamentos imediatos merecem particular atenção devido à sua importância quando do dimensionamento dos elementos estruturais. Estes deslocamentos das vigas de concreto armado devem ser bem estimados e entendidos, pois os mesmos afetam diretamente a estética da construção, confiabilidade dos usuários e principalmente a integridade da estrutura.

Nestes moldes, ressalta-se que o dimensionamento de vigas de concreto armado no Brasil é feito empregando-se métodos tradicionais delineados pela NBR 6118/2014. Estes métodos propõem o emprego de fórmulas simplificadas para o cálculo da flecha imediata de vigas de concreto armado, como é o caso da fórmula baseada na rigidez equivalente da viga fissurada, como proposto por Branson (1968). Estas fórmulas apresentam um caráter semi-empírico, e estão sujeitas a erros quando aplicadas a vigas com condições de carregamento e de vinculação diferentes daquelas utilizadas nos trabalhos experimentais nos quais elas se baseiam.

Com base nessas informações, explicita-se a necessidade de uma abordagem mais geral e sofisticada deste fenômeno. Assim sendo, este trabalho propõe um modelo puramente teórico para a análise de deslocamentos imediatos em vigas de concreto armado. Neste modelo, são adotadas as hipóteses cinemáticas da teoria de vigas de Euler-Bernoulli, além de admitir-se um comportamento quase-estático do carregamento, o que permite desprezar os seus efeitos inerciais ou dinâmicos. Com este intuito, o modelo proposto emprega um procedimento puramente incremental, no qual o carregamento e a região de fissuração do concreto tracionado evoluem gradativamente durante a análise.

Portanto, objetiva-se o desenvolvimento de um método sistemático para análise de deslocamentos imediatos de vigas de concreto armado, no qual são levados em consideração a heterogeneidade do material e o comportamento frágil do concreto na tração. A partir deste procedimento, pretende-se encontrar uma superfície delimitadora da região de fissuração do concreto tracionado. Por fim, compara-se os resultados dos deslocamentos obtidos pelo modelo proposto com valores avaliados pelas fórmulas recomendadas pela NBR 6118/2014 e pelo método da seção transversal equivalente, empregando-se como valores de referência resultados obtidos experimentalmente. A partir desta comparação, verifica-se um melhor desempenho do modelo proposto, por ter apresentado uma melhor aproximação com os valores obtidos experimentalmente.

2 PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DE DESLOCAMENTOS DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

A seguir, detalha-se três métodos para avaliação de deslocamentos imediatos de vigas de concreto armado. Os dois primeiros são procedimentos propostos pela

resistência dos materiais e pela NBR 6118/2014, respectivamente, enquanto o terceiro consiste no modelo proposto neste trabalho.

2.1 Método da seção transversal equivalente

O deslocamento vertical de vigas acontece devido a carregamentos transversais ao seu eixo longitudinal, onde a representação deste eixo deformado é denominada na resistência dos materiais de linha elástica.

De acordo com Hibbeler (2002), a linha elástica de uma viga é denominada de v e varia com o coordenada longitudinal (x), diz-se, portanto, que v é uma função de x . A partir do emprego das hipóteses cinemáticas de Euler-Bernoulli, e admitindo-se um comportamento elástico linear do material, chega-se na relação curvatura-momento fletor, como mostrado abaixo:

$$\kappa(x) = \frac{d^2v}{dx^2}(x) = \frac{M(x)}{EI} \quad (1)$$

onde $\kappa(x)$ representa a curvatura do eixo deformado da viga, $M(x)$ o momento fletor interno da viga, E o módulo de elasticidade do material e I o momento de inércia da viga calculado em torno do seu eixo neutro.

A Eq. 1 define genérica e implicitamente a linha elástica de uma viga como uma função de x . Para se obter a linha elástica de forma explícita, são necessárias integrações sucessivas, onde as constantes de integração são encontradas a partir da imposição das condições de contorno. Além disso, $M(x)$ depende diretamente das condições de carregamento na viga.

