

ESTUDO DAS TAXAS MÍNIMAS DE ARMADURA DE TRAÇÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO SEGUNDO A ABNT NBR 6118:2014

*Ricardo José Carvalho Silva¹
Carlos Valbson dos Santos Araújo²*

Resumo - Um dos limites mais relevantes para o dimensionamento de uma viga, em concreto armado ou protendido, é a taxa de armadura mínima, que deve ser atendida de modo a evitar a ruptura brusca de sua seção transversal, o que poderia levar toda a estrutura à ruína. A norma brasileira de projeto de estruturas de concreto, ABNT NBR 6118, em sua versão de 2014, traz valores para essas taxas considerando a relação entre a altura útil e a altura da seção da viga igual a 0,80. Para outras relações, é necessário dimensionar a viga para um momento fletor mínimo, gerando um trabalho adicional de cálculo para os projetistas. Assim, esta pesquisa pretende discutir sobre o método de cálculo de armadura mínima para vigas, adotado pela norma ABNT NBR 6118:2014, para concretos das classes de resistência C20 a C90, e propor uma forma de facilitar e agilizar o processo de dimensionamento e verificação de vigas de concreto. Para isso, foram tabelados valores de taxas mínimas de armadura de tração para diferentes relações entre altura útil e altura total da viga, e considerando as resistências do concreto entre 20 MPa e 90 MPa, obtendo-se resultados que podem ser usados diretamente por engenheiros em seus projetos estruturais, contribuindo assim, de forma significativa para a engenharia estrutural.

Palavras-Chave: ABNT NBR 6118:2014. Vigas de concreto armado. Taxa de armadura mínima de tração.

¹ Professor Doutor, Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Vale do Acaraú. ricardo.carvalho222@gmail.com

² Aluno de Graduação, IC, Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Vale do Acaraú. carlosvalbson@hotmail.com

1 INTRODUÇÃO

A garantia da capacidade resistente de um elemento estrutural de concreto armado se dá pelo correto dimensionamento da armadura em seu interior, principalmente para vigas, as quais são submetidas à flexão e, um erro na quantidade de aço adotada, pode ocasionar uma ruptura brusca da seção, sem aviso nem possibilidade de reforço ou recuperação da peça. Nesse sentido, é imprescindível adotar-se uma taxa mínima de armadura de tração para vigas de concreto armado, a qual irá impedir a ruína precoce da seção da viga, ainda no início da fissuração do concreto.

A norma brasileira NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto, procedimento, traz valores de taxas mínimas de armadura de tração para vigas com seções retangulares, considerando uma relação entre altura útil e altura da seção (d/h) de 0,80. Esses parâmetros são pouco usuais em projetos estruturais, sendo necessário, para outras relações d/h , dimensionar a seção a um momento fletor mínimo dado por essa norma.

Assim, o objetivo desta pesquisa é mostrar e discutir o método de cálculo de armadura mínima de tração, trazido pela NBR 6118:2014, e apresentar valores de taxas mínimas dessas armaduras para diversas relações de d/h e para concretos com diferentes resistências, os quais possam ser usados por projetistas de estruturas, de forma prática e rápida, agilizando o processo de verificação e

dimensionamento de vigas, sem contudo, fugir da segurança e sim garantir um bom comportamento para a peça estrutural.

2 EVOLUÇÃO DO CÁLCULO DA ARMADURA MÍNIMA

Segundo a antiga NB-1/1978 – Projeto e execução de obras de concreto armado, procedimento, a armadura mínima de tração deveria ser suficiente para que o momento de ruptura calculado, sem se considerar a resistência à tração do concreto, fosse igual ao momento de ruptura da seção sem armadura. Isso se faz necessário quando a viga, em serviço, passa do estado não fissurado (estádio I) para o estado fissurado (estádio II). Assim, de acordo com SÜSSEKIND (1987), a armadura mínima deveria garantir à viga uma resistência à flexão, no estágio II, pelo menos igual àquela que possuía no estágio I, e o cálculo dela deveria ser feito igualando os momentos nesses dois estádios, dados na equação a seguir:

$$\frac{b_w h^2}{6} f_{ct} = A_s^{m.m} \times f_{yd} \times z(1)$$

Considerando $h \cong 1,05d$ e $z \cong 0,87d$, a equação fica:

$$A_s^{m.m} \cong 0,21 \times \frac{f_{ct}}{f_{yd}} \times b_w d(2)$$

A partir dessa expressão, e considerando um concreto com $f_{ck} = 260 \text{ kgf/cm}^2$, poderia ser obtida a taxa de armadura mínima, para as diversas categorias de aço. Como forma de garantir a segurança, a NB-1/1978 exigia que se considerasse a taxa de 0,25% de $b_w h$ para aço CA-25 ou CA-30, e 0,15% para aços CA-40, CA-50 ou CA-60, independentemente da resistência do concreto.

