

Avaliação da resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado segundo o critério de demérito

Evaluation of reinforced concrete beams shear strength using demerit points classification

RESUMO

Isabela de Gois Laufer
lauferisabela@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil.

Gustavo Savaris
gsavaris@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil.

Os métodos de predição da resistência de vigas de concreto armado à força cortante são baseados em formulações empíricas e semi-empíricas, fundamentadas principalmente no modelo de treliça proposto por Ritter e Morsch, ou na teoria do campo de compressão modificada proposta por Vecchio e Collins. O objetivo deste trabalho foi comparar as estimativas de resistência ao cisalhamento das normas NBR 6118, CSA A23.3-04, EUROCODE 2 e ACI 318 com os resultados experimentais de um banco de dados composto por diversos trabalhos encontrados em literatura que ensaiaram vigas com e sem armadura transversal. Os resultados obtidos para cada norma foram classificados quanto a segurança através de uma escala que considera segurança, precisão e economia, definida por Collins. A análise comparativa classificou a NBR 6118 como segura para o dimensionamento de vigas com estribos, mas possui baixa segurança em relação à predição em vigas sem estribos. As demais normas apresentaram métodos de predição seguros, porém as normas CSA A23.3-04 e EUROCODE 2 apresentaram resultados superestimados, que podem ser antieconômicos quanto ao dimensionamento de vigas com estribo.

PALAVRAS-CHAVE: Cisalhamento. Vigas. Concreto Armado.

ABSTRACT

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



The methods for shear prediction for reinforced concrete beams are based on empirical and semi-empirical formulations, using mostly the Ritter and Morsch truss analogy or the modified compression field theory defined by Vecchio and Collins. This work aims to compare the shear resistance of codes that use the truss model. The predictions models of the codes NBR 6118, CSA A23.3-04, EUROCODE 2 and ACI 318 (2005) were applied on experimental results from a data basis composed of several papers found in literature that tested beams with and without stirrups. The results are classified by a scale that considers safety, accuracy and scattering of the codes, defined by Collins. The comparative analysis suggests that NBR 6118 is appropriate and safe for beams with stirrups, but it's considered dangerous for beams without stirrups. The other codes presented safe provisions, though some results of the CSA A23.3-04 and EUROCODE 2 were overestimated, which may be uneconomical.

KEYWORDS: Shear strength. Slabs. Reinforced Concrete.

INTRODUÇÃO

O cálculo da resistência à força cortante no concreto armado é baseado, em sua maioria, em formulações empíricas e semi-empíricas. Tais fórmulas baseiam-se na Teoria da Treliça de Ritter e Mörsch, no qual uma viga de concreto armado, depois de fissurada e próxima a ruptura, se comporta como uma treliça de banzos paralelos e alma composta por diagonais de concreto e tirantes transversais de aço. Nesse modelo, as barras inclinadas a 45° representam as bielas de compressão; as diagonais tracionadas inclinadas a um ângulo α os estribos, que por razões práticas é geralmente utilizado a 90°; os banzos são paralelos, onde o banzo superior representa o concreto comprimido pela flexão e o inferior as armaduras longitudinais que resistem à tração. Das normas analisadas nesse trabalho a NBR 6118, o EUROCODE 2 e a ACI 318 são as que adotam o modelo da treliça de Ritter e Mörsch.

A Teoria do Campo de Compressão Modificada (MCFT), apresentada por Vecchio e Collins (1986) como uma alternativa para o dimensionamento de estruturas de concreto solicitada por tensões cisalhantes, apresenta como vantagens incluir na formulação os efeitos da altura da seção transversal e a dimensão do agregado graúdo utilizado no concreto, sendo adotada atualmente pela norma canadense CSA A23.3-04.