Outra observação importante acerca desta formulação consiste no fato da mesma considerar o material homogêneo. Como se sabe, o concreto armado não é um material homogêneo, assim, os deslocamentos não poderiam ser avaliados a partir desta formulação. No método da seção transversal equivalente, a área de aço (A_s) é transformada em uma área equivalente de concreto, utilizando o fator de transformação $n = E_s/E_{cs}$, onde E_s e E_{cs} são os módulos de elasticidade do aço e do concreto, respectivamente. Desta forma, a abordagem acima pode ser empregada utilizando uma seção transversal equivalente de concreto, onde a área transformada de aço seria igual a nA_s . No mais, esta abordagem desconsidera a capacidade do concreto de suportar a tração, portanto, os esforços de tração atuantes abaixo da linha neutra são suportados apenas pela seção transformada de aço.

2.2 Método simplificado recomendado pela NBR 6118/2014

Inicialmente, deve-se mencionar que a NBR 6118/2014 define três estádios de deformação de uma viga de concreto armado. Estes estádios são definidos da seguinte forma:

Estádio I – estágio no qual a tensão de tração no concreto não ultrapassa sua respectiva resistência à tração. Este estágio é denominado também de estado elástico. Além disso, neste estágio não há fissuras visíveis.

Estádio II – estágio no qual a tensão de tração terá valor superior ao da resistência característica do concreto à tração. Neste estágio, considera-se que apenas o aço resiste aos esforços de tração. Afora, a viga apresenta fissuras de tração visíveis.

Estádio III – corresponde ao estado limite último, que ocorre em situações de ações extremas.

Para calcular os deslocamentos verticais por este método, utiliza-se um modelo proposto por Branson (1968), que consiste em um procedimento semiprobabilístico, onde um valor médio para o momento de inércia é avaliado a partir de uma expressão empírica, como mostrado a seguir:

$$I_m = \left(\frac{M_r}{M_{at}}\right)^n I_I + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{at}}\right)^n\right] I_{II} \quad (2)$$

onde I_m é o momento de inércia efetivo para uma seção ou para toda a peça, I_I é o momento de inércia da peça no estágio I, I_{II} é o momento de inércia da peça no estágio II puro, M_r é o momento de fissuração do concreto, M_{at} é o momento atuante de serviço na seção mais solicitada, e n é o índice que pode valer 3 ou 4, a depender da análise.

Para o cálculo da rigidez à flexão equivalente de uma viga de concreto armado, a NBR 6118/2014 fez uma adaptação da formula de Branson (1968), chegando à seguinte expressão:

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

onde I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto, I_{II} é o momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II, M_a é o momento fletor na seção crítica do vão considerado, M_r é o momento de fissuração do elemento estrutural, e E_{cs} é o módulo de elasticidade secante do concreto.

Para a avaliação da resistência à compressão do concreto, de acordo com a NBR 6118/2014, é preciso realizar uma certa quantidade de ensaios com corpos de prova. Como os experimentos apresentam valores dispersos, é adotada uma medida estatística que leva em consideração a média aritmética e o desvio padrão. Dessa forma, baseando-se na curva probabilística de Gauss, o valor que apresenta 95% de confiabilidade dos ensaios é considerado como a resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}).

A resistência à tração do concreto pode ser obtida por meio de três tipos de ensaios: flexo-tração ($f_{ct,f}$); compressão diametral ($f_{ct,sp}$); e tração direta (f_{ct}), segundo a NBR 12142:2010, a NBR 7222:2011 e a NBR 6118/2014, respectivamente. De acordo com a NBR 6118/2014, na falta de ensaios de resistência à tração do concreto, pode-se estimar o seu valor médio utilizando a expressão abaixo para concretos até a classe C50.

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3}, \text{ onde } f_{ck} \text{ deve ser utilizado em MPa.} \quad (4)$$

Segundo a NBR 6118/2014, o momento de fissuração pode ser calculado como segue:

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct,m} I_c}{y_t} \quad (5)$$

sendo $\alpha = 1,2$ para seções em forma de T ou duplo T, $\alpha = 1,3$ para seções I ou T invertido, $\alpha = 1,5$ para seções retangulares e y_t a distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada.

O deslocamento vertical imediato máximo para vigas de concreto armado pode ser avaliado pela expressão abaixo, que consiste na equação da resistência dos materiais para uma seção transversal constante ao longo da peça.

$$v = \frac{\alpha_c M_a L^2}{(E_{cs} I)_{eq}} \quad (6)$$

onde L é o vão da viga e α_c é o coeficiente que depende da condição estática do sistema considerado e do tipo de ações atuantes.

