

# AVALIAÇÃO DOS COEFICIENTES DE SEGURANÇA DOS CÓDIGOS NORMATIVOS PARA REFORÇOS AO CISALHAMENTO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM PRFC

## Assessments of safety factors of current models for CFRP shear strengthened reinforced concrete beams

Lunna Alexia Uno<sup>1</sup>, Adriano Vieira Risson<sup>2</sup>, Nara Villanova Menon<sup>3</sup>

Recebido em 21 de novembro de 2015; recebido para revisão em 28 de janeiro de 2016; aceito em 24 de março de 2016; disponível on-line em 11 de maio de 2016.



### PALAVRAS CHAVE:

Vigas de concreto armado;  
Reforço ao cisalhamento;  
PRF – (Polímeros Reforçados com Fibras);  
Modelos de análise;  
Coeficientes de segurança.

### KEYWORDS:

RC beams;  
Shear strengthening;  
FRP (fibre-reinforced polymers);  
Analytical models;  
Safety factors.

**RESUMO:** O problema da avaliação do cisalhamento em vigas de concreto armado reforçadas por polímeros reforçados com fibras (PRF) é um assunto muito complexo. As atuais normas/códigos mais importantes e recomendações de pesquisadores quantificam o cisalhamento por meio de uma simples soma das contribuições do concreto ( $V_c$ ), do aço ( $V_{sw}$ ), e do PRF ( $V_f$ ). Apresentar comparações entre as formulações analíticas dos mais importantes códigos e recomendações disponíveis na literatura e avaliar os coeficientes de segurança propostos utilizando dados obtidos de resultados provenientes de investigações experimentais é o objetivo deste trabalho. Desenvolveu-se uma série de comparações entre as normas e recomendações NBR 6118 (2014), EUROCODE 2 (1992), ACI 318M (2011), ACI 440.2R (2008), *fib BULLETIN 14 - TG 9.3* (2001) e CNR-DT 200 (2004). A base de dados foi feita pelos resultados experimentais de 30 vigas de concreto armado reforçadas. Observou-se que algumas normas são mais restritivas em relação às outras, oferecendo uma menor contribuição ao reforço, sendo, portanto, mais seguras. As informações permitiram demonstrar através de gráficos que o comportamento esperado, possível devido ao uso dos coeficientes de segurança, mantiveram os valores de cálculo muito abaixo dos valores de ruptura. Este trabalho pretende contribuir para a melhor utilização da combinação das principais normas utilizadas.

**ABSTRACT:** The problem of the evaluation of the shear strength in RC beams strengthened with fibre-reinforced polymers (FRP) is a very complex subject. The actual most important codes/recommendations quantify the nominal shear strength by a simple sum of the contributions to concrete ( $V_c$ ), steel ( $V_{sw}$ ), and FRP ( $V_f$ ). This paper presents a broad comparison between the experimental results sourced from a number of experimental investigations and the analytical formulation of the most important codes/recommendations available in literature NBR 6118 (2014), EUROCODE 2 (1992), ACI 318M (2011), ACI 440-2R (2008), *fib BULLETIN 14 - TG 9.3* (2001) and CNR-DT 200 (2004) and analyses the safety factors. Experimental results of 30 RC beams strengthened with PRFC made the database. Some guides are more restrictive in respect of the others, giving a minor contribution to the strengthening and, therefore, gives more safety. Graphics Comparisons between the experimental results and the corresponding analytical formulations demonstrated the expected behavior, possible due to the use of safety factors and the design values remained below to the collapses values. This work aims to contribute to the best use of the combination of the main codes used.

\* Contato com os autores:

<sup>1</sup> e-mail: [lunna.alexia@gmail.com](mailto:lunna.alexia@gmail.com) ( L. A. Uno )

Discente do curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

<sup>2</sup> e-mail: [adrianorisson@hotmail.com](mailto:adrianorisson@hotmail.com) ( A. V. Risson )

Engenheiro Civil, Mestrando PCV Estruturas, Universidade Estadual de Maringá.

<sup>3</sup> e-mail: [nvmenon@uem.br](mailto:nvmenon@uem.br) ( N. V. Menon )

Engenheira Civil, Doutora, Professora Associada, Universidade Estadual de Maringá.

## 1. INTRODUÇÃO

A importância do reforço ao cisalhamento deve-se ao modo de colapso, ruptura frágil, e é considerado crítico uma vez que os colapsos por esforço cortante ocorrem sem advertir de antemão. São mais catastróficos quando comparados com os colapsos por flexão, as quais geralmente são mais progressivos e proporcionam um maior período de tempo antes da ruptura. Estudos já efetuados por Taerwe et al. (1997), Chaallal (1997), Triantafillou (1998), Khalifa et al. (2000) dentre outros, demonstraram que a colagem externa de compósitos de PRFC (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono) na forma de mantas e laminados permitem incrementar a resistência ao esforço cortante em vigas de concreto armado mediante o envolvimento total ou parcial dos elementos. Pellegrino e Modena (2008) analisaram experimentalmente diferentes tipos de colapsos e desenvolveram um novo modelo para a contribuição do PRFC em vigas reforçadas ao cisalhamento.

Aumentando-se a resistência ao cisalhamento pode-se ter como resultado colapsos por flexão, os quais são de natureza mais dúctil quando comparados com os colapsos por cisalhamento. No entanto, as ruínas prematuras, principalmente aquelas causadas pelo descolamento antecipado do PRFC, faz com que o nível máximo de tensão mobilizado no reforço seja bastante inferior que a sua resistência última. Esta preocupação está mobilizando a comunidade científica a desenvolver novas formas de reforços ao esforço cortante utilizando o PRFC.

As pesquisas que foram realizadas para estudar a contribuição do PRFC no aumento da capacidade resistente ao cisalhamento do concreto armado em elementos estruturais foram estudos teóricos com base na adição das parcelas conforme descreve a Equação 1.

$$V_n = V_c + V_{sw} + V_f \quad \text{Eq. [1]}$$

Em que:

$V_n$  = Resistência do elemento ao cisalhamento (kN);

$V_c$  = Contribuição do concreto ao cisalhamento (kN);

$V_{sw}$  = Contribuição da armadura transversal ao cisalhamento (kN);

$V_f$  = Contribuição do sistema de compósito ao cisalhamento (kN);

As mais tradicionais normas internacionais validam a adição da contribuição do PRFC à fórmula anteriormente descrita para o concreto e estribos de aço sugerindo uma segurança adicional. Nos últimos anos, pesquisadores têm empreendido esforços notáveis visando compreender o comportamento do polímero reforçado por fibras (PRF) que foram discutidos por vários autores e basearam as recomendações das mais difundidas normas como ACI 440.2R (2008), fib Bulletin 14-TG 9.3 (2001) e o CNR-DT 200 (2004).

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho visa comparar resultados de dados experimentais com formulações analíticas propostas nas normas e códigos mais difundidos. Desenvolveu-se uma série de comparações entre as normas e recomendações NBR 6118 (2014), EUROCODE 2 (1992), ACI 318M (2011), para o concreto armado, e o ACI 440.2R (2008), fib BULLETIN 14 - TG 9.3 (2001) e CNR-DT 200 (2004) para o PRFC. Através de tabelas, gráficos e análise estatística analisa-se o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com PRFC, levando-se em conta os coeficientes de segurança e a contribuição à margem de segurança por eles oferecida para cada combinação.

## 3. MODELOS ANALÍTICOS

Para as várias técnicas de reforço que são utilizadas para aumentar a resistência das vigas ao cisalhamento três configurações principais de colagem se destacam: a colagem do PRFC nas laterais, em três faces em forma de U, e o envolvimento total, conforme ilustra a Figura 1.

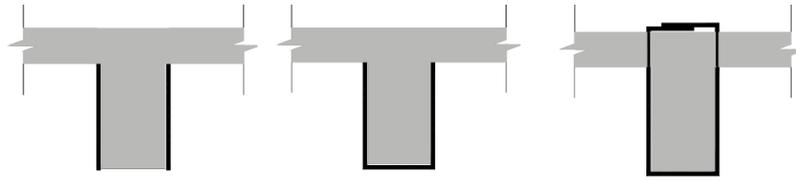


FIGURA 1: Configurações de colagem.

FONTE: ACI 440.2R (2008).

### 3.1 ACI 440.2R (2008)

A resistência nominal ao cisalhamento da viga de concreto armado reforçada com CFRP é determinada pela soma da contribuição do reforço de CFRP com as contribuições do aço e do concreto da seguinte forma, Equação 2:

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad \text{Eq. [2]}$$

Os fatores de redução recomendados são:  $\phi = 0,85$  e  $\psi_f = 0,95$  para envolvimento total e  $\psi_f = 0,85$  para colagem nas laterais ou em três faces em forma de U.

A formulação proposta pela ACI 440.2R (2008), a fim de obter a contribuição do reforço de PRFC à resistência ao cisalhamento total de vigas de concreto, é baseada no trabalho realizado por Khalifa et al. (2000). Considera-se uma teoria para o projeto, onde a fratura do PRFC é bastante semelhante à teoria utilizada para calcular a contribuição da armadura de cisalhamento com aço. No entanto, com base na pesquisa realizada por Triantafyllou (1998), considerou-se que a ruptura do PRFC acontece em valores mais baixos do que a sua força máxima, devido à concentração de tensões. Khalifa et al. (2000) propõem que a contribuição de cisalhamento do PRFC seja dada pela Equação 3:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} \quad \text{Eq. [3]}$$

#### Em que:

$\alpha$  = ângulo de inclinação do reforço com PRF;

$s_f$  = espaçamento entre tiras de PRF;

$d_f$  = altura útil do PRF;

$A_{fv}$  = área total dos PRF

Para calcular a tensão última de tração no reforço ao cisalhamento de PRFC ( $f_{fe}$ ) que corresponde à única incógnita desconhecida na Equação anterior, o nível de tensão que é a deformação última desenvolvida no reforço de PRFC é calculada pela Equação 4:

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad \text{Eq. [4]}$$

#### Em que:

$E_f$  é o módulo de elasticidade e;

$\varepsilon_{fe}$  é a deformação efetiva, dada por meio das Equações 5 e 6.

Para barras totalmente envolvidas:

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75 \varepsilon_{fu} \quad \text{Eq. [5]}$$

Para barras com envolvimento em forma de U e colagem nas laterais:

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad \text{Eq. [6]}$$

### 3.2 fib BULLETIN 14 - TG 9.3 (2001)

A capacidade resistente ao cisalhamento de uma viga reforçada é calculada de acordo com o EUROCODE 2 (1992) como mostra a Equação 7:

$$V_{Rd} = \min(V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}, V_{Rd,2}) \quad \text{Eq. [7]}$$

O modelo analítico fornecido pela fib BULLETIN 14 -TG 9.3 (2001) define a tensão efetiva  $\varepsilon_{fe}$ , correspondente à tensão do PRF antes do colapso por cisalhamento. Esta tensão multiplicada pelo módulo de elasticidade do PRF na direção da fibra  $E_f$  e pela área da seção transversal fornece a capacidade total do elemento reforçado como mostra a Equação 8:

$$V_{fd} = 0,9 \varepsilon_{fd,e} E_{fu} \rho_f b_w d (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad \text{Eq. [8]}$$

Para envolvimento completo ou ancoragem apropriada de CFRP o controle de ruptura do FRP é dado pela Equação 9:

$$\varepsilon_{fe} = 0,17 \cdot \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,30} \cdot \varepsilon_{fu} \quad \text{Eq. [9]}$$

Para colagem do sistema nas laterais ou em forma de U com CFRP é fornecido pela Equação 10:

$$\varepsilon_{fe} = \min \left[ 0,65 \cdot \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3}; 0,17 \left( \frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,30} \cdot \varepsilon_{fu} \right] \quad \text{Eq. [10]}$$

descolamento                      ruptura

As unidades de  $f_{cm}$  devem ser em MPa e  $E_{fu}$  em GPa.

**Em que:**

$\rho_f$  = taxa de reforço;

$t_f$  = espessura do compósito;

$s_f$  = espaçamento entre as faixas de reforço ao cisalhamento;

$w_f$  = largura da faixa de CFRP;

$E_f$  = módulo de elasticidade do compósito;

$\varepsilon_{fe}$  = deformação específica do compósito;

$\beta$  = ângulo de inclinação entre a orientação das fibras e o eixo longitudinal das peças.

Para colapso por aderência (configuração em U ou sem ancoragem) o coeficiente  $\gamma_f$  é igual a 1,3. Como o valor de  $\varepsilon_{fe}$  é um valor médio, multiplica-se por um valor  $k = 0.8$  para se obter o valor característico.

### 3.3 CNR-DT 200 (2004)

Para as recomendações italianas o reforço ao cisalhamento com PRFC deve computar o esforço cortante de acordo com a Equação 11:

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd,ct} + V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,max}) \quad \text{Eq. [11]}$$

Para a configuração do reforço colado nas laterais utiliza-se a Equação 12, sendo que  $\gamma_{Rd}$  deve ser igual a 1,2 ou conforme recomenda a norma:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \min\{0,9d, h_w\} f_{fed} 2t_f \frac{\sin\beta w_f}{\sin\theta s_f} \quad \text{Eq. [12]}$$

Para as configurações em U (três lados) e envolvimento total da viga utiliza-se a Equação 13:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} 0,9d \cdot f_{fed} 2t_f (\cot\theta + \cot\beta) \frac{w_f}{s_f} \quad \text{Eq. [13]}$$

O ângulo  $\theta$  representa a inclinação da fissura diagonal de cisalhamento em relação ao eixo da viga.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 MODELOS TEÓRICOS

Para a avaliação dos modelos teóricos utilizou-se os resultados da pesquisa experimental realizada por Menon (2008), onde foram analisadas experimentalmente 23 vigas com seção transversais retangulares. Todas as vigas foram igualmente dimensionadas: distância entre vãos de 222 cm e seção transversal de 12 x 25 cm. As armaduras longitudinais de tração e compressão eram compostas por duas barras de aço CA-50 com 16 mm de diâmetro. A armadura transversal foi subdimensionada, composta por estribos de aço CA-60 de 4,2 mm de diâmetro com espaçamento de 18 cm. Dez vigas apresentavam reforços laminados nas laterais, seis vigas laminados em forma de U e seis vigas foram envolvidas completamente com faixas de tecido e uma foi utilizada como viga referência, sem reforço. No Quadro 1 apresenta-se as características dos materiais constituintes dos sistemas de reforços em PRFC obtidas nas fichas técnicas disponibilizadas pelo fornecedor.

Os cálculos foram realizados utilizando as planilhas do Microsoft Excel, onde, a partir dos cálculos de resistência ao cisalhamento e contribuição do PRFC, realizou-se as diferentes combinações e em seguida confeccionou-se os gráficos. A carga experimental de ruptura das vigas foi comparada com o valor analítico de cálculo obtido através das diversas combinações que forneceu a margem de segurança fornecida pelos coeficientes de segurança.

Para a determinação da contribuição do concreto e da armadura transversal, foram utilizados os critérios da NBR 6118 (2014) modelo I e modelo II; do EUROCODE 2 (1992) e da ACI 318 (2005), enquanto a contribuição do PRFC foi obtida utilizando-se expressões propostas pelo

**QUADRO 1:** Características dos sistemas de reforço.

Materiais	Resistência à tração (Mpa)	Módulo de elasticidade (Gpa)	Deformação unit. Ruptura (%)	Espessura (mm)
Laminado	2800	165	1,9	1,2
Laminado em L	2250	120	1,7	1,4
Tecido unidirecional	3450	234	1,5	0,12

FONTE: adaptado de Menon (2008).

**QUADRO 2:** Combinações das normas referentes de Concreto Armado com as normas de Reforços com PRFC.

$V_c + V_{sw}$	$V_f$	$V_c + V_{sw}$	$V_f$
<b>EUROCODE 2</b>	Fib 14	<b>NBR 6118 (Modelo I)</b>	Fib 14
	ACI 440.2R		ACI 440.2R
	CNR DT 200		CNR DT 200
<b>ACI 380</b>	Fib 14	<b>NBR 6118 (Modelo II)</b>	Fib 14
	ACI 440.2R		ACI 440.2R
	CNR DT 200		CNR DT 200

FONTE: Autores (2016).

ACI 440.2R (2008), pelo *fib BULLETIN 14 - TG 9.3 - Fib* (2001) e pelo CNR-DT 200 (2004). Os resultados das combinações das diferentes normas relativas a resistência das vigas ao cisalhamento e do reforço oferecido pelo PRFC foram expostos em tabelas gráficas e em uma análise estatística para melhor visualização das margens de segurança. O coeficiente de variação (CV), calculado como a razão entre o desvio padrão e o valor médio da relação existente entre o valor teórico e experimental (Média), pode ser considerado como o parâmetro importante para a avaliação, pois permite a comparação de dados com diferentes valores médios. O Quadro 2 mostra as combinações das contribuições através da fórmula da adição  $V_n = V_c + V_{sw} + V_f$  entre as diferentes normas estudadas.

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Visando avaliar a segurança no equacionamento da contribuição do reforço oferecido pelo PRFC, utilizou-se os dados experimentais obtidos por Menon (2008) executando-se combinações das normas referentes ao equacionamento analítico da contribuição oferecida pelos PRFC ( $V_f$ ) de acordo com as normas *fib BULLETIN 14 - TG 9.3* (2001), ACI 440.2R (2008) e CNR-DT 200 (2004) utilizando os coeficientes de

segurança propostos pelas mesmas com normas que recomendam resistência ao cisalhamento de vigas para o concreto e aço, EUROCODE 2 (1992), ACI 318 (2005) e NBR 6118 (ABNT, 2014).

### 5.1 PRFC LAMINADO COLADO NAS FACES LATERAIS

Para as vigas com reforço colado nas laterais, os ensaios experimentais mostraram um comportamento irregular por apresentar somente uma opção de ancoragem, de forma que o modo de ruptura fica condicionado ao local onde a fissura crítica cruza a lâmina. Os resultados das combinações entre as diferentes normas relativas à resistência das vigas ao cisalhamento estão expostos em tabelas e gráficos que mostram os valores analíticos e os valores de ruptura experimental. Os valores dos resultados apresentados pelas combinações entre as normas estudadas estão mostrados na Tabela 1.

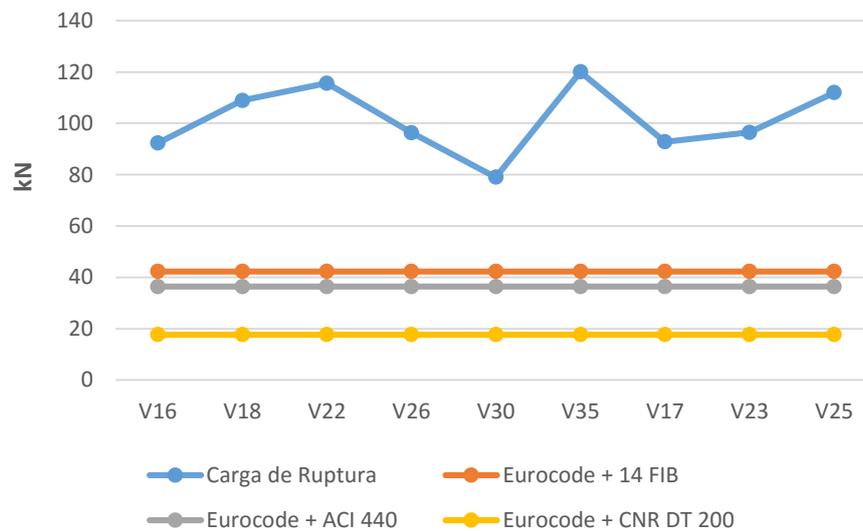
#### 5.1.1 Combinação do EUROCODE 2 com *fib BULLETIN 14- TG 9.3*, CNR-DT 200 e ACI 440.2R

Para esta combinação foram utilizados os valores de cálculo da combinação entre as normas EUROCODE 2 (2004) para determinação de  $V_c + V_{sw}$ , e as normas *fib BULLETIN 14 - TG 9.3 - (2001)*, CNR-DT 200 (2004) e ACI 440.2R (2008). A margem de segurança fornecida pelos valores de cálculo das normas estudadas é mostrada na Figura 2.

**TABELA 1:** Comparação dos valores analíticos com o valor experimental para laminados colados nas laterais.

VIGA	CARGA DE RUPTURA (kN)	$V_c + V_s + V_f$ (kN)					
		EUROCODE			ACI 318		
		14 FIB	ACI 440	CNR DT 200	14 FIB	ACI 440	CNR DT 200
V16	92,32	42,29	36,40	17,64	47,05	41,16	22,41
V18	108,92	---					
V22	115,64	$V_c + V_s + V_f$ (kN)					
V26	96,32	NBR 6118 (1) com			NBR 6118 (2) com		
V30	79,00	14 FIB	ACI 440	CNR DT 200	14 FIB	ACI 440	CNR DT 200
V35	120,02						
V17	92,78						
V23	96,48	46,70	40,81	22,06	46,57	40,68	21,93
V24	77,30						
V25	111,98						

FONTE: Autores (2016).

**FIGURA 2:** Combinações EUROCODE + 14 FIB, EUROCODE + ACI 440 e EUROCODE + CNR DT 200

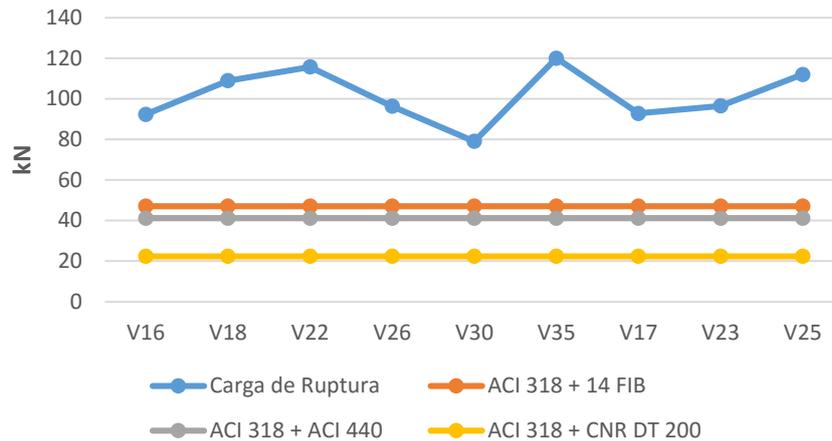
FONTE: Autores (2016).

O arranjo mais conservador foi o calculado pelas normas europeias EUROCODE 2 (1992) e CNR-DT 200 (2004), onde a margem de segurança foi, em todos os casos, maior do que 4,4. Nota-se também que a combinação de cálculo que mais arrojado aproximando-se do valor da carga de ruptura foi entre as normas EUROCODE 2 (1992) e *fib BULLETIN 14 - TG 9.3* (2001), a qual obteve um valor de 42,29 kN de resistência ao cisalhamento do elemento reforçado. Mesmo assim, pôde-se obter uma margem de segurança de 35,01 kN da viga com

carga de ruptura mais baixa, o equivalente a aproximadamente 83 %.

### 5.1.1 Combinação do ACI 318 com *fib BULLETIN 14 - TG 9.3*, CNR-DT 200 e ACI 440.2R

Outro comparativo realizado foi entre os valores de cálculo da combinação entre as normas ACI 318 (2011), para determinação de  $V_c + V_{sw}$ , e as normas *fib BULLETIN 14 - TG 9.3* (2001), CNR-DT 200 (2004) e ACI 440.2R (2008). Conforme o objetivo da pesquisa, a Figura 3 mostra a tolerância entre os valores teóricos e experimentais.



**FIGURA 3:** Combinações ACI 318 + 14 FIB, ACI 318 + ACI 440 e ACI 318 + CNR DT 200

**FONTE:** Autores (2016).

Esta combinação apresenta-se mais conservadora e foi baseada nas normas ACI 318 (2005) e CNR-DT 200 (2004), com resistência ao cisalhamento de 22,41 kN, gerando uma margem de segurança de 54,89 kN para a viga que se rompeu com menor carga. Já a combinação que mais se aproximou do valor obtido nos ensaios experimentais foi entre a ACI 318 (2005) e *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 (2001), o qual apresentou uma margem de segurança de 51,52% para a viga V24.

### 5.1.2 Combinação da NBR 6118 (modelo I) com *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3, CNR-DT 200 e ACI 440.2R

Na Figura 4 pode-se observar as variações entre os valores obtidos nos ensaios experimentais e os teóricos com a combinação da norma brasileira NBR 6118 (2014) pelo modelo I, e as normas *Fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 - (2001), CNR-DT 200 (2004) e ACI 440.2R (2008).

A combinação que contém a contribuição de resistência ao cisalhamento calculada pela norma CNR-DT 200 (2004) é a mais conservadora, chegando a uma margem de segurança de 350% para a viga menos resistente. A combinação composta pela NBR 6118 (2014) no modelo I e a norma *Fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 (2001), foi a que mais se aproximou dos valores apresentados no estudo experimental, portanto a mais arrojada.

### 5.1.3 Combinação da NBR 6118 (modelo II) com *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3, CNR-DT 200 e ACI 440.2R

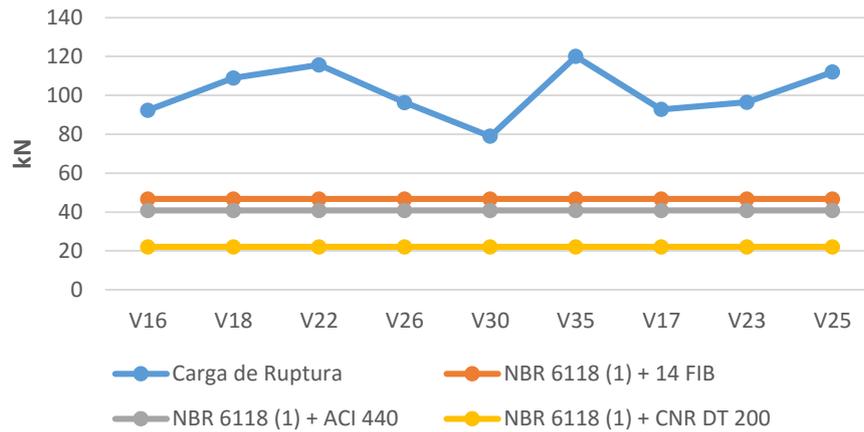
O comparativo entre os valores obtidos dos ensaios experimentais e as combinações entre a norma NBR 6118 (2014) pelo modelo II, e as normas *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 - (2001), CNR-DT 200 (2004) e ACI 440.2R (2008), é mostrado na Figura 5.

Neste caso, confirmando as análises anteriores, a combinação que se mostrou mais próxima dos valores estabelecidos pelos ensaios de ruptura foi entre a NBR 6118 (2014) no modelo II e a norma *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 - (2001), bem como a combinação mais conservadora foi entre a norma brasileira e a CNR-DT 200 (2004).

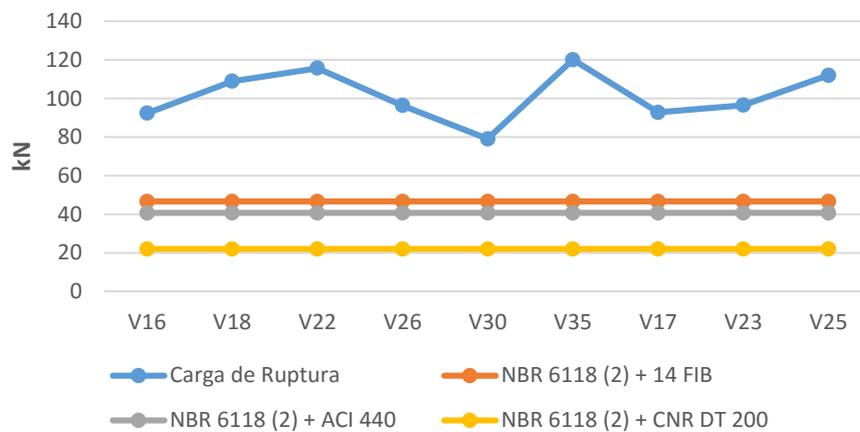
### 5.2 PRFC LAMINADO EM “L” ENVOLVENDO TRÊS FACES DA VIGA (U)

O segundo estudo foi feito com o sistema de reforço laminado em “L” posicionado na forma de U em três faces das vigas. Nestes ensaios os resultados foram mais uniformes, o que pode significar que o processo de desprendimento das lâminas iniciou no banzo inferior, fissurado por flexão e cisalhamento.

Os valores dos resultados apresentados pelas combinações entre as normas estudadas estão mostrados na Tabela 2.



**FIGURA 4:** Combinações NBR 6118-1 + 14 FIB, NBR 6118-1 + ACI 440 e NBR 6118-1 + CNR DT 200.  
**FONTE:** Autores (2016).



**FIGURA 5:** Combinações NBR 6118-2 + 14 fib, NBR 6118-2 + ACI 440 e NBR 6118-2 + CNR DT 200.  
**FONTE:** Autores (2016).

**TABELA 2:** PRF laminado em L (Sika CarboShear L) [envolvimento em U].

VIGA	CARGA DE RUPTURA (kN)	$V_c + V_s + V_f$ (kN)					
		EUROCODE			ACI 318		
		14 FIB	ACI 440	CNR DT 200	14 FIB	ACI 440	CNR DT 200
V19	105,22	40,33	36,84	22,33	45,10	41,60	27,09
V20	114,43	---	---	---	---	---	---
V21	113,19	$V_c + V_s + V_f$ (kN)					
V31	117,5	NBR 6118 (1)			NBR 6118 (2)		
V32	116,6	14 FIB	ACI 440	CNR DT 200	14 FIB	ACI 440	CNR DT 200
V33	115,3	44,75	41,25	26,74	44,61	41,12	26,61

**FONTE:** Autores (2016).

### 5.2.1 EUROCODE 2 + *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3, CNR-DT 200 e ACI 440.2R

Este comparativo foi realizado com base nos valores de cálculo da combinação entre as normas EUROCODE 2 (1992), para determinação de  $V_c + V_{sw}$ , e as normas *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 (2001), CNR-DT 200 (2004) e ACI 440.2R (2008). Pode-se observar na Figura 6 que na comparação entre as cargas de ruptura extraídas dos ensaios experimentais e os valores de cálculo das combinações propostas que o arranjo mais conservador foi o calculado pelas normas europeias EUROCODE 2 (1992) e CNR-DT 200 (2004), onde a margem de segurança foi, em todos os casos, maior do que 470%. Nota-se também que a combinação de cálculo que mais se aproximou do valor da carga de ruptura foi entre as normas EUROCODE 2 (1992) *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 (2001), a qual obteve um valor de 40,33 kN de resistência ao cisalhamento do elemento reforçado. Mesmo assim, pôde-se obter uma margem de segurança de 64,89 kN da viga com carga de ruptura mais baixa, o equivalente a aproximadamente 280%.

### 5.2.2 Combinação do ACI 318 com *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3, CNR-DT 200 e ACI 440.2R

O segundo comparativo do modelo de reforço laminado em “L” realizado foi entre os

valores de cálculo da combinação entre as normas ACI 318 (2011), para determinação de  $V_c + V_{sw}$ , e as normas *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 (2001), CNR-DT 200 (2004) e ACI 440.2R (2008). Conforme o objetivo da pesquisa, a Figura 7 mostra a margem de segurança entre os valores teórico e experimental entre as normas estudadas.

Semelhante a comparação anterior, a combinação mais conservadora foi a calculada pelas normas ACI 318 (2005) e CNR-DT 200 (2004), com resistência ao cisalhamento de 27,09 kN, gerando uma margem de segurança de 78,13 kN para a viga que se rompeu com menor carga.

A combinação que mais se aproximou do valor obtido nos ensaios experimentais foi entre a ACI 318 (2005) e *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 - (2001), o qual apresentou uma margem de segurança de 233% para a viga V19, sendo esta a que menos resistiu nos ensaios.

### 5.2.3 Combinação da NBR 6118 (modelo I) com *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3, CNR-DT 200 e ACI 440.2R

Este comparativo mostra a combinação da norma brasileira NBR 6118 (2014) modelo I, e as normas *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 - (2001), CNR-DT 200 (2004) e ACI 440.2R (2008). A Figura 8 mostra as variações entre os valores.

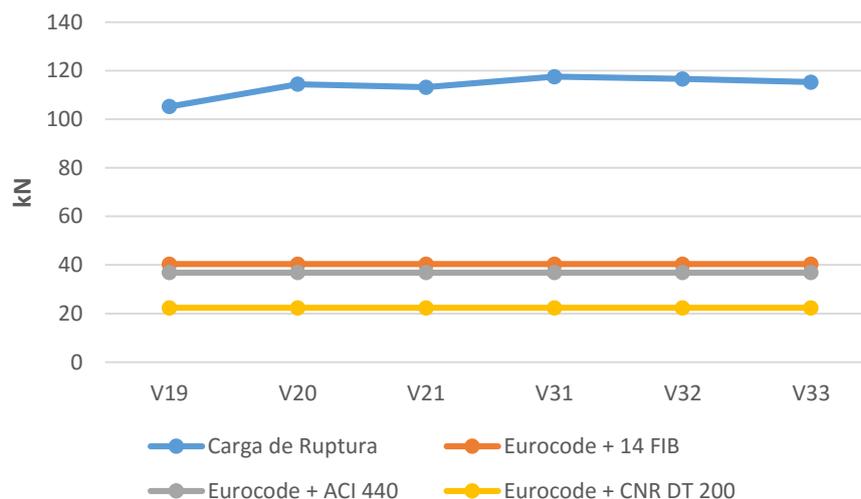
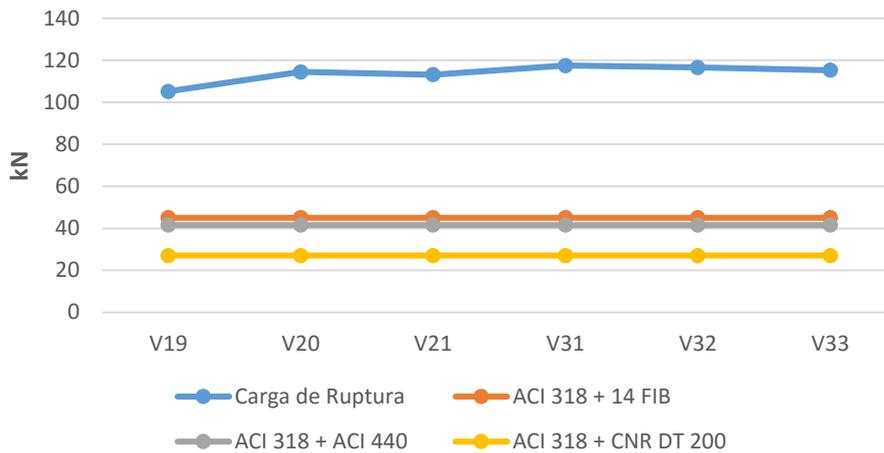


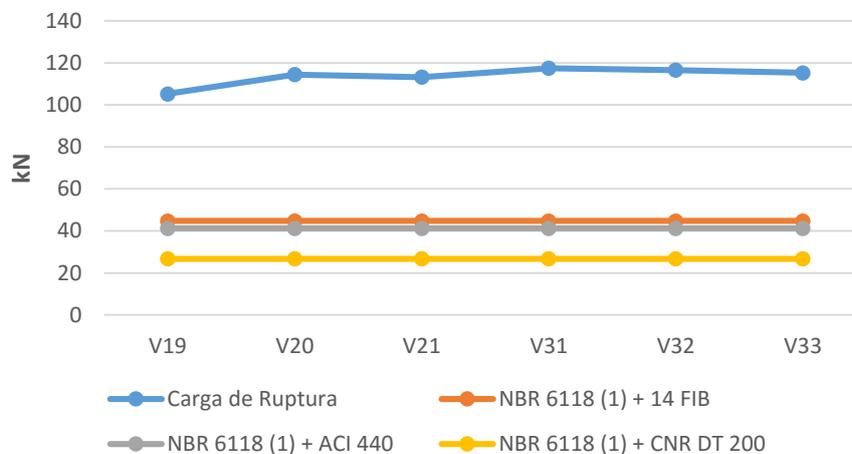
FIGURA 6: Combinações EUROCODE + 14 *fib*, EUROCODE + ACI 440 e EUROCODE + CNR DT 200.

FONTE: Autores (2016).



**FIGURA 7:** Combinações ACI 318 + 14 *fib*, ACI 318 + ACI 440 e ACI 318 + CNR DT 200.

**FONTE:** Autores (2016).



**FIGURA 8:** Combinações NBR 6118-1 + 14 *fib*, NBR 6118-1 + ACI 440 e NBR 6118-1 + CNR DT 200.

**FONTE:** Autores (2016).

Verifica-se na Figura 8 que assim como nos casos anteriores, a combinação que contém a contribuição de resistência ao cisalhamento calculada pela norma CNR-DT 200 (2004) é a mais conservadora, chegando a uma margem de segurança de 390% para a viga menos resistente.

A combinação composta pela NBR 6118 (2014) modelo I e a norma *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 - (2001), foi a que mais se aproximou dos valores apresentado no estudo experimental.

#### 5.2.4 Combinação da NBR 6118 (modelo II) com *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3-, CNR-DT 200 e ACI 440.2R

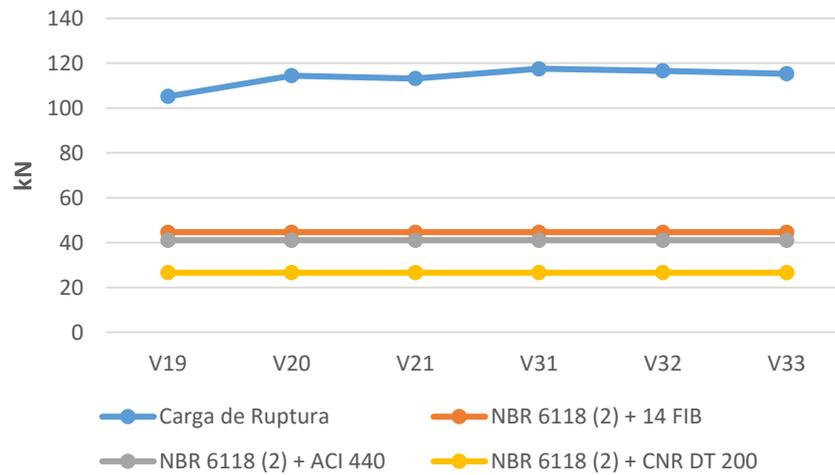
O último estudo desta série avaliou os valores obtidos dos ensaios experimentais e as combinações entre a norma NBR 6118 (2014) modelo II, e as normas *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 - (2001), CNR-DT 200 (2004) e ACI 440.2R (2008),

conforme mostra a Figura 9.

Assim como nas análises anteriores, a combinação que se mostrou mais próxima dos valores estabelecidos pelos ensaios de ruptura foi entre a NBR 6118 (2014) modelo II e a norma *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 - (2001), bem como a mais conservadora foi entre a norma brasileira e a CNR-DT 200 (2004).

#### 5.3 PRFC EM TECIDO COM ENVOLVIMENTO COMPLETO

O sistema de reforço que utilizou faixas de tecido de PRFC apresentou desempenho mais uniforme. A pequena variabilidade nos resultados dos protótipos ensaiados pode ser atribuída a uma condição de ancoragem mais eficiente. Os valores dos resultados apresentados pelas combinações entre as normas estudadas estão mostrados na Tabela 3.



**FIGURA 9:** Combinações NBR 6118-2 + 14 FIB, NBR 6118-2 + ACI 440 e NBR 6118-2 + CNR DT 200  
**FONTES:** Autores (2016).

**TABELA 3:** PRFC em tecido (SikaWrap) [envolvimento completo].

VIGA	CARGA DE RUPTURA (kN)	$V_c + V_s + V_f$ (kN)					
		EUROCODE			ACI 318		
		14 FIB	ACI 440	CNR DT 200	14 FIB	ACI 440	CNR DT 200
V29	120	24,93	24,33	19,05	29,70	29,10	23,81
V37	115,6	---	---	---	---	---	---
V28	114,4	$V_c + V_s + V_f$ (kN)					
V36	120,5	NBR 6118 (1)			NBR 6118 (2)		
V34	114,6	14 FIB	ACI 440	CNR DT 200	14 FIB	ACI 440	CNR DT 200
V38	118,3	29,35	28,75	23,46	29,22	28,61	23,33

FONTES: Autores (2016).

### 5.3.1 EUROCODE 2 + *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3-, CNR-DT 200 e ACI 440.2R

A Figura 10, mostra que na comparação entre as cargas de ruptura extraídas dos ensaios experimentais e os valores de cálculo das combinações propostas. O arranjo mais conservador foi obtido pela combinação das normas europeias EUROCODE 2 (1992) e CNR-DT 200 (2004), onde a margem de segurança foi, em todos os casos, maior do que 600%. Verifica-se também que a combinação de cálculo que mais se aproximou do valor da carga de ruptura foi a combinação das normas EUROCODE 2 (1992) e *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 (2001), a qual obteve um valor de 24,93 kN de resistência ao cisalhamento do elemento reforçado, entretanto muito abaixo dos

valores obtidos nos ensaios experimentais.

### 5.3.2 Combinação do ACI 318 com *fib* BULLETIN 14- TG 9.3, CNR-DT 200 e ACI 440.2R

O segundo comparativo do modelo de reforço em tecido realizado foi entre os valores de cálculo da combinação entre as normas ACI 318 (2011), para determinação de  $V_c + V_{sw}$ , e as normas *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 - (2001), CNR-DT 200 (2004) e ACI 440.2R (2008). Conforme o objetivo da pesquisa, a Figura 11 mostra a margem de segurança entre os valores teórico e experimental entre as normas estudadas.

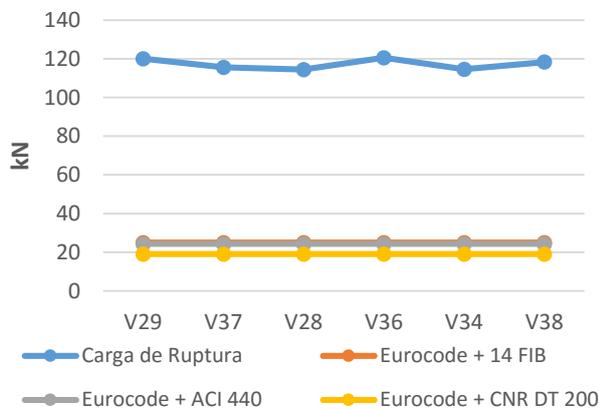
Verifica-se, neste caso, que a combinação que mais se aproximou dos valores de ruptura obtidos nos ensaios foi entre as normas ACI 318 (2011) e *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 - (2001).

### 5.3.3 Combinação da NBR 6118 (modelo I) com *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3-, CNR-DT 200 e ACI 440.2R

Neste comparativo foi realizado com a combinação da norma brasileira NBR 6118 (2014) modelo I, e as normas *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3- (2001), CNR-DT 200 (2004) e ACI 440.2R (2008). A Figura 12 mostra que, assim como as demais combinações, a norma que se apresenta como mais conservadora é a CNR-DT 200 (2004).

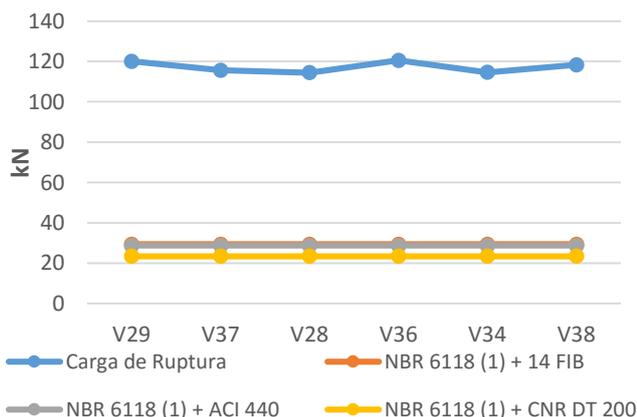
### 5.3.4 Combinação da NBR 6118 (modelo II) com *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3, CNR-DT 200 e ACI 440.2R

O comparativo entre os valores obtidos



**FIGURA 10:** Combinações Eurocode + 14 FIB, Eurocode + ACI 440 e Eurocode + CNR DT 200.

**FONTE:** Autores (2016).

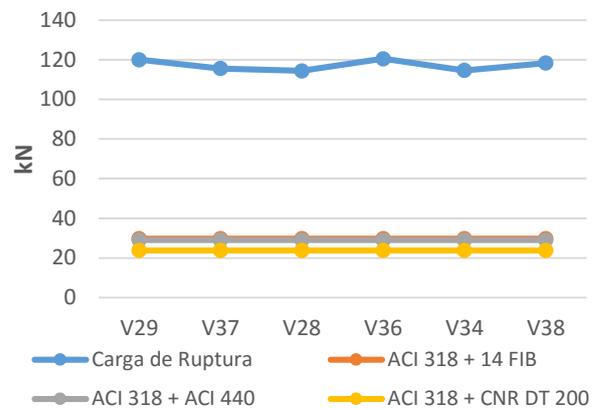


**FIGURA 12:** Combinações NBR 6118-1 + 14 *fib*, NBR 6118-1 + ACI 440 e NBR 6118-1 + CNR DT 200.

**FONTE:** Autores (2016).

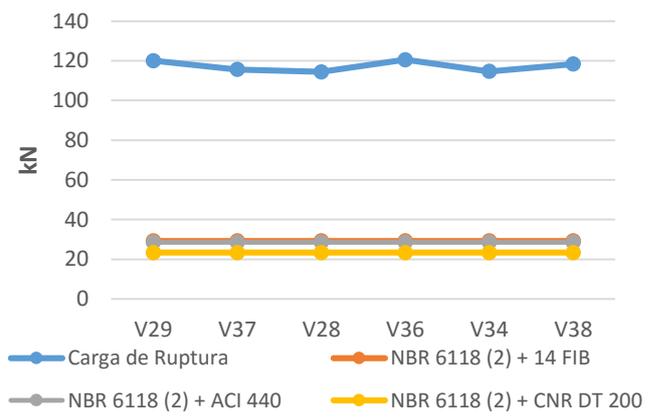
dos ensaios experimentais e as combinações entre a norma NBR 6118 (2014) modelo II, e as normas *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3- (2001), CNR-DT 200 (2004) e ACI 440.2R (2008), são mostrados na Figura 13.

Como nas análises anteriores, a combinação que se mostrou mais próxima dos valores estabelecidos pelos ensaios de ruptura foi entre a NBR 6118 (ABNT, 2014) no modelo II e a norma *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 - (2001), bem como a mais conservadora foi entre a norma brasileira e a CNR-DT 200 (2004).



**FIGURA 11:** Combinações ACI 318 + 14 *fib*, ACI 318 + ACI 440 e ACI 318 + CNR DT 200.

**FONTE:** Autores (2016).



**FIGURA 13:** Combinações NBR 6118-2 + 14 *fib*, NBR 6118-2 + ACI 440 e NBR 6118-2 + CNR DT 200.

**FONTE:** Autores (2016).

## 5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para melhor avaliar e reforçar a conclusão para os principais resultados foi feita uma análise estatística. O o valor do coeficiente de variação (CV) juntamente com valor médio correspondente a razão entre o valor teórico e experimental (Média) são resumidos na Tabela 4.

## 6. CONCLUSÃO

Conclui-se que os coeficientes de segurança sugeridos pelas diversas normas avaliadas têm grande importância, pois foram efetuados estudos com modelos analíticos sem os coeficientes de segurança e os valores dos esforços cortantes atingiram na sua maioria o valor de colapso. Desta forma os coeficientes de segurança propostos pelas normas conferem ao projetista

uma margem de proteção que variam de acordo com o tipo de reforço e com a combinação utilizada em relação aos valores das cargas de ruptura obtidos experimentalmente.

Os gráficos tiveram o comportamento esperado, mantendo sempre os valores de cálculo abaixo dos valores de ruptura, comportamento este, somente possível devido ao uso dos coeficientes de segurança.

O EUROCODE 2 (2004) não foi utilizado pois fornece valores analíticos que atingem os experimentais conforme comprovado na literatura.

Para os laminados colados nas laterais a combinação EUROCODE 2 (1992) e CNR DT 200 (2004) apresentou-se mais conservadora enquanto que a mais arrojada foi a ACI 318 (2005) com a o *fib* BULLETIN 14-TG 9.3 (2001). As margens de segurança para a configuração de reforço em U, apresentaram melhores resultados para a

TABELA 4: Análise Estatística.

PRFCs LAMINADOS (Sika CarboDur S512) [colagem nas laterais]						
	14 <i>fib</i>		ACI 440		CNR DT 200	
	CV	Média	CV	Média	CV	Média
<b>Eurocode</b>	0,44	2,40	0,50	2,79	0,74	5,75
<b>ACI 318</b>	0,40	2,12	0,45	2,50	0,67	4,60
<b>NBR 6118 - Modelo I</b>	0,40	2,17	0,46	2,49	0,68	4,6
<b>NBR 6118 - Modelo II</b>	0,40	2,18	0,46	2,50	0,68	4,63
PRFCs em tecidos (SikaWrap) [envolvimento completo]						
	14 <i>fib</i>		ACI 440		CNR DT 200	
	CV	Média	CV	Média	CV	Média
<b>Eurocode</b>	0,50	2,82	0,54	3,10	0,70	5,09
<b>ACI 318</b>	0,45	2,52	0,49	2,73	0,64	4,20
<b>NBR 6118 - Modelo I</b>	0,46	2,54	0,49	2,76	0,65	4,25
<b>NBR 6118 - Modelo II</b>	0,46	2,55	0,49	2,77	0,65	4,27
PRFCs em tecidos (SikaWrap) [envolvimento completo]						
	14 <i>fib</i>		ACI 440		CNR DT 200	
	CV	Média	CV	Média	CV	Média
<b>Eurocode</b>	0,68	4,7	0,69	4,82	0,75	6,15
<b>ACI 318</b>	0,62	3,95	0,63	4,03	0,69	4,92
<b>NBR 6118 - Modelo I</b>	0,63	3,99	0,63	4,08	0,70	5,00
<b>NBR 6118 - Modelo II</b>	0,63	4,01	0,64	4,10	0,70	5,03

FONTE: Autores (2016).

combinação EUROCODE 2 e CNR DT 200, entretanto, as demais não apresentaram grandes desvantagens. Para a configuração composta por faixas de tecido envolvendo totalmente os lados da viga, os resultados foram semelhantes aos dos laminados em forma de U. Ressalta-se que a NBR 6118 (2014) apresenta combinação mais conservativa com a norma italiana CNR DT 200 (2004) e pouco menos conservativa com o *fib* BULLETIN 14 - TG 9.3 (2001) para ambos os modelos 1 e 2.

O modelo analítico proposto pelo *fib* BULLETIN 14-TG 9.3 (2001) fornece resultados mais homogêneos em termos de CV para as vigas em todos os casos : colagem na lateral, envolvimento em U e total.

O modelo da norma italiana CNR DT 200 (2004) apresenta resultados relativamente bons em termos de CV para a maioria dos casos de vigas em geral e fornece previsões conservadoras.

O modelo proposto pelo ACI 440.2R (2008) fornece resultados relativamente bons em termos de CV ficando entre o *fib* BULLETIN 14-TG 9.3 (2001) e o CNR DT 200 (2004).

Como não existe ainda no Brasil, norma para reforços estruturais utilizando-se polímeros reforçados com fibras de carbono, projetistas e pesquisadores utilizam normas internacionais. Espera-se que este trabalho contribua para a melhor utilização da combinação das principais normas utilizadas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI): **Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (318R-05)**, ACI 318, Farmington Hills, Mich., USA, 2005.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI), **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening of concrete structure**, ACI 440.2R-08, Farmington Hill, Mich., 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-6118: **Projeto de Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro; 2014.

CEN, **Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings**, ENV 1992-1-1 1992, Comité Européen de Normalisation, Brussels. Belgium, 1992.

CEN, **Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings**, ENV 1992-1-1 2004, Comité Européen de Normalisation, Brussels. Belgium, 2004.

CHAALLAL, O, **Shear Strengthening of RC Beams by Externally Bonded Side CFRP Strips**. Journal of Construction, vol. 2, nº 2. May, 1997. pp. 111-113.

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE (CNR), **Instructions for design, execution and control of strengthening interventions through fiber-reinforced composites**. CNR-DT 200-04, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Rome, Italy, 2004.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. Technical report by task group 9.3 FRP reinforcement for concrete structures**, Fédération Internationale du Béton – fib, Bulletin 14,. Lausanne Switzerland. , 2001.

KHALIFA, A., L. De LORENZIS, and A. NANNI, **FRP Composites for Shear Strengthening of RC Beams**, Proc., 3rd Inter. Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Ottawa, Canada, J. Humar and A.G. Razaqpur, Editors, 15-18 Aug. 2000, pp. 137-144.

MENON, N.V. **Estudo Experimental de Sistemas de Reforço ao Cisalhamento em Vigas de Concreto Armado Utilizando-se Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC)**. (Tese) Doutorado em Estruturas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2008, 295 p.

PELLEGRINO C., MODENA C., **An experimentally based analytical model for shear capacity of FRP strengthened reinforced concrete beams**, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 44, n. 3, 2008, pp. 231-244.

TAERWE, L., KHALL, H., MATTHYS, S. **Behavior of RC Beams Strengthened in Shear by External CFRP Sheets Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures**. vol 1, Japan Concrete Institute. Tokyo.1997. pp 487-490

TRIANTAFILLOU, T. **Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites**. ACI Structural Journal, March-April, 1998. pp 107-115.