



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Análise de Critérios de Normas para o Dimensionamento ao Cisalhamento de Vigas de Concreto Armado sem Armadura Transversal com Base em Resultados Experimentais

Ronaldo Ishihara¹, Leandro Mouta Trautwen², Luiz Carlos de Almeida³, Mário Sérgio Samora⁴, Antonio C. dos Santos⁵

¹ Faculdade de Engenharia Civil / UNICAMP / Departamento de Estruturas e Fundações / ronaldoishihar@mail.com

² Faculdade de Engenharia Civil / UNICAMP / Departamento de Estruturas e Fundações / leandromt@fec.unicamp.br

³ Faculdade de Engenharia Civil / UNICAMP / Departamento de Estruturas e Fundações / almeida@fec.unicamp.br

^{4,5} Universidade Federal de Uberlândia (UFU) / mssamora@terra.com.br ⁴ / acds@feciv.ufu.br ⁵

Resumo

Modelos de predição de resistência ao cisalhamento de elementos em concreto armado são estudados por pesquisadores há tempos, apresentando linhas de pesquisa diferentes. Neste contexto, os critérios para dimensionamento apresentados nas normas e modelos de cálculo atualmente têm como base conceitos baseados na analogia da treliça generalizada de Morsch ou na teoria do campo da compressão diagonal modificada. O dimensionamento de uma seção de viga de concreto armado a partir destes diferentes modelos pode apresentar resultados que divergem significativamente. No presente trabalho avalia-se o “grau de segurança” apresentado nestes métodos de cálculo por meio da comparação com resultados experimentais realizados por SAMORA (2015). Em seu estudo foram ensaiadas um total de 8 vigas, todas apresentando rompimento por cisalhamento. Estas vigas possuem seção retangular e não apresentam armadura transversal. Os modelos de cálculo a serem analisados e comparados são os apresentados nas normas/códigos NBR 6118:2014, ACI 318/2014, *fib* Model Code/2010, CSA A.23.3/2004 e EC2/2004. A análise dos critérios de cálculo será feita comparando-se as cargas de ruptura ao cisalhamento apresentadas nos ensaios e os valores resistentes calculados para cada método. Em paralelo ao estudo dos modelos de predição apresentados, é realizada também uma análise paramétrica dos resultados, relacionando a resistência ao cisalhamento obtida em ensaio com a taxa de armadura longitudinal de flexão e a resistência à compressão do concreto, particulares a cada peça.

Palavras-chave

Concreto armado; vigas; cisalhamento; normas.

Introdução

O problema da estimativa da capacidade resistente ao cisalhamento de peças de concreto armado tem sido objeto de estudo de pesquisadores e engenheiros estruturais há mais de um século. Apesar da questão de peças sem armadura transversal ter sido abordada ao longo das últimas décadas, ainda não há um consenso sobre um modelo teórico a ser utilizado para a predição da capacidade resistente ao cisalhamento das mesmas. Isso evidencia que o colapso por cisalhamento de peças de concreto armado ainda não foi completamente destrinchado, em parte devido à complexidade do comportamento global das estruturas de concreto e à dificuldade de se estimar com precisão a parcela de contribuição de cada um dos diferentes mecanismos resistentes à força cortante. Os modelos atuais apresentados em normas e códigos apresentam, em sua maioria, equações com bases empíricas para a formulação da capacidade resistente ao cisalhamento.

Este trabalho está dividido em quatro partes. Primeiramente é ilustrado o mecanismo básico de resistência ao cisalhamento. A seguir são apresentadas as formulações adotadas pelas normas/códigos NBR 6118:2014, ACI 318/2014, *fib* Model Code/2010, CSA A.23.3/2004 e EC2/2004. Estas recomendações normatizadas são utilizadas numa terceira etapa, onde é realizado um comparativo entre os valores teóricos calculados e os resultados experimentais de vigas ensaiadas no estudo de SAMORA (2015). A quarta parte apresenta uma análise paramétrica dos resultados obtidos, relacionando a resistência ao cisalhamento obtida em ensaio com parâmetros particulares a cada peça.