Vale ressaltar que, para o cálculo dos deslocamentos verticais, a NBR 6118/2014 desconsidera a capacidade do concreto de suportar a tração para o estágio II, enquanto que considera esta capacidade no estágio I. No mais, a NBR 6118/2014 sugere dois procedimentos diferentes para o cálculo do momento de inércia da seção bruta de concreto I_c . No primeiro despreza-se a área de aço, e no segundo a área de aço é transformada em área equivalente de concreto. Este trabalho empregou estas duas abordagens.

2.3 Método proposto baseado na determinação da região de fissuração

Neste método, supõe-se que as hipóteses cinemáticas de Euler-Bernoulli são válidas, o que resulta numa variação linear da deformação normal (ε_{xx}) ao longo da altura da viga (y):

$$\varepsilon_{xx}(y) = -\left(\frac{d^2 v}{dx^2}\right)y = -\kappa(x)y \quad (7)$$

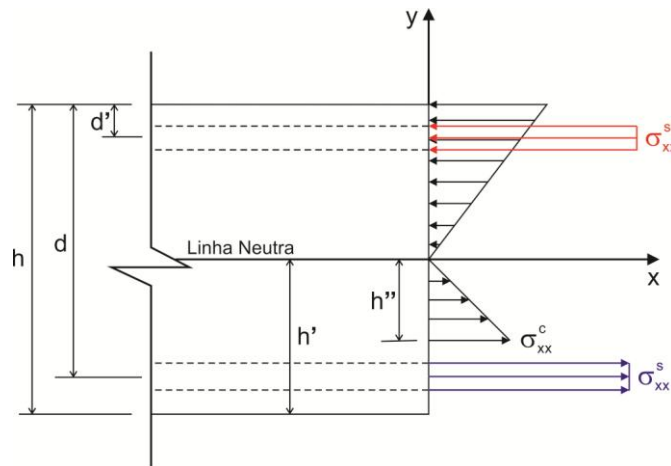


Figura 1. Diagrama de tensões na seção transversal da viga.

Como a viga de concreto armado é um elemento heterogêneo, no cálculo do esforço normal resultante (F_x), deve-se considerar as diferentes distribuições de tensão em cada área de material que compõem a seção transversal, Fig. 1, como mostrado a seguir:

$$F_x = \int_A \sigma_{xx} dA = \int_{A_c} \sigma_{xx}^c dA + \int_{A_{s'}} \sigma_{xx}^{s'} dA + \int_{A_s} \sigma_{xx}^s dA \quad (8)$$

onde A_c é a área de concreto não fissurado, $A_{s'}$ e A_s são as áreas de aço das armaduras superior e inferior, respectivamente, σ_{xx}^c é a tensão normal no concreto não fissurado, $\sigma_{xx}^{s'}$ e σ_{xx}^s são as tensões normais nas armaduras superior e inferior, respectivamente.

Para o cálculo do esforço normal resultante, Eq. 8, são consideradas as seguintes distribuições de tensão:

$$\sigma_{xx}^c = -E_{cs}\kappa(x)y; \quad \sigma_{xx}^s = E_s\kappa(x)[h' - (h - d)]; \quad \sigma_{xx}^{s'} = -E_s\kappa(x)[h - (h' + d')] \quad (9)$$

onde E_s e E_{cs} são os módulos de elasticidade do aço e o módulo de elasticidade secante do concreto, respectivamente, h é a altura da seção transversal, h' representa a posição da linha neutra em relação a superfície inferior da viga, e d e d' posicionam as armações inferior e superior, respectivamente.

Desta forma, chega-se na seguinte expressão para o esforço normal resultante:

$$F_x = \kappa(x) \left\{ -\frac{1}{2} E_{cs} b [h^2 - 2hh' + h'^2 - h''^2] - E_s [h - (h' + d')] A_{s'} + E_s [h' - (h - d)] A_s \right\} \quad (10)$$

onde h'' delimita a região não fissurada de concreto abaixo da linha neutra.

