# Vigas de Concreto Armado com Estribos Plásticos

Francisco Carlos França de Almeida<sup>1</sup> Dênio Ramam Carvalho de Oliveira<sup>2</sup> Vander Luiz da Silva Melo<sup>3</sup>

#### Resumo

A utilização de novas tecnologias no mercado da construção civil, cresce a cada ano, e novos produtos são apresentados em feiras e congressos tecnológicos como alternativas para a redução de custos de produção e de execução de obras. Paralelo a isso, pequenas indústrias desse setor comercializam uns estribos a base de polímeros (plásticos) para uso em vigas e pilares de concreto armado em substituição aos de aço, com a promessa de redução de custos e a garantia da eficiência do seu uso, cujos dados técnicos precisam ser confirmados, tendo em vista que ainda são desconhecidos pela maioria dos profissionais da área, e não têm prescrições técnicas para esse tipo de material no escopo da NBR 6118 (2014), torna-se necessário o estudo de suas propriedades mecânicas. Foram adquiridos, entre outros existentes nesse mercado, um tipo de estribo plástico de formato retangular (100 x 250) mm<sup>2</sup>, inseridos em sete vigas de concreto armado ensaiados na Universidade Federal do Pará com seção (140 x 290) mm<sup>2</sup> e 2200 mm de comprimento, sendo um com estribo de aço para referência, três com estribos plásticos e três com estribos de aço e plástico alternados a cada 150 mm, 100 mm e 75 mm. As armaduras das regiões tracionadas e comprimidas são as mesmas da viga de referência. Foi pesquisada a resistência à força cortante, sendo utilizado o modelo de ensaio STUTTGART. Os resultados experimentais mostraram que o uso dos estribos plásticos, tiveram um desempenho ineficiente em relação aos convencionais de aço, visto que a sua contribuição na resistência à força cortante, foi praticamente desprezível, quando comparado com os resultados obtidos com o uso dos estribos de aço na viga de referência.

Palavras-chave: Viga; Concreto armado; Cisalhamento; Estribo plástico.

## 1 Introdução

A busca por maior produtividade, menores custos e eficiência nas estruturas de concreto armado fomenta a pesquisa na direção da criação de dispositivos mais práticos e que atendam às necessidades de dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais. Tais produtos são lançados como alternativa na substituição de alguns materiais na indústria da construção civil, como é o caso do estribo plástico, objeto de estudo neste trabalho, que chega ao mercado como alternativa de substituição aos estribos de aço. Tal tipo de estribo é apenas um entre outros existentes no mercado da construção civil cujas informações técnicas não são apresentadas de forma clara no momento da compra pelo consumidor, e como em todas as etapas da evolução quando um produto novo chega ao mercado, gera dúvidas sobre a sua eficiência e suas propriedades mecânicas precisam ser analisadas tecnicamente para garantir a segurança do seu uso como elemento estrutural na resistência à força cortante em vigas de concreto armado.

## 2 Materiais e métodos

## 2.1 Resistência à força cortante de acordo com a NBR 6118 – 2014

A NBR 6118 (2014), recomenda que a resistência de vigas submetidas à força cortante sejam verificadas simultaneamente nas duas condições seguintes:

<sup>1</sup> Engenheiro Civil – Instituto Federal do Amapá – E-mail: franca@ifap.edu.br

<sup>2</sup> Professor Doutor da Universidade Federal do Pará – Email: denio@ufpa.br

<sup>3</sup> Graduando de Engenharia Civil Universidade Federal do Pará – Email: vander\_melo@hotmail.com.

$$V_{sd} \le V_{Rd2} \tag{1}$$

$$V_{sd} \le V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \tag{2}$$

onde

- V<sub>sd</sub> força cortante solicitante de cálculo, na seção (kN);
- $V_{Rd2}$  força cortante resistente de cálculo referente à ruína das diagonais comprimidas do concreto (kN);
- $V_{Rd3}$  força cortante resistente de cálculo referente à ruína das diagonais tracionadas do concreto (kN);
- $V_c$  contribuição do concreto (kN);
- $V_{sw}$  parcela resistida pela armadura transversal (kN).

Para a estimativa das forças resistentes de cálculo essa norma sugere dois modelos de cálculo. O modelo de cálculo I admite uma inclinação das diagonais comprimidas de 45° em relação ao eixo longitudinal da viga, e considera que a parcela  $V_c$  tenha valor constante independentemente de  $V_{sd}$ . As Equações 3 e 4 apresentam as forças resistentes de acordo com o modelo de cálculo I; as de números 5 e 6 apresentam, respectivamente, a parcela resistida pela armadura transversal e a força cortante resistente de cálculo referente à ruína das diagonais tracionadas. A altura útil da seção é dada pela Equação 7.

> a) Verificação da compressão diagonal do concreto

$$V_{Rd2} = 0,27 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} b_w d$$
(3)

b) Cálculo da armadura transversal

$$V_{c} = 0.09 f_{ck}^{23} b_{w} d$$
(flexão simples e flexo - tracão) (4)

$$= \left(\frac{A_{sw}}{sw}\right) 0.9 df \quad (sen a + cos a) \tag{5}$$

$$V_{sw} = \left(\frac{sw}{s}\right) 0,9 \, df_{ywd} \, (sen \, \alpha + \cos \alpha) \tag{5}$$

$$V_{Rd2} = V_c + V_w \tag{6}$$

onde

- $b_{w}$  menor largura da seção (mm);
- d altura útil da seção (mm);
- $A_{sw}$  área da seção transversal do estribo (mm<sup>2</sup>);
- espaçamento entre os estribos (mm);
- $f_{vwd}$  tensão na armadura transversal;

 $\alpha$  – ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, podendo-se tomar 45°  $\leq \alpha \leq 90^{\circ}$ .

c) Cálculo da altura útil da viga

$$d = h - (\frac{\emptyset}{2} + c + \emptyset_{\text{estribo}}) = 258,8 \text{ mm}$$
 (7)

onde

h – altura da viga (290 mm);

Ø – diâmetro da armadura de flexão (12,5 mm);

Ø<sub>estribo</sub> – diâmetro do estribo.

O modelo de cálculo II admite uma inclinação das diagonais comprimidas variando entre  $30^{\circ}$  e  $45^{\circ}$ . Admite ainda que a parcela  $V_c$  varie variação com o aumento de  $V_{sd}$ . As Equações 8 e 9 apresentam as forças resistentes de acordo com o modelo de cálculo II; a Equação 10 apresenta a parcela resistida pela armadura transversal, e a Equação 11 a força cortante resistente de cálculo referente à ruptura das diagonais tracionadas.

 d) Verificação da compressão diagonal do concreto

$$V_{Rd2} = 0,54 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} b_w d sen^2 \theta$$

$$(cotg\alpha + cotg\theta)$$
(8)

e) Cálculo da armadura transversal

$$V_{c} = 0.09 f_{ck}^{23} b_{w} d, \text{ quando } V_{sd} \le V_{c}$$
(flexão simples e flexo - tração) (9)

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s}\right) 0.9 \, df_{ywd} \tag{10}$$

 $(cotg \alpha + cotg \theta)$  sen  $\alpha$ 

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \tag{11}$$

onde

- $V_c = 0$ , quando  $V_{sd} = V_{Rd2}$ , interpolando-se linearmente para valores intermediários;
- $f_{ck}$  resistência característica do concreto;
- $b_w$  menor largura da seção (mm);
- d altura útil da seção (mm);
- θ ângulo de inclinação das diagonais de compressão em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, variável entre 30° e 45°.

Para o cálculo das cargas de ruptura nas vigas, foram empregados nas variáveis das equações os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis das equações.

Variáveis	Valor
$b_{w}$	140,0 mm
h	290,0 mm
а	700,0 mm
L	2.000,0 mm
$f_{c,m}$	43,7 MPa
$f_{ys}$	592,0 MPa
$f_{ywk,a}$	515,0 MPa
$f_{_{ywk,p}}$	21,1 MPa
$A_{sw,a}$	368,1 mm <sup>2</sup>
$A_{_{sw,p}}$	19,63 mm <sup>2</sup>
d	258,8 mm
С	20,0 mm

Para o cálculo da carga última de ruptura por flexão  $P_{flex}$  foram utilizadas as equações de 12 a 17, cujos resultados são apresentados na Tabela 2 juntamente com as demais cargas de ruptura das vigas.

$$RC = 0.95 f_{ck} b_w \, 0.8 \, x \tag{12}$$

 $RS = A_s f_{vs} \tag{13}$ 

$$RC = RS \tag{14}$$

Tabela 2 – Resultados para as cargas de ruptura.

$$MR_{K} = A_{s} f_{vs} (d - 0, 4)$$
(15)

$$MS = \frac{P_{flex}}{2}a$$
 (16)

$$MS = MR_{\kappa} \tag{17}$$

onde

<i>RC</i> – resistência do concreto;	
--------------------------------------	--

- RS resistência do aço;
- $MR_{\kappa}$  momento resistente característico;
- MS momento solicitante;
- a distância entre o apoio e o ponto de aplicação da carga;
- $P_{flex}$  carga última de ruptura por flexão;

x – altura da linha neutra.

## 2.3 Programa experimental

#### 2.3.1 Armaduras de Flexão Força Cortante

Com o objetivo de analisar o comportamento dos estribos plásticos a ruptura à força cortante, as armaduras de flexão foram compostas por três barras de aço CA50 com diâmetro de 12,5 mm na região tracionada da viga, e como armadura de composição, foram utilizados duas barras de aço com diâmetro de 5,0 mm na sua região comprimida. A armadura transversal, foi compostas por estribos de aço de 5,0 mm com seção retangular 100 mm x 250 mm, e pelos estribos plásticos, o com seção retangular 100 mm x 250 mm, seis travas tipo "clip" para armaduras de flexão, três pontas de 20 mm em cada lado, duas pontas de 10 mm na parte superior e duas pontas de 10 mm na inferior como espaçadores de cobrimento da armadura (Figura 1).

Vigas	Modelo de Cálculo I $\alpha = 90^{\circ}$	Modelo de Cálculo II $\theta = 30^{\circ}$	Modelo de Cálculo III $\theta = 45^{\circ}$	$P_{flex}$
VRF150	111,6	123,9	140,3	
V1P150	80,9	81,5	112,5	
V2P100	81,7	82,7	113,2	
V3P075	82,5	83,8	114,0	153,6
V4A150	96,2	102,7	126,4	
V5A100	104,7	114,4	134,1	
V6A075	113,2	126,1	141,8	

### 2.3.2 Características das vigas

Foram confeccionadas sete vigas com seção de (140 x 290) mm<sup>2</sup> e 220 mm de comprimento, sendo uma de referência com estribos de aço espaçados a cada 150 mm (VRF150), três somente com estribos plásticos espaçados a cada 150 mm, 100 mm e 75 mm (V1P150, V2P100 e V3P075), e três com estribos de aço e plásticos alternados a cada 150 mm, 100 mm e 75 mm (V4A150, V5A100 e V6A075), conforme apresentado na Tabela 3, sendo suas montagens e detalhes mostrado nas Figuras 2 a 8.

		1
Identificação da viga	Espaçamento (mm)	Tipo de estribo
VRF 150	150	Estribo de aço
V1P 150	150	Estrike
V2P 100	100	Estribo
V3P 075	75	plastico
V4A 150	150	Alternância
V5A 100	100	de estribos
V6A 075	75	plástico e de aço
	1	1

Tabela 3 – Características das vigas.



Figura 1 – Armaduras de flexão e força cortante das vigas.



Figura 2 – Armadura da viga de referência VRF150.



Figura 3 – Armadura da Viga V1P150.





Figura 4 – Armadura da Viga V2P100.



Figura 5 – Armadura da Viga V3P075.



Figura 6 – Armadura da Viga V4A150.



Figura 7 – Armadura da Viga V5A100.



Figura 8 – Armadura da Viga V6A075.

#### 2.4 Instrumentação

## 2.4.1 Deslocamentos verticais

Em todas as vigas os deslocamentos verticais foram medidos na face inferior no meio do vão da viga, ponto de maior flecha. Para tal foram utilizados deflectômetros digitais da marca DIGIMESS com precisão de 0,01 mm. O deflectômetro foi fixado em um sistema de suporte independente para evitar interferências nas leituras devido a movimentações no sistema de ensaio, e ao se aproximar da carga de ruptura o mesmo era removido por segurança.

# 2.4.2 Deformação específica nas armaduras e no concreto

Para os registros das deformações específicas nas armaduras e no concreto foram utilizados extensometros elétricos de resistência (EER), fabricados pela EXCEL Sensores Ind. Com. Exp. Ltda. (Figura 9). A precisão da indicação da deformação específica pelo EER está relacionada ao emprego de técnicas corretas de montagem e com o adesivo empregado. Para isso foram utilizados os procedimentos de instalação recomendados pelo fabricante.



Figura 9 – Extensômetro EER.

#### a) Deformação específica das armaduras

Nas armaduras de flexão e de força cortante, utilizou-se extensômetros modelo PA-06-125AA-120, e para as deformações específicas no concreto o modelo PA-06-201BA-120L, ambos com fator de sensibilidade FS = 2,1 e resistência de 120  $\Omega$ . Em cada viga foi fixado um extensômetro posicionado no centro da barra longitudinal, e lateralmente em um estribo de aço e outro no estribo plástico. Nas vigas com estribos alternados plástico-aço utilizou-se um extensômetro em cada tipo (Figura 10).



Figura 10 – Posição dos extensômetros, sendo um no estribo plástico e outro no de aço.



Figura 11 – Posição dos extensômetros nas armaduras.

A Figura 11 mostra os posicionamentos dos extensômetros nos estribos de aço e de plástico após as suas montagens.

## b) Deformação específica no concreto

Em cada viga foi fixado um extensômetro na sua face superior da viga para se realizar uma análise comparativa das suas deformações específicas por flexão naquela região, como mostra a Figura 12.

## 2.5 Sistema de ensaio

O sistema de ensaio foi composto por um pórtico metálico fixado à laje de reação do laboratório, como suporte para aplicação de carga; dois blocos de concreto, onde foram posicionados dois aparelhos de simulação de apoio, sendo um de 1º gênero e outro de 2º gênero; um cilindro hidráulico com capacidade de carga de 1000 kN para aplicação do carregamento nas vigas; uma célula de carga com capacidade de 1000 kN e precisão de 1 kN. No ensaio de *STTUTGART* o carregamento era aplicado sobre uma viga de reação que distribuía a carga em dois roletes afastados 700 mm dos apoios. O carregamento foi aplicado na direção vertical, no sentido de cima para baixo com incrementos de carga de 5 kN. A leitura dos extensômetros durante os ensaios era realizada por meio do sistema de aquisição de dados "ALMEMO". A Figura 13 mostra a representação esquemática do sistema de ensaio *STTUTGART*. O ponto de aplicação das forças, atendeu à razão a/d  $\ge 2$ (sendo a = 700 mm e d = 258,80 mm).

# 3 Resultados e discussões

## 3.1 Propriedades dos materiais

A resistência à compressão do concreto foi determinada pelo ensaio de três corpos-de-prova cilíndricos de dimensões (100 x 200) mm<sup>2</sup>, moldados de acordo com as recomendações da NBR 5738 (2003)



Figura 12 – Posição do extensômetro na região comprimida da viga.



Figura 13 – Esquema do modelo de ensaio STTUTGART e a sua Vista 3D.

e ensaiados segundo a NBR 5739 (2007). A Tabela 4 contém os resultados dos ensaios.

СР	$f_{c}$ (MPa)	Resistência Média $f_{cm}$ (MPa)
1	46,1	
2	43,8	43,7
3	41,1	

Tabela 4 – Resultado dos ensaios de resistência a<br/>compressão dos corpos de prova.

As barras de aço foram caracterizadas seguindo as recomendações da NBR 6152 (1992) utilizandose três amostras de mesmo lote das barras tanto de 12,5 mm como de 5,0 mm, e seus gráficos são mostrados nas Figuras 14 e 15, respectivamente. A Tabela 5 apresenta os valores obtidos nos ensaios.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de tração das<br/>barras de aço.

Ø (mm)	$f_{ys}$ (MPa)	$\epsilon_{ys}$ (‰)	Es (GPa)
12,5	610,3	3,05	200,1
5,0	529,0	4,63	201,1



Figura 14 – Gráfico do ensaio de tração da armadura de 12,5 mm.



Figura 15 – Gráfico do ensaio de tração da armadura de 5,0 mm.

Os ensaios dos corpos de prova dos estribos plásticos foram confeccionados conforme a norma ASTM D638/ 2014 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics), visto que a NBR 9622/86 (Plásticos – determinação das propriedades mecânicas a tração) foi cancelada em novembro de 2015. A Figura 16 mostra o gráfico dos ensaios, e a Tabela 6 apresenta os valores desses resultados.



Figura 16 – Gráfico da carga x alongamento do ensaio dos estribos plástico.

<b>Tadela 6</b> – Resultados dos ensalos de tração dos estribos plásticos.
--

Amostra	Força Máxima (N)	ForçaLimite deMáximaResistência(N)(MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)
Amostra 1	545	22	31,5	0,32
Amostra 2	512	21	13,0	0,29
Amostra 3	515	21	9,5	0,33
Valor Médio	524	21	18	0,31

### 3.2 Vigas pós-ensaio / mapas de fissuração

Os ensaios das sete vigas foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA, cujos resultados são mostrados nas Figuras 17 a 30, juntamente com o mapa de suas fissuras. Cada viga era transportada e instalada no pórtico metálico, e realizada a sua instrumentação para o registro dos resultados. Após o ensaio era realiza-se a sua desmontagem e transporte para um local adequado fora do laboratório.

O ensaio começou com a viga de referência VRF150 com armadura transversal composta de 15 estribos de aço, espaçados a cada 150 mm, conforme mostrado na Figura 17. O seu mapa de fissuração está na Figura 18, onde se observa que as primeiras fissuras de flexão apareceram após a aplicação de uma carga de 20 kN, e o registro de fissuras de força cortante até a aplicação da carga de 130 kN antes da sua ruptura.

Em seguida, fez-se o ensaio da viga V1P150 composta com 15 estribos plástico, espaçados a cada 150 mm, conforme mostra a Figura 19 e o seu mapa de fissuração (Figura 20), onde se observa que as primeiras fissuras de flexão apareceram após a aplicação de uma carga de 25 kN, com o surgimento de fissuras de força cortante até a aplicação da carga de 90 kN, antes da carga de ruptura de força cortante, por tração. Posteriormente ensaiou-se a viga V2P100 composta por 21 estribos plástico, espaçados a cada 100 mm, conforme mostra a Figura 21. Na Figura 22 se observa que as primeiras fissuras de flexão apareceram após a aplicação de uma carga de 30 kN, com fissuras de força cortante de até 70 kN antes da aplicação da carga de ruptura, por tração e dividir a viga em duas partes.

Em seguida, ensaiou-se a viga V3P075 composta por 29 estribos plástico, alternados a cada 75 mm, conforme mostra a Figura 23, e no seu mapa de fissuração (Figura 24) se observa que as primeiras fissuras de flexão apareceram após a aplicação de uma carga de 40 kN, e assim se comportou até a carga de 65 kN, antes da aplicação da carga de ruptura de força cortante, e dividir a viga em duas partes.

A Figura 25 mostra a viga V4A150 após o ensaio. A armadura transversal era composta por 15 estribos, sendo oito de plástico e sete de aço, alternados a cada 150 mm. A Figura 26 mostra o seu mapa de fissuração, onde se observa que as primeiras fissuras de flexão apareceram após a aplicação da carga de 15 kN, com o registro de fissuras de força cortante até a carga de 75 kN, antes de se romper após a aplicação da carga de ruptura por tração diagonal.

Em seguida, ensaiou-se a viga V5A100 composta



*Figura 17* – *Fissuras na viga VRF150 após a ruptura por flexão com esmagamento do concreto na região comprimida.* 



Figura 18 – Mapa de fissuras da Viga VRF150.

por 21 estribos, sendo 11 de plástico e 10 de aço, alternados a cada 100 mm. As Figuras 27 e 28 mostram, respectivamente, o resultado do ensaio e o seu mapa de fissuração, com as fissuras correspondentes às etapas das cargas, onde se observa que as primeiras fissuras de flexão apareceram após a aplicação de uma carga de 25 kN, sendo registrado fissuras de força cortante até a aplicação da carga de ruptura.



Figura 19 – Fissuras na viga V1P150 após ruptura de força cortante, por tração.



Figura 20 – Mapa de fissuras da Viga V1P150.



Figura 21 – Fissuras na viga V2P100 após ruptura de força cortante, por tração.



Figura 22 – Mapa de fissuras da Viga V2P100.



Figura 25 – Fissuras na viga V4A150 após ruptura de força cortante, por tração.



Figura 26 – Mapa de fissuras da Viga V4A150.



Figura 27 – Fissuras na viga V5A100 após ruptura de força cortante, por tração.



Figura 28 – Mapa de fissuras da Viga V5A100.



Figura 29 – Fissuras na viga V6A075 após ruptura por flexão com rompimento por esmagamento do concreto na região comprimida.



Figura 30 – Mapa de fissuras da Viga V6A075.

Os ensaios terminaram com a viga de referência V6A075 com armadura transversal composta de 14 estribos de aço e 15 estribos plásticos alternados e espaçados a cada 75 mm. A Figura 29 mostra a viga no sistema de ensaio, e o seu mapa de fissuração é mostrado na Figura 30, onde se observa que as primeiras fissuras de flexão apareceram após a aplicação da carga de 20 kN. As fissuras de força cortante foram registradas até a carga de 105 kN, antes da aplicação da carga de ruptura.

#### 3.3 Deslocamentos verticais

Em todas as vigas os deslocamentos verticais foram medidos no meio do vão na face inferior da viga, ponto de maior flecha durante pequenos intervalos entre as etapas de carga. Foi utilizado deflectômetro digital da marca DIGIMESS com precisão de 0,01 mm, e fixado em um sistema de suporte independente para evitar interferências nas leituras devido às movimentações no sistema de ensaio. Ao se aproximar da carga de ruptura, o deflectômetro era removido por segurança. A Figura 31 mostra os deslocamentos verticais das vigas.

Os gráficos mostram que as vigas com estribos plásticos nas diversas formas de distribuição e montagem, tiveram comportamentos nos deslocamentos de suas flechas semelhantes ao da viga VRF150, até as suas rupturas, visto que têm as mesma armadura de flexão e concreto.



Figura 31 – Deslocamento vertical das vigas.

# 3.4 Deformações específicas nas superfícies do concreto

A medida das deformações nas superfícies específicas do concreto foi obtida por meio de um extensômetro elétrico posicionado na região superior da viga, local de maior compressão na flexão. Os resultados encontrados para as deformações específicas na superfície do concreto em cada um dos modelos ensaiados estão ilustrados na Figura 32.



Figura 32 – Deformação específica na superfície do concreto.

Observa-se que entre as vigas com estribos plástico a maior deformação específica apresentada