Mecanismos básicos de resistência ao cisalhamento

A Figura 1 apresenta as forças atuantes em uma fissura diagonal numa viga de concreto armado:

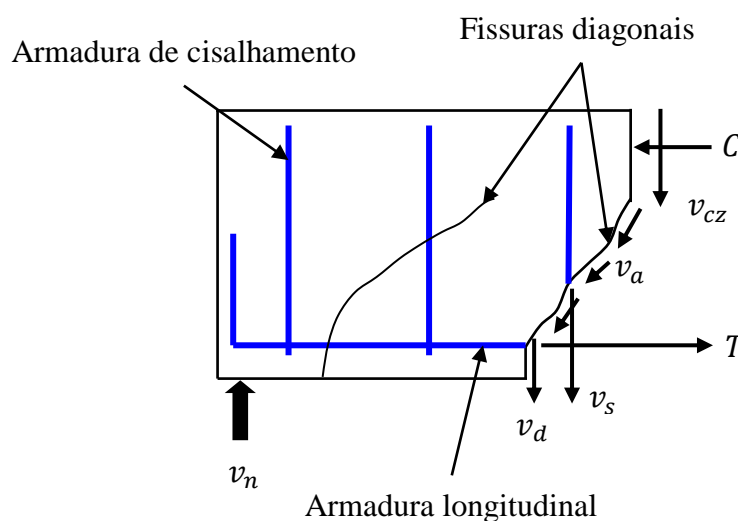


Figura 1 – Forças atuantes em viga fissurada



A capacidade resistente nominal v_n é em geral considerada igual à soma das contribuições das diversas componentes resistentes individuais, as quais incluem: a parcela v_s resistida pela armadura de cisalhamento, a parcela v_d devida ao efeito de pino da armadura longitudinal, a parcela v_{cz} resistida pelo concreto não fissurado acima da fissura diagonal, e a componente vertical v_{ay} devida ao intertravamento dos agregados entre as faces da fissura. Portanto:

$$v_n = v_s + v_{cz} + v_{ay} + v_d \quad (1)$$

Para fins de projeto, os termos v_{cs} , v_{ay} e v_d são agrupados em um único termo v_c , atribuído à resistência ao cisalhamento devida ao concreto. No caso de vigas altas (vigas-parede), além dos mecanismos resistentes incluídos na equação acima, a transferência de força cortante por compressão inclinada na biela resulta no efeito de arco, o qual eleva substancialmente a carga última de cisalhamento. É importante salientar que o efeito de arco está condicionado a uma adequada ancoragem da armadura longitudinal de flexão nos apoios.

Com relação aos mecanismos resistentes previamente citados, as seguintes observações podem ser feitas:

- O mecanismo resistente efetivo na zona comprimida após a fissuração diagonal está intimamente relacionado à resistência do concreto. O confinamento gerado pela armadura de cisalhamento contribui para aumentar a resistência do concreto, aumentando portanto a parcela v_{cz} ;
- O mecanismo resistente devido ao intertravamento dos agregados entre as faces da fissura é ativado somente após a ocorrência da fissuração diagonal e se torna significativo à medida que ocorre deslizamento entre as faces da fissura. Esse mecanismo está relacionado à microestrutura do concreto (e conseqüentemente à sua resistência mecânica) e à energia de fraturamento do concreto (responsável pelo grau de ductilidade do material). À medida que a resistência do concreto aumenta, a superfície de fraturamento se torna menos áspera (comportamento mais frágil), reduzindo a ductilidade do material e conseqüentemente a parcela v_{ay} em termos relativos. A presença de armadura de cisalhamento limita a abertura da fissura, aumentando a dissipação de energia devida ao intertravamento dos agregados, o que eleva a parcela resistente v_{ay} ;
- O mecanismo resistente devido ao efeito de pino da armadura longitudinal depende da aderência concreto-armadura e da rigidez à flexão das barras da armadura. Esse mecanismo é mais significativo em lajes do que em vigas. A presença de armadura de cisalhamento tem uma influência positiva no efeito de pino da armadura longitudinal;
- De todos os mecanismos expressos na equação, a contribuição direta da armadura de cisalhamento v_s é a menos complicada de se determinar. A sua contribuição indireta, no entanto, a qual afeta de forma benéfica as outras três parcelas resistentes, é difícil de ser estimada com precisão. Por conseguinte, essa contribuição indireta é ignorada na maioria das normas de projeto, as quais consideram que a parcela v_c é a mesma para vigas com ou sem armadura de cisalhamento.



Recomendações de normas/códigos de projeto

NBR 6118/2014

Seguindo o modelo de cálculo I apresentado na norma brasileira NBR 6118/2014, na ausência de força normal a resistência ao cisalhamento v_c é dada pela expressão abaixo:

$$v_{c(NBR)} = 0,6f_{ctk,inf}b_wd \quad (2)$$

Onde:

$f_{ctk,inf}$ \Rightarrow resistência característica inferior do concreto à tração;

b_w \rightarrow largura da viga;

d \rightarrow altura útil da viga.

O valor de $f_{ctk,inf}$ é calculado pela expressão:

$$f_{ctk,inf} = \begin{cases} 0,7 \times 0,3f_{ck}^{2/3}, & \text{para concretos de classes até C50} \\ 0,7 \times 2,12 \times \ln(1 + 0,11f_{ck}), & \text{para concretos de classes C55 até C90} \end{cases} \quad (3)$$

Onde:

f_{ck} \Rightarrow resistência característica à compressão do concreto.

ACI 318/2014

A parcela correspondente à resistência do concreto v_c é calculada pela norma ACI 318/2014 conforme apresentado abaixo.

$$v_c = \left(0,16\lambda\sqrt{f_c'} + 17\rho_l\frac{V_u d}{M_u}\right) \times b_w d \quad (4)$$

$$v_c \leq \left(0,16\lambda\sqrt{f_c'} + 17\rho_l\right) \times b_w d \quad (5)$$

$$v_c \leq 0,29\lambda\sqrt{f_c'}b_w d \quad (6)$$

Onde:

λ \rightarrow fator de modificação para concretos de baixa densidade. Para concretos convencionais,

$\lambda = 1$;

f_c' \rightarrow resistência do concreto, limitada a $f_c' \leq 68,95\text{MPa}$;

ρ_l \rightarrow taxa de armadura longitudinal;

V_u \rightarrow força de cisalhamento solicitante;

M_u \rightarrow momento fletor solicitante.



O normativo sugere admitir o segundo termo das equações (4) e (5) como $0,1\lambda\sqrt{f'_c}$, o que resulta na expressão final simplificada:

$$v_{c(ACI)} = 0,17\sqrt{f'_c}b_wd \quad (7)$$

fib ModelCode/2010

Para o *fib* Model Code/2010 a parcela resistente ao cisalhamento correspondente ao concreto é dada pela seguinte equação:

$$v_{c(CEB-FIP)} = K_v \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_w z \quad (8)$$

Onde:

K_v → coeficiente correspondente à geometria da seção;

z → distância entre os banzos comprimido e tracionado do modelo de treliça equivalente.

f_{ck} → resistência do concreto, limitada a $f_{ck} \leq 64[MPa]$;

O valor de K_v é calculado pela expressão:

$$K_v \leq \begin{cases} \frac{200}{1000+1,3z} \\ 0,15 \end{cases} \quad (9)$$

A resistência final deve ser limitada pela equação abaixo:

$$v_{Rd(CEB-FIP)} \leq K_C \frac{f_{ck}}{\gamma_c} b_w z \quad (10)$$

Onde:

$$K_C \leq \begin{cases} 0,5 \left(\frac{30}{f_{ck}}\right)^{1/3} \\ 0,5 \end{cases} \quad (11)$$

CSA A.23.3/2004

Para concretos de densidade normal, o método simplificado da norma canadense estabelece as seguintes expressões para o cálculo da contribuição resistente do concreto:

$$v_{c(CSA)} = \frac{230}{(1000+d_v)} \sqrt{f'_c} b_w d_v \quad (12)$$

Onde:

d_v → altura efetiva ao cisalhamento, tomada como o maior valor entre $0,9d$ e $0,72h$.

A resistência final deve ser limitada pela equação abaixo:

$$v_{Rd(CSA)} \leq 0,25f_c' b_w d_v \quad (13)$$

EC2/2004

A parcela correspondente à resistência do concreto v_c é calculada pelo EC2/2004 conforme apresentado abaixo.

$$v_{Rd,c} = \left[0,18/\gamma_c \times K(100\rho_l f_{ck})^{1/3} \right] b_w d \quad (14)$$

Onde:

$$K \leq \begin{cases} 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \\ 2,0 \end{cases} \quad (15)$$

Comparativo entre resultados experimentais e teóricos

As vigas ensaiadas por SAMORA (2015) apresentam seção retangular prismática, com largura de 15cm e altura de 30cm. A Figura 2 apresenta uma foto do ensaio realizado em seu trabalho.



Figura 2 – Ensaio das vigas realizado por SAMORA (2015)



As características das vigas dos pórticos ensaiados por SAMORA (2015) estão apresentadas na Tabela 1. Foram estudadas no total oito vigas de concreto armado sem armadura de cisalhamento.

	a	a/ds	ds	Asl	psl	fsy	fck	fc'
viga	distância da carga pontual aplicada até o eixo do apoio	relação entre distância da carga pontual e a altura útil	altura útil da armadura longitudinal	área de armadura longitudinal	taxa de armadura longitudinal	resistência de escoamento do aço	resistência do concreto	resistência do concreto
-	[mm]	-	[mm]	[mm ²]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
P1-A-a	700,0	2,83	247,3	490,0	1,321	603,6	17,60	18,35
P1-A-b	700,0	2,83	247,3	490,0	1,321	603,6	17,60	18,35
P2-B-a	700,0	2,67	262,2	603,0	1,533	584,3	17,60	18,35
P2-B-b	700,0	2,67	262,2	603,0	1,533	584,3	17,60	18,35
P3-A-a	700,0	2,83	247,3	490,0	1,321	603,5	36,50	37,25
P3-A-b	700,0	2,83	247,3	490,0	1,321	603,5	36,50	37,25
P4-B-a	700,0	2,67	262,2	603,0	1,533	584,3	36,50	37,25
P4-B-b	700,0	2,67	262,2	603,0	1,533	584,3	36,50	37,25

Tabela 1 – Características das vigas

A Tabela 2 apresenta os resultados experimentais e teóricos da resistência ao cisalhamento. Para o resultado de ensaio a resistência do concreto é igual à resistência última ($v_c = v_u$), visto que não há armadura de cisalhamento.

viga	Resultado de ensaio	NBR 6118 / 2014		ACI 318 / 2014		CEB-FIP ModelCode / 2010		CSA A23.03 / 2004		EC2 / 1992		Razão média dos métodos
		VcNBR	Vu/VcNBR	VcACI	Vu/VcACI	VcCEBFIP	Vu/VcCEBFIP	VcCSA	Vu/VcCSA	VcEC2	Vu/VcEC2	
-	[kN]	kN	-	kN	-	kN	-	kN	-	kN	-	-
P1-A-a	65,40	31,63	2,07	26,40	2,48	22,40	2,92	26,38	2,48	36,20	1,81	2,35
P1-A-b	70,20	31,63	2,22	26,40	2,66	22,40	3,13	26,38	2,66	36,20	1,94	2,52
P2-B-a	57,93	33,53	1,73	27,98	2,07	23,74	2,44	27,63	2,10	39,78	1,46	1,96
P2-B-b	59,92	33,53	1,79	27,98	2,14	23,74	2,52	27,63	2,17	39,78	1,51	2,03
P3-A-a	105,66	51,44	2,05	37,61	2,81	32,25	3,28	37,58	2,81	46,16	2,29	2,65
P3-A-b	96,98	51,44	1,89	37,61	2,58	32,25	3,01	37,58	2,58	46,16	2,10	2,43
P4-B-a	83,11	54,52	1,52	39,86	2,09	34,19	2,43	39,36	2,11	50,73	1,64	1,96
P4-B-b	120,04	54,52	2,20	39,86	3,01	34,19	3,51	39,36	3,05	50,73	2,37	2,83

Tabela 2 – Resultados experimentais e teóricos

Nenhuma das vigas ensaiadas apresentou resultado contra a segurança, quando comparadas aos resultados experimentais. O valor mais conservador foi obtido pelo método apresentado pelo *fib* ModelCode/2010, para todas as vigas. O EC2/2004 apresentou os resultados menos conservadores para as vigas 1 e 2, enquanto que para as vigas 3 e 4 o método da NBR 6118/2014 foi o que mais se aproximou dos resultados de ensaio. Estas leituras podem ser feitas a partir do Gráfico 1.

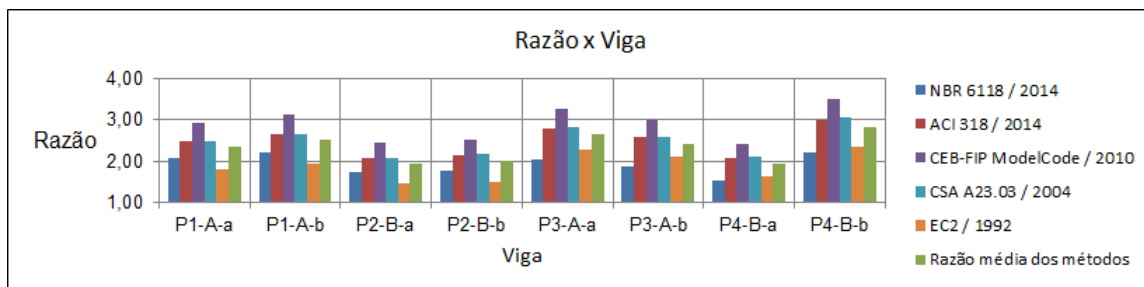


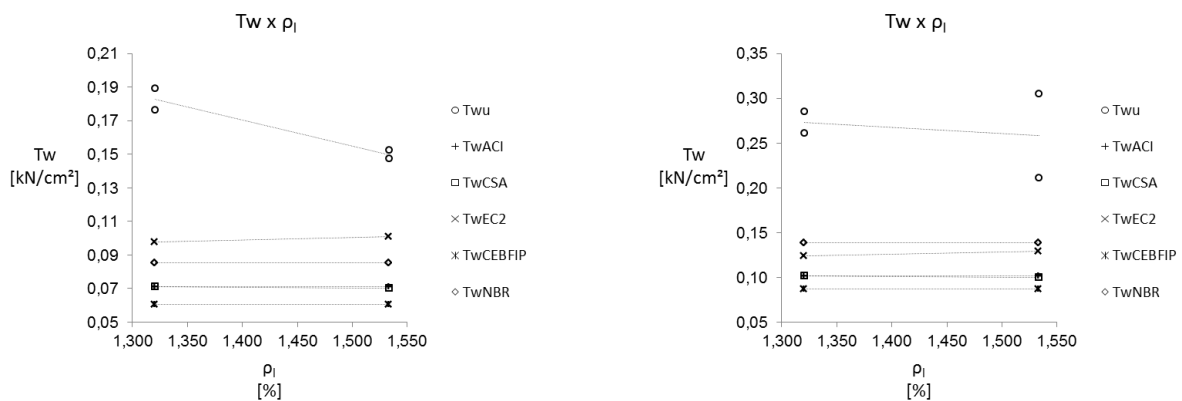
Gráfico 1 – Razão entre resultados experimentais e teóricos para cada método

Análise paramétrica

O objetivo da análise paramétrica é observar o grau de influência que cada variável apresenta na resistência ao cisalhamento. Foram analisados como parâmetros a taxa de armadura longitudinal e a resistência do concreto.

O efeito da taxa de armadura longitudinal na resistência ao cisalhamento está exposto na Figura 3, em termos de tensões. Os dados foram divididos em dois gráficos, de acordo com a resistência à compressão do concreto de cada subgrupo. Este procedimento foi adotado para isolar a influência do parâmetro em estudo.

De forma análoga, a Figura 4 apresenta os resultados em função da variação da resistência à compressão do concreto. Os dados foram divididos em dois gráficos, de acordo com a taxa de armadura longitudinal de cada subgrupo.



$$f_{ck} = 17,60 \text{ MPa (vigas 1 e 2)}$$

$$f_{ck} = 36,50 \text{ MPa (vigas 3 e 4)}$$

Figura 3 – Parâmetro: taxa de armadura longitudinal

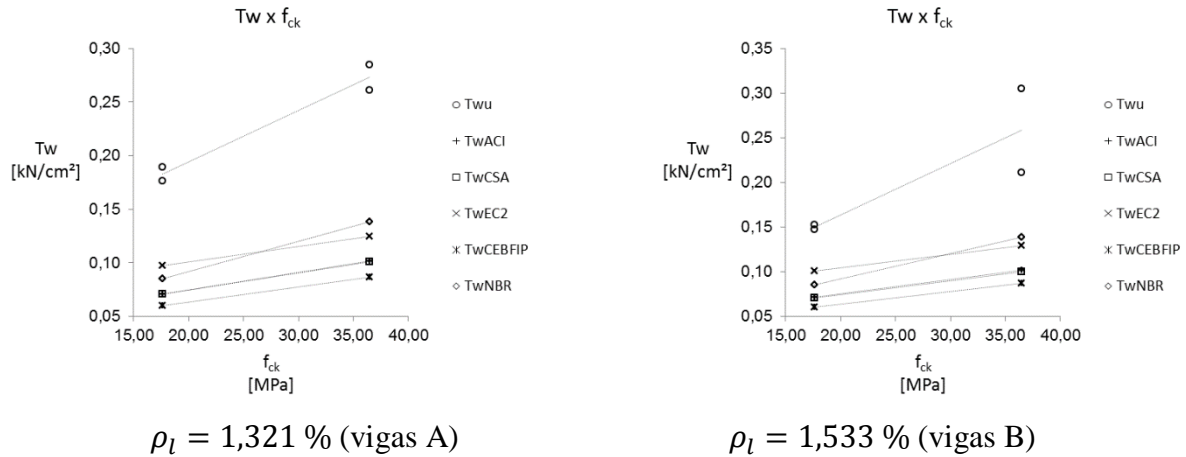


Figura 4 – Parâmetro: resistência à compressão do concreto

Na Figura 3 pode-se observar que a resistência ao cisalhamento obtida em ensaio apresentou queda em função do aumento da armadura longitudinal. Este resultado vai contra o observado em demais literaturas e o exposto em métodos que o consideram na formulação da resistência ao cisalhamento.

Na Figura 4 pode-se observar que a resistência ao cisalhamento foi crescente a medida que se aumenta a resistência à compressão do concreto. Todos os métodos apresentados representaram esta mesma correlação, porém pode-se notar que a NBR 6118/2014 apresentou uma inclinação maior que os demais métodos, evidenciando que o f_{ck} é superestimado em sua formulação, quando comparado com as demais formulações.

Conclusões

Pelos resultados obtidos ficou notável que todas as recomendações normativas apresentadas neste trabalho apresentaram resultado satisfatório em comparativo com os ensaios destas vigas, com ligeira diferença entre si. A formulação apresentada pelo *fib* mostrou-se a mais conservadora, enquanto que as apresentadas na NBR e EC2 foram as que mais se aproximaram dos resultados obtidos através de ensaios.

A análise paramétrica evidenciou queda em função do acréscimo da taxa de armadura longitudinal. Este parâmetro não é levado em consideração por todos os códigos normativos apresentados, porém é apresentado de forma a aumentar a capacidade resistente da peça na medida que a taxa de armadura aumenta. O conjunto de 8 vigas é provavelmente pouco representativo e mais ensaios são necessários para inferir um resultado melhor. Já em função da resistência à compressão do concreto, o resultado condiz com o esperado, apresentado resultados crescentes em função do aumento do f_{ck} .

Não é possível avaliar o efeito de escala neste estudo, pois as vigas ensaiadas possuem a mesma altura total e pouca variação de altura efetiva. Esta variação é dada apenas pela diferença dos diâmetros utilizados nas armaduras longitudinais.



Os códigos normativos que deixam de apresentar em sua formulação de resistência ao cisalhamento parâmetros cuja variação afeta a mesma precisam ser readequados. Neste caminho, é comum a atribuição de valores limites destes parâmetros às formulações. Apesar de facilitar o cálculo de casos gerais, esta medida a deve ser evitada. Além de criar uma barreira ao projetista que se encontra fora deste intervalo abrangido, suprimi a variação da formulação dentro deste mesmo intervalo, ainda que de forma reduzida.

Referências

- ACI COMMITTEE 318 ON STANDARD BUILDING CODE. Building code requirements for structural concrete - ACI 318R-14, American Concrete Institute, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Projeto de estruturas de concreto Procedimento – NBR-6118. Rio de Janeiro, 2014.
- CANADIAN STANDARD CAN A23.3-04 – Design of concrete structures. Canadian Standards Association, 2004.
- fib* MODEL CODE MC-2010 – Design code. *fib* Bulletin 55, International Federation for Structural Concrete, 2010.
- NORMA PORTUGUESA - Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios – NP EN 1992-1-1 2010. Instituto Português de Qualidade, 2010.
- ROMBACH, G. A. Shear Design of Concrete Members without Shear Reinforcement - A Solved Problem? Procedia Engineering, Hamburg, 2011.
- SAMORA, MÁRIO SÉRGIO. Avaliação dos Mecanismos Resistentes ao Cisalhamento em Concreto Armado sem Armadura Transversal. Dissertação. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. Abril de 2015
- TRAUTWEIN, L. M.; GASPARG, Ricardo ; BORGES, Jose Umberto . Estudo Comparativo Sobre Cisalhamento em Vigas de Concreto Segundo a Nova NBR 6118/2001 e Outras Normas Correntes. In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto, 2002, Belo Horizonte. 44º Congresso Brasileiro do Concreto, 2002.