Uma das principais características desse modelo é a consideração de toda a área de concreto íntegro na distribuição de tensão, ou seja, este método considera a contribuição do concreto na região tracionada da viga, desde que o mesmo não se encontre fissurado.

Assumindo-se um esforço normal resultante nulo, $F_x = 0$, chega-se nas seguintes expressões para a posição da linha neutra:

$$h' = \frac{E_{cs} b h^2 / 2 + E_s A_s (h - d) + E_s A'_s (h - d')}{E_{cs} b h + E_s (A_s + A'_s)}, \text{ no caso do concreto íntegro, ou seja, } h'' \geq h'. \quad (11)$$

$$h' = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \text{ no caso do concreto fissurado, ou seja, } h'' < h'. \quad (12)$$

Onde $A = -E_{cs} b / 2$, $B = E_{cs} b h + E_s (A_s + A'_s)$, $C = -E_{cs} b [h^2 - (h'')^2] / 2 - E_s A_s (h - d) - E_s A'_s (h - d')$ e b é a base da seção transversal da viga.

Considerando uma distribuição linear da deformação normal, Eq. 7, e a resistência do concreto obtida do ensaio de tração direta ($f_{ct,m}$), pode-se chegar nas seguintes expressões para a deformação limite do concreto na tração:

$$\varepsilon_{LIM(T)} = \kappa(x) h'' = \frac{f_{ct,m}}{0,67 E_{cs}} \quad (13)$$

Ressalta-se que o fator 0,67 foi introduzido na Eq. 13 com o intuito de converter a resistência do concreto obtida no ensaio de tração direta para a resistência à tração na flexão para vigas de concreto armado. O item 8.2.5 da NBR 6118/2014 recomenda utilizar o fator de conversão 0,7 para vigas de concreto sem a presença de armaduras, no entanto, o valor de 0,67 foi o que melhor se ajustou aos resultados experimentais apresentados na próxima seção. A partir da Eq. 13, pode-se obter a seguinte expressão para h'' :

$$h'' = \frac{f_{ct,m}}{0,67 \kappa(x) E_{cs}} \quad (14)$$

Da mesma forma que foi feito para o esforço normal resultante, deve-se avaliar o momento fletor resultante na seção transversal da viga:

$$M(x) = \int_{A_c} -y \sigma_{xx}^c dA + \int_{A_{s'}} -y_{s'} \sigma_{xx}^{s'} dA + \int_{A_s} -y_s \sigma_{xx}^s dA \quad (15)$$

Utilizando-se as distribuições de tensão mostradas na Eq. 9, obtém-se a seguinte expressão para o momento fletor interno ao longo da viga:

$$M(x) = \kappa(x) \left\{ \frac{1}{3} E_{cs} b [(h - h')^3 + (h'')^3] + E_{s'} (h - h' - d')^2 A_{s'} + E_s (h - h' - d)^2 A_s \right\} \quad (16)$$

Assim sendo, avalia-se a curvatura em função do momento fletor interno como segue:

$$\kappa(x) = \frac{M(x)}{E_{cs}b \left[(h - h')^3 + (h'')^3 \right] / 3 + E_s A_s (h - h' - d)^2 + E_s A'_s (h - h' - d')^2} \quad (17)$$

De posse da curvatura $\kappa(x)$, pode-se obter a inclinação $\theta(x)$ e, posteriormente, o deslocamento vertical $v(x)$. No entanto, devido a complexidade das expressões apresentadas acima, não foi possível resolver este problema de contorno analiticamente, logo, optou-se pelo Método de Euler Melhorado (Valle, 2012). Este método consiste na discretização do domínio de análise em n pontos $(x_0, x_1, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_{n-1}, x_n)$, e na determinação do valor da inclinação θ_{i+1} a partir do valor da inclinação no ponto anterior (θ_i), partindo-se de um valor para a inclinação (θ_0) previamente conhecido. A expressão utilizada por este método para avaliar as inclinações é a seguinte:

$$\theta_{i+1} \approx \theta_i + (x_{i+1} - x_i) \frac{\kappa_i + \kappa_{i+1}}{2} \quad (18)$$

Da mesma forma, a partir dos valores da inclinação, pode-se determinar os deslocamentos verticais:

$$v_{i+1} \approx v_i + (x_{i+1} - x_i) \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2} \quad (19)$$

No mais, ressalta-se que a utilização da formulação proposta depende do emprego de um procedimento incremental, onde o carregamento é aplicado gradativamente, e supõe-se que o concreto encontra-se íntegro no início da análise, ou seja, $h'' \geq h'$. No final de cada passo incremental, avalia-se h'' utilizando-se a Eq. 14, e emprega-se este valor calculado para h'' no passo seguinte.