Visando avaliar a segurança das equações de estimativa da resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado, o presente trabalho apresenta um banco de dados de resultados de ensaios experimentais de vigas com e sem armadura transversal obtidos em artigos publicados em periódicos científicos. Estes resultados foram comparados com valores estimados pelas normas canadense, norte americana, europeia e brasileira, sendo aplicada a escala de demérito proposta por Collins (2001) para quantificar o grau de segurança de cada norma.

MATERIAL E MÉTODOS

Uma pesquisa em artigos e teses publicados recentemente foi realizada buscando resultados de ensaios experimentais de vigas com e sem armadura transversal. Estes resultados foram comparados com os valores de resistência ao cisalhamento calculados utilizando as equações das normas brasileira NBR 6118 (ABNT, 2003) que possui dois modelos diferentes de cálculo, canadense A23.3 (CSA, 2004), europeia EUROCODE 2 (CEN, 2003) e americana ACI 318 (ACI, 2014).

São apresentados na Tabela 1 os autores e as quantidades de vigas ensaiadas em cada trabalho obtido na revisão de literatura.

Tabela 1 – Quantidade de vigas analisadas por trabalho

Autor	Vigas com estribo	Vigas sem estribo
M. P. Collins, D. Kuchma (2001)	2	13
A. H. Elzanaty, A. H. Nilson, F. O. Slate (1986)	2	0
A. Cladera, A.R. Marí (2005)	3	2
L. S. Santos, M. P. Ferreira (2013)	3	1
J. A. Carelli (2002)	3	3

M. D. Kotsovos (1986)	4	1
D. Angelakos, <i>et al.</i> (1998)	4	11
A. Placas, E. Regan (1971)	17	5
B.Singh, S. Chintakindi (2012)	20	0
Çagatay M. Belgin, Siddik Sener (2007)	30	0
Total de vigas	88	36

Fonte: Autoria própria (2019).

Para a classificação da confiabilidade das normas, foi utilizado o sistema de classificação apresentado por Collins (2001), denominado Demerit Points Classification (DPC), que leva em conta a segurança, precisão e economia como função da resistência observada em testes experimentais (V_u) pela resistência estimada de cada norma (V_r). Também é aplicada uma penalidade conforme o valor dessa taxa, que é calculada pela soma da quantidade de vigas que resultaram em cada intervalo por seu respectivo valor da penalidade, ou seja, uma norma que possua uma viga com taxa V_u/V_r abaixo de 0,5 vai receber 10 pontos de penalidade por ter predito um valor de resistência para uma viga que, experimentalmente, não suportou metade da força cortante calculada. Porém, uma norma com muitos valores acima de 2 significaria muitos valores conservativos, o que pode ser antieconômico. Assim, quanto maior a penalidade total de uma norma, pior é considerada sua segurança. A Tabela 2 apresenta o sistema de classificação do DPC:

Tabela 2 – Classificação pela escala DPC

V_u/V_r	Classificação	Penalidade
< 0,5	Extremamente Perigosa	10
0,5 --- 0,65	Perigosa	5
0,65 --- 0,85	Baixa Segurança	2
0,85 --- 1,3	Segurança Adequada	0
1,3 --- 2	Conservativa	1
≥ 2	Extremamente Conservativa	2

Fonte: Collins (2001).

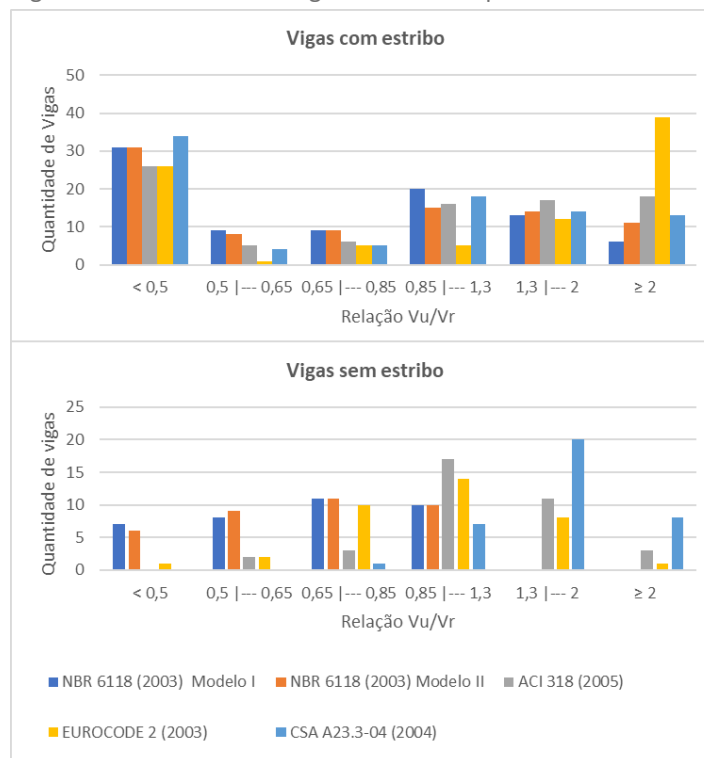
RESULTADOS E DISCUSSÃO

As vigas ensaiadas apresentadas na literatura possuíam grande variação entre suas dimensões, com larguras entre 51 e 300 mm e alturas entre 90 e 925 mm, além de diferentes valores para relação a/d (distância entre carga e o apoio/altura útil da viga) entre 1,5 e 16,07. Também era grande a variabilidade da taxa de armadura transversal, algumas possuindo apenas o mínimo requerido pelas normas, outras sendo consideradas superarmadas.

Vigas muito esbeltas, assim como vigas com alto valor de a/d podem possuir uma resistência baixa ao cisalhamento. Portanto, espera-se que as normas possuam vários valores na faixa perigosa, uma vez que foram vigas ensaiadas experimentalmente com objetivos investigativos e não são normalmente empregadas na construção civil.

A Figura 1 apresenta a quantidade de vigas que cada norma obteve em cada intervalo de V_u/V_r proposto por Collins (2001). Nota-se que nas vigas com estribo os resultados foram próximos, mesmo possuindo uma grande quantidade de valores na faixa extremamente perigosa ($<0,5$), não houve uma diferença significativa da quantidade de vigas nessa faixa comparando uma norma a outra. Porém nota-se que o EUROCODE 2 apresentou muito mais vigas na faixa extremamente conservativa que outras normas. Já nas vigas sem estribos a NBR 6118 apresentou uma quantidade maior que as outras normas nas faixas extremamente perigosa e perigosa.

Figura 1 – Quantidade de vigas com estribo por intervalo de taxa.



Fonte: Autoria própria (2019).

A média dos resultados de V_u/V_r das vigas com estribo foram calculadas para cada norma analisada, sendo então as normas classificadas conforme o critério de demérito (Tabela 3).

Tabela 3 – Resultados para vigas com estribo

Norma	V_u/V_r	Classificação DPC	Penalidade Total
NBR 6118 (ABNT, 2003) Modelo I	0,91	Segurança Adequada	398
NBR 6118 (ABNT, 2003) Modelo II	1,25	Segurança Adequada	404
ACI 318 (ACI, 2014)	1,33	Conservativa	350
EUROCODE 2 (CEN, 2003)	2,21	Extremamente Conservativa	365
A23.3-04 (CSA, 2004)	1,09	Segurança Adequada	410

Fonte: Autoria própria (2019).

Todas as normas foram consideradas seguras para o dimensionamento de vigas com estribo, com o EUROCODE 2 apresentando resultados extremamente conservativos por possuir uma quantidade maior de vigas na faixa ≥ 2 .

Na Tabela 4, os resultados da classificação DPC para vigas sem estribos mostram que dentre todas as normas, a brasileira é a pior por possuir baixa segurança e um valor destoante e muito alto de penalidade.

Tabela 4 – Resultados para vigas sem estribo

Norma	Vu/Vr	Classificação DPC	Penalidade Total
NBR 6118 (ABNT, 2003) Modelo I	0,72	Baixa segurança	132
NBR 6118 (ABNT, 2003) Modelo II	0,73	Baixa segurança	127
ACI 318 (ACI, 2005)	1,27	Segurança Adequada	33
EUROCODE 2 (CEN, 2003)	1,09	Segurança Adequada	50
A23.3-04 (CSA, 2004)	1,79	Conservativa	38

Fonte: Autoria própria (2019).

CONCLUSÃO

Com a realização de uma extensa revisão bibliográfica buscando resultados de ensaios experimentais com vigas para avaliar a resistência ao cisalhamento foi possível quantificar a segurança das equações normativas considerando o critério de demérito. Para vigas com estribos verificou-se que as normas avaliadas garantem a segurança das estruturas, sendo a norma europeia EUROCODE 2 (CEN, 2003) a mais conservativa. No dimensionamento de vigas sem estribos, a norma NBR 6118 (ABNT, 2003) apresentou baixa segurança, entretanto deve ser ressaltado que nenhuma das normas permite o emprego de vigas sem estribos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná/Brasil.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. ACI 318R: **Building code requirements for structural concrete**. 2014, 519 p.
- ANGELAKOS, D. BENTZ, E.C., COLLINS M. P. **Effect of Concrete Strength and Minimum Stirrups on Shear Strength of Large Members**. 1998. Structural Journal. julho 2001, p. 391-300.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto: procedimentos**, 3. ed., Rio de Janeiro, 2014, 238 p.
- BELGIN, Çagatay M.; SENNER, Siddik. **Size effect on failure of overreinforced concrete beams**. Science Direct, Elsevier, p. 2309-2319, 21 set. 2007.

- CARELLI, J.A., **Cisalhamento em Vigas de Concreto Armado com Estribos Autotravantes**, Dissertação, 2002, 144p., Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo de Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 4. ed. São Carlos: Edufscar, 2014.
- CLADERA, A.; MARÍ, A. R. **Experimental study on high-strength concrete beams failing in shear**. Science Direct, Elsevier, p. 1520-1526, 24 maio 2005.
- COLLINS, M.P., **Evaluation of Shear Design Procedures for Concrete Structures**, CSA Technical Committee on Reinforced Concrete Design, Canadá, março 2001, p.29-37. COLLINS, M.P., E KUCHMA, D., **How safe are our large, Lightly Reinforced Concrete Beams, Slabs and Footings?** ACI Structural Journal, vol.96, nº 04, julho-agosto 1999, p.482-490.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA Standard-A23.3-04: Design of concrete structures**. Ontario: Rexdale, 2004.
- ELZANATY, A.H., NILSON, A.H. E SLATE, F.O., **Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams using High-Strength Concrete**, ACI Journal, março-abril, 1986, p.290-296.
- EUROCODE – European Committee for Standardization – CEN. **Design of Concrete Structures, Part 1-6: General Rules and Rules for Buildings**. EUROCODE 2, Bruxelas, 1992.
- KOTSOVOS, M. D. **Shear failure of reinforced concrete beams**. Imperial College of Science and Technology, Butterworth & Co, p. 32-38, 13 maio 1986.
- LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto, vol. 1: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- PLACAS, A. E REGAN, P.E., **Shear Failure of Reinforced Concrete Beams**, ACI Journal, outubro, 1971, p.763-773.
- SANTOS, Leonyce Souza; FERREIRA, Mauricio de Pina. **Análise experimental de vigas de concreto armado ao cisalhamento**. Dissertação, 2013. Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém.
- SINGH, Bhupinder; CHINTAKINDI, Saikrushna. **An appraisal of dowel action in reinforced concrete beams**. Structures and Buildings, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, p. 257-267, 15 fev. 2012.
- VECCHIO, F. J.; COLLINS, M. P. **The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subject to Shear**. ACI Journal, v. 83, p. 219-231, março - abril, 1986.