A edição de 2003 da NBR 6118, que substituiu a NB-1/1978, diz que a armadura mínima de tração deve ser determinada pelo dimensionamento da seção a um momento fletor mínimo. Esse momento é dado por:

$$M_{d,mn} = 0,8W_0 f_{ctk}, \quad (3)$$

Essa expressão, segundo CLÍMACO (2013), para seções retangulares, assume a forma:

$$M_{d,mn} = 0,052b_w h^2 f_{ck}^{2/3} \quad (4)$$

Assim, considerando o uso de aço CA-50 e dimensionando a seção para esse momento, encontra-se a taxa de armadura mínima e ainda, segundo a NBR 6118:2003, o dimensionamento para $M_{d,mn}$, poderia ser considerado atendido se fossem respeitadas as taxas

mínimas apresentadas na tabela a seguir, as quais eram dadas apenas para concretos das classes de resistência C20 a C50.

Tabela 1 – Taxas mínimas de armadura de flexão segundo NBR 6118:2003

Forma da seção	Valores de $\rho_{min}^{1)}$ ($A_{s,min}/A_c$) %							
	f_{ck} ω_{min}	20	25	30	35	40	45	50
Retangular	0,035	0,150	0,150	0,173	0,201	0,230	0,259	0,288
T (mesa comprimida)	0,024	0,150	0,150	0,150	0,150	0,158	0,177	0,197
T (mesa tracionada)	0,031	0,150	0,150	0,153	0,178	0,204	0,229	0,255
Circular	0,070	0,230	0,288	0,345	0,403	0,460	0,518	0,575

¹⁾ Os valores de ρ_{min} estabelecidos nesta tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, ρ_{min} deve ser recalculado com base no valor de ω_{min} dado.

NOTA Nas seções tipo T, a área da seção a ser considerada deve ser caracterizada pela alma acrescida da mesa colaborante.

Fonte: ABNT NBR 6118 (2003)

De acordo com ARAÚJO (2014), a taxa de armadura mínima deve ser obtida a partir da equação (5), onde f_{ctm} é a resistência média à tração do concreto, e é dada em função da classe de resistência do concreto:

$$\rho_{min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yd}} \quad (5)$$

Assim, substituindo na equação (5) as expressões de f_{ctm} constantes na edição de 2014 da NBR 6118, a qual abrange concretos das classes C20 a C90, pode-se calcular a taxa mínima como:

$$\rho_{min} = \frac{0,078f_{ck}^{2/3}}{f_{yd}}, se f_{ck} \leq 50MPa(6)$$

$$\rho_{min} = \frac{0,5512\ln(1 + 0,11f_{ck})}{f_{yd}}, se f_{ck} > 50MPa(7)$$

A partir dessas equações, ARAÚJO (2014) propõe uma tabela de taxas mínimas de acordo com a resistência do concreto e a categoria do aço utilizado:

Tabela 2 – Taxas mínimas de armadura de flexão segundo ARAÚJO

f_{ck} (MPa)	Concretos do Grupo I						
	20	25	30	35	40	45	50
CA-50	0,15	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,24
CA-60	0,15	0,15	0,15	0,16	0,18	0,19	0,20
f_{ck} (MPa)	Concretos do Grupo II						
	55	60	70	80	90		
CA-50	0,25	0,26	0,27	0,29	0,30		
CA-60	0,21	0,21	0,23	0,24	0,25		

Fonte: ARAÚJO (2014)

3 APRESENTAÇÃO DO MÉTODO DA NBR 6118:2014

A norma de projeto de estruturas de concreto, NBR 6118:2014, tem como um de seus objetivos garantir a funcionalidade dos elementos estruturais e impedir a ruptura frágil dos mesmos. Nesse sentido é que ela exige um valor mínimo para a área de aço da armadura de tração, visto que em alguns casos, seja por exigência arquitetônica ou construtiva, a seção da viga é bem maior que a necessária para resistir ao carregamento atuante, fazendo com que ela trabalhe, para as cargas de serviço, no limite entre os estádios I e II. Portanto, a armadura mínima tem por finalidade resistir à abertura de fissuras e garantir a ductilidade da seção na passagem do estado não fissurado para o estado fissurado.