Para os deslocamentos avaliados na próxima seção utilizando-se o modelo proposto, foram realizados estudos de convergência visando-se a determinação do número de pontos do domínio discretizado de análise e do número de passos do procedimento incremental, com o intuito de obter resultados com um nível de precisão satisfatório.

3 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Nesta seção, compara-se os resultados obtidos pelos métodos apresentados nas seções anteriores com resultados experimentais de deflexões em vigas obtidas por Baroni (2003), Gilbert e Nejadi (2004) e Simonetti (2008).

3.1 Vigas ensaiadas por Baroni (2003)

Baroni (2003) moldou seis vigas de mesmas dimensões e as submeteu a carregamentos iguais aos mostrados na Fig. 2, mudando somente as propriedades mecânicas do concreto. As vigas de nomenclaturas VT são denominadas de Viga Testemunho, as quais o concreto foi confeccionado com cimento Portland Comum. Em contrapartida, as vigas com terminologia VB e VA são aquelas cujo concreto foi confeccionado com cimento Branco e de Alta Resistência, respectivamente.

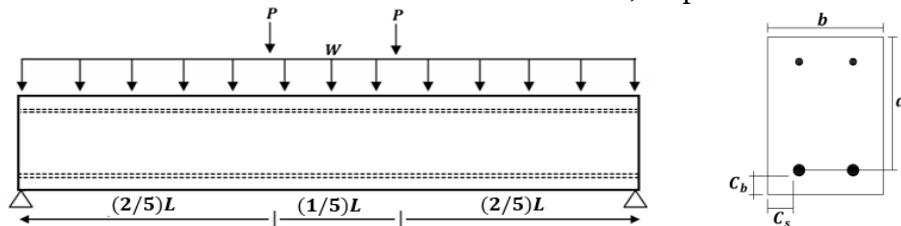


Figura 2. Carregamento e detalhamento transversal das vigas de Baroni (2003).

Tabela 1. Comparativo das deflexões imediatas para as vigas de Baroni (2003).

VIGA	F_l Experimental	NBR 6118/2014				Método da Seção Transversal Equivalente		Método Proposto	
		Seção Não Homogeneizada para o Estádio I		Seção Homogeneizada para o Estádio I		F_l		F_l	
		F_l	Erro Relativo Percentual	F_l	Erro Relativo Percentual				
VT1	1,61	1,56	3,11	1,35	16,15	3,38	109,94	2,70	67,70
VT2	1,60	1,84	15,00	1,56	2,50	3,48	117,50	2,80	75,00
VB1	0,52	0,75	44,23	0,62	19,23	3,37	548,08	0,61	17,31
VB2	0,44	0,35	20,45	0,30	31,82	3,25	638,64	0,49	11,36
VA1	0,38	0,08	78,95	0,07	81,58	3,10	715,79	0,36	5,26
VA2	0,62	0,10	83,87	0,09	85,48	3,14	406,45	0,40	35,48
Erro Relativo Percentual Médio		40,93		39,46		422,73		35,35	

Ao examinar a Tabela 1, nota-se que os resultados obtidos pelo método proposto se aproximam dos valores encontrados pela NBR 6118/2014 para algumas vigas. O método proposto e o método da NBR 6118/2014 apresentaram erro relativo percentual médio (ERPM) de 35,35% e 39,46%, respectivamente. Por fim, o Método da Seção Transversal Equivalente apresentou resultados bastante divergentes dos obtidos experimentalmente, apresentando um ERPM de 422,73%.