Assim como na edição de 2003, a NBR 6118:2014 diz que a armadura mínima deve ser determinada pelo dimensionamento da seção ao momento fletor dado pela equação (3), onde W_0 é o módulo de resistência da seção transversal bruta de concreto, relativo à fibra mais tracionada, dado pela equação (8), e $\frac{ctk}{f}$ é igual a $1,3 \times f_{ctm}$, onde f_{ctm} é calculado pelas expressões (9) e (10), de acordo com o grupo de resistência do concreto.

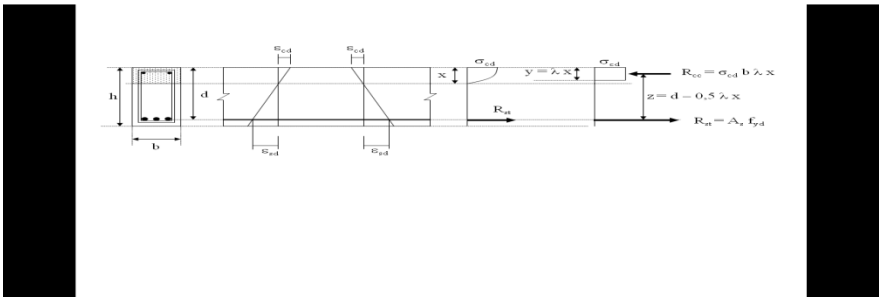
$$W_0 = \frac{bh^2}{6} \quad (8)$$

$$f_{ctm} = 0,3f_{ck}^{2/3}, \text{ para concretos de classes até C50(9)}$$

$$f_{ctm} = 2,12\ln(1 + 0,11f_{ck}), \text{ para concretos de classes C55 até C90(10)}$$

Para dimensionar a seção a esse momento mínimo dado pela norma, foi utilizada uma rotina de cálculo iterativo onde se busca a deformação inicial do concreto, ϵ_{cd} , que é usada para encontrar a profundidade real da linha neutra da seção, dispensando então a necessidade de correção da tensão no concreto quando a seção está no Domínio 2.

Figura 1 – Seção transversal, deformações e tensões na flexão



Fonte: O autor

Partindo das notações da Figura 1 e considerando que, para o cálculo da armadura mínima, a viga está no Domínio 2, encontra-se a profundidade relativa da linha neutra (K_x) com a seguinte expressão:

$$K_x = \frac{\epsilon_{cd}}{\epsilon_{cd} + \epsilon_{sd}} \quad (11)$$

Com o valor de K_x encontra-se o coeficiente adimensional K_z usado para calcular a resultante de compressão no concreto (R_{cc}), de acordo com as expressões a seguir, onde $x = K_x \times d$:

$$K_z = 1 - \left(\frac{\lambda}{2}\right) \times K_x \quad (12)$$

$$R_{cc} = \sigma_{cd} b \lambda x \quad (13)$$

Os valores de σ_{cd} e λ são dados pela norma através das expressões (14) e (15):

$$\sigma_{cd} = 0,85 f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad (14)$$

$$\lambda = \begin{cases} 0,8 \text{ para concretos com } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 0,8 - \left(\frac{f_{ck} - 50}{400} \right) \text{ para concretos com } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (15)$$

Os valores de n e ε_{c2} são calculados, de acordo com a NBR 6118:2014, como:

$$\varepsilon_{c2} = \begin{cases} 2,0\text{‰}, \text{ se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 2,0\text{‰} + 0,085\text{‰} (f_{ck} - 50)^{0,53}, \text{ se } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (16)$$

$$n = \begin{cases} 2,0, \text{ se } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 1,4 + 23,4 \left(\frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4, \text{ se } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (17)$$

O processo iterativo consiste em calcular o momento M_d , dado na equação (18), até que ele seja igual ao momento mínimo da expressão (3), ou seja, varia-se o valor de ϵ_{cd} e calcula-se K_z , R_{cc} e M_d e adota-se como critério de parada a igualdade $M_d = M_{d,min}$.

$$M_d = R_{cc} \times K_z \times d \quad (18)$$

Assim, chega-se ao valor correto de K_z , o qual é utilizado para calcular a área de aço mínima pela equação a seguir:

$$A_{s,min} = \frac{M_d}{K_z d f_{yd}} \quad (19)$$

Dividindo a área de aço $A_{s,min}$ pela área da seção de concreto $b \times h$, tem-se a taxa de armadura ρ_{min} , devendo-se sempre respeitar a taxa mínima absoluta de 0,15%, exigida pela NBR 6118:2014. Considerando então aço CA-50 e a relação $d/h = 0,80$, e fazendo o cálculo iterativo para concretos das classes C20 a C90, chega-se às taxas mínimas dadas na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Taxas mínimas de armadura através de cálculo iterativo

Seção retangular com relação d/h = 0,80								
f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40	45	50	55
ρ_{min} (%)	0,150	0,150	0,150	0,164	0,180	0,194	0,208	0,212
f_{ck} (MPa)	60	65	70	75	80	85	90	
ρ_{min} (%)	0,221	0,227	0,235	0,242	0,247	0,253	0,258	

Fonte: O autor

Comparando esses valores com os da norma, apresentados na Tabela 4, percebe-se uma ligeira diferença na terceira casa decimal para alguns valores de f_{ck} . Essa diferença se dá pela precisão utilizada nos cálculos. De qualquer forma, os valores apresentados na Tabela 3 ficam a favor da segurança.

Tabela 4 – Taxas mínimas de armadura de flexão segundo NBR 6118:2014

Forma da seção	Valores de ρ_{min}^a ($A_{s,min}/A_c$) %														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256

^a Os valores de ρ_{min} estabelecidos nesta Tabela pressupõem o uso de aço CA-50, d/h = 0,8 e $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, ρ_{min} deve ser recalculado.

Fonte: ABNT NBR (2014)

Como é mostrado na Tabela 4, esses valores dados pela norma para as taxas mínimas de armadura consideram a relação $d/h = 0,80$ e, caso essa relação seja diferente, ρ_{min} deve ser recalculado. Esse valor para a relação entre a altura útil e a altura total da seção não é usual em projetos estruturais, visto que ele implica em uma seção com muitas armaduras ou com um cobrimento elevado. Assim, foi feito o cálculo para as taxas mínimas considerando as relações $d/h = 0,85$, $d/h = 0,90$ e $d/h = 0,95$, para as diferentes classes de concreto, utilizando o processo iterativo demonstrado acima. Os valores encontrados são apresentados na próxima sessão, nas tabelas 5, 6 e 7.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O cálculo da armadura mínima apresentado por SÜSSEKIND (1987) atendia aos padrões exigidos pela norma vigente, NB-1/1978, e aos parâmetros dos materiais utilizados na época, principalmente a resistência do concreto e a categoria do aço estrutural. A forma como ele calculava se assemelha ao método apresentado por ARAÚJO (2014), sendo que este leva em conta os grupos de resistência do concreto abrangidos pela atual NBR 6118:2014. Os métodos utilizados por ambos não consideram a tensão atuante no concreto, dada pela norma para dimensionamento no Estado Limite Último (ELU), e calculada conforme a equação (14). O cálculo feito dessa forma é uma simplificação que fica a favor da segurança.

Para se considerar a tensão atuante no concreto e dimensionar a seção da viga sem necessidade de corrigir essa tensão, uma vez que, para o cálculo da armadura mínima, a seção transversal está no Domínio 2, é necessário utilizar o processo iterativo apresentado neste trabalho, utilizando-se das equações (8) a (19). Esse método permite encontrar a deformação no concreto e a linha neutra reais. Apesar de ser um método muito preciso, não é recomendado para ser feito sem auxílio de uma rotina computacional, porém com a disponibilidade e rapidez dos programas computacionais atuais, é bastante viável o seu uso.

As tabelas 5, 6 e 7 apresentam os valores para as taxas de armadura mínima de flexão, calculados com o processo iterativo, considerando $d/h = 0,85$, $d/h = 0,90$ e $d/h = 0,95$, respectivamente.

Tabela 5 – Taxas mínimas de armadura para $d/h = 0,85$

Seção retangular com relação $d/h = 0,85$								
f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40	45	50	55
ρ_{min} (%)	0,150	0,150	0,150	0,154	0,168	0,182	0,195	0,198
f_{ck} (MPa)	60	65	70	75	80	85	90	
ρ_{min} (%)	0,206	0,214	0,221	0,226	0,233	0,238	0,243	

Fonte: O autor

Tabela 6 – Taxas mínimas de armadura para $d/h = 0,90$

Seção retangular com relação $d/h = 0,90$								
f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40	45	50	55
ρ_{min} (%)	0,150	0,150	0,150	0,150	0,158	0,172	0,184	0,187
f_{ck} (MPa)	60	65	70	75	80	85	90	
ρ_{min} (%)	0,195	0,202	0,207	0,214	0,220	0,224	0,230	

Fonte: O autor

Tabela 7 – Taxas mínimas de armadura para $d/h = 0,95$

Seção retangular com relação $d/h = 0,95$								
f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40	45	50	55
ρ_{min} (%)	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,162	0,174	0,177
f_{ck} (MPa)	60	65	70	75	80	85	90	
ρ_{min} (%)	0,184	0,191	0,196	0,202	0,207	0,212	0,217	

Fonte: O autor

Pelos valores apresentados nessas tabelas pode-se perceber que, com o aumento da relação entre a altura útil e a altura total da seção transversal (d/h), as taxas mínimas de armadura exigidas são menores como, por exemplo, para concreto com f_{ck} de 35 MPa, considerando a relação $d/h = 0,90$, a taxa mínima de armadura é igual a 0,15%, menor que o valor de 0,164% dado pela NBR 6118:2014. Esse valor menor para ρ_{min} já era esperado, pois aumentando a altura útil (d), o valor de z usado no dimensionamento também aumenta e, conseqüentemente, a área de aço necessária para equilibrar o momento solicitante é menor.

CONCLUSÕES

O cálculo das taxas de armadura mínima considerando relações d/h maiores que 0,80 gera valores menores para $A_{s,min}$. Esses valores estão mais próximos da realidade e, ainda assim, ficam a favor da segurança, podendo ser usados no dimensionamento e verificação de vigas de concreto armado, gerando um projeto mais econômico, uma vez que se tem áreas de aço menores.

Por serem maiores, os valores das taxas mínimas dados pela norma brasileira NBR 6118:2014, para a relação $d/h = 0,80$, ficam a favor da segurança. Assim, o uso dessas taxas, mesmo para valores de d/h maiores que 0,80, garante um bom comportamento à flexão e previne a ruptura frágil da seção de vigas de concreto armado. Da mesma forma, os valores de ρ_{min} dados por ARAÚJO (2014), que são maiores que os apresentados pela norma, também estão a favor da segurança.

O dimensionamento de vigas de concreto armado utilizando o processo iterativo apresentado, resulta em valores mais precisos e descarta a necessidade de correção da tensão no concreto, quando no Domínio 2, uma vez que se encontram os valores reais da deformação no concreto e da profundidade da linha neutra da seção.

Study of the minimum tensile reinforcement ratios of reinforced concrete beams according to ABNT NBR 6118:2014

Abstract - One of the most relevant limits for the dimensioning of reinforced or pre-stressed concrete beam is minimum tensile reinforcement ratio, which must be met in order to prevent sudden cross-section rupture, which could ruin the entire structure. The Brazilian standard for concrete structure design, NBR 6118, 2014 edition, suggests values for these rates considering the useful height and height of the beam section equal to 0.80. For other relations, the dimensioning of the beam to a minimum bending moment implies in additional calculation for engineers. Thus, the aim of this research was to discuss the calculation method for minimum reinforcement of beams, adopted by the ABNT NBR 6118:2014, for concrete strength classes from C20 to C90 and propose a way to facilitate and streamline the process of dimensioning and verifying concrete beams. Therefore, the values of tensile reinforcement ratio for different relations between the useful height and the total height of the beam were tabulated, considering the resistance of concrete between 20 MPa to 90 MPa, yielding results that can be directly used by engineers in their structural projects, thus significantly contributing to structural engineering.

Keywords: ABNT NBR 6118:2014. Reinforced concrete beams. Minimum tensile reinforcement ratio

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado** - Vol. 1. 4ª Ed. Rio Grande: Ed. Dunas, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NB-1: Projeto e execução de obras de concreto armado - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

CLÍMACO, João Carlos Teatini de Sousa. **Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação.** 2ª Ed. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 2013.

SÜSSEKIND, José Carlos. **Curso de concreto: concreto armado - Vol. 1.** 5ª Ed.. Rio de Janeiro: Ed. Globo, 1987.