3.2 Vigas ensaiadas por Gilbert e Nejadi (2004)

Gilbert e Nejadi (2004) moldaram seis vigas e analisaram a deflexão imediata e a deferida no tempo ao submetê-las a duas cargas concentradas equidistantes no terço médio do vão, conforme Figura 3. Os aspectos dimensionais da seção transversal, as propriedades mecânicas dos materiais e a intensidade das cargas variam entre as vigas ensaiadas.

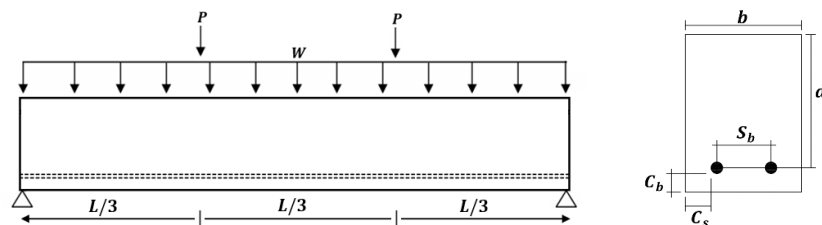


Figura 3. Carregamento e detalhamento transversal das vigas de Gilbert e Nejadi (2004).

Tabela 2. Comparativo das deflexões imediatas para as vigas de Gilbert e Nejadi (2004).

VIGA	F_l Experimental	NBR 6118/2014				Método da Seção Transversal Equivalente		Método Proposto	
		Seção Não Homogeneizada para o Estádio I		Seção Homogeneizada para o Estádio I		F_l		F_l	
		F_l	Erro Relativo Percentual	F_l	Erro Relativo Percentual				
B1-a	4,9	3,82	22,04	3,26	33,47	4,27	12,86	5,78	17,96
B1-b	2,0	1,50	25,00	1,17	41,50	2,71	35,50	2,06	3,00
B2-a	5,0	4,61	7,80	3,97	20,60	4,26	14,80	5,86	17,20
B2-b	2,1	1,94	7,62	1,47	30,00	2,71	29,05	1,97	6,19
B3-a	5,8	5,98	3,10	5,55	4,31	4,25	26,72	6,25	7,76
B3-b	2,0	2,04	2,00	1,48	26,00	2,39	19,50	2,08	4,00
Erro Relativo Percentual Médio		11,26		25,98		23,07		9,35	

Ao examinar a Tabela 2, constata-se que o método proposto forneceu resultados mais próximos dos valores experimentais, apresentando um ERPM de 9,35%. O método da NBR 6118/2014 também forneceu valores próximos dos experimentais, apresentando um ERPM de 11,26%. Por fim, o Método da Seção Transversal Equivalente apresentou os resultados mais divergentes, com um ERPM de 23,07%.

3.3 Vigas ensaiadas por Simonetti (2008)

Simonetti (2008) realizou ensaio em seis vigas, sendo duas delas moldadas em concreto convencional (CCV) e as outras quatro moldadas em concreto auto adensável (CAA). As vigas apresentam as mesmas proporções dimensionais. O carregamento consiste de uma força concentrada (P) de 5,5 kN no centro do vão e um carregamento distribuído (W) de 0,45 kN/m. A Figura 4 ilustra o carregamento e o detalhamento da seção transversal.

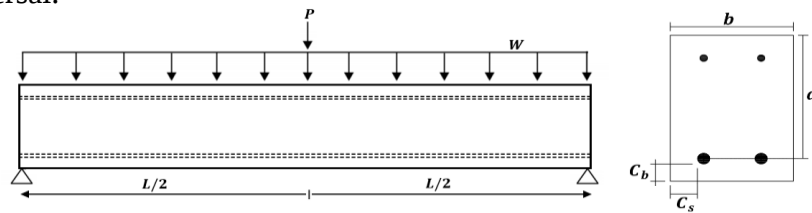


Figura 4. Carregamento e detalhamento transversal das vigas de Simonetti (2008).

Tabela 3. Comparativo das deflexões imediatas para as vigas de Simonetti (2008).

VIGA	F_i Experimental	NBR 6118/2014				Método da Seção Transversal Equivalente		Método Proposto	
		Seção Não Homogeneizada para o Estádio I		Seção Homogeneizada para o Estádio I					
		F_i	Erro Relativo Percentual	F_i	Erro Relativo Percentual	F_i	Erro Relativo Percentual	F_i	Erro Relativo Percentual
CCV-V1	3,08	1,32	57,14	1,16	62,34	4,60	49,35	1,55	49,68
CCV-V2	2,25	1,32	41,33	1,17	48,00	4,58	103,56	1,69	24,89
CAA55-V1	2,39	1,30	45,61	1,15	51,88	4,56	90,79	1,73	27,62
CAA55-V2	2,63	1,61	38,78	1,43	45,63	4,59	74,52	2,35	10,65
CAA60-V1	2,28	1,19	47,81	1,04	54,39	4,60	101,75	2,36	3,51
CAA60-V2	2,79	0,97	65,23	0,87	68,82	4,50	61,29	2,16	22,58
Erro Relativo Percentual Médio			49,32		55,18		80,21		23,15

Ao examinar a Tabela 3, nota-se que o método proposto forneceu os resultados mais próximos dos valores experimentais, apresentando um ERPM de 23,15%. O método da NBR 6118/2014, em contrapartida, apresentou um resultado mais discrepante, fornecendo um ERPM de 49,32%. Finalmente, o Método da Seção Transversal Equivalente apresentou resultados mais divergentes dos obtidos experimentalmente, com um ERPM de 80,21%.

Vale ressaltar, que para as análises apresentadas nesta seção, utilizou-se o módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs}) no dia da aplicação da carga para todas as vigas analisadas. Os valores do E_{cs} foram estimados experimentalmente pelos autores utilizando-se amostras do concreto empregado na confecção das vigas.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho abordou um procedimento inovador para avaliação dos deslocamentos verticais em vigas de concreto armado. Em suma, os métodos tradicionais utilizam-se de fórmulas simplificadas que apresentam um caráter semi-empírico e estão sujeitas a

erros quando aplicadas à vigas com condições de carregamento e de vinculação diferentes daquelas utilizadas nos trabalhos experimentais nos quais elas se baseiam.

Neste sentido, este trabalho propõe uma abordagem teórica para avaliação dos deslocamentos verticais, objetivando um procedimento mais genérico no que diz respeito às condições de carregamento. Para tanto, empregou-se um procedimento incremental, onde o carregamento é aplicado gradativamente, e a região de fissuração do concreto tracionado evolui durante a análise. Em adição, o método proposto também permite estimar a região de fissuração do concreto tracionado.

Os resultados dos deslocamentos obtidos pelo modelo proposto são comparados com valores avaliados pelas fórmulas recomendadas pela NBR 6118/2014 e pelo método da seção transversal equivalente, empregando-se como valores de referência os resultados experimentais obtidos por Baroni (2003), Gilbert e Nejadi (2004) e Simonetti (2008). A partir desta comparação, verifica-se um melhor desempenho do modelo proposto, por ter apresentado uma melhor aproximação em relação aos valores obtidos experimentalmente.

Agradecimentos

Ao LCCV (Laboratório de Computação Científica e Visualização) do Campus do Sertão, por disponibilizar a infra-estrutura necessária à realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade P. H. 2006. *Evolução do Concreto Armado*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Anhembi Morumbi. São Paulo – SP.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR **6118**: Projeto de Estruturas de Concreto Armado: Procedimento. Rio de Janeiro-RJ, 2014.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR **8522**: Concreto – Determinação do módulo e deformação estática e diagrama tensão-deformação. Rio de Janeiro, 1983.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR **7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR **12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.
- Baroni, H.J.M. 2003. Avaliação do comportamento dos deslocamentos transversais ao longo do tempo em vigas de concreto armado não convencional. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Branson, D. E. 1968. Design procedures for computing deflections. *ACI Journal*.
- Gilbert, R. I. & Nejadi, S., 2004. *An experimental study of flexural cracking in reinforced concrete members under sustained loads*. UNICIV Report No. R-435, School of Civil & Environmental Engineering, UNSW, Sydney.
- Hibbeler, R. C. 2002. Resistência dos Materiais. 5 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- Simonetti, C., 2008. *Análise teórico-experimental da deformação instantânea e lenta de vigas de concretos auto-adensáveis*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS.
- Valle, K. N. 2012. *Métodos numéricos de Euler e Runge-Kutta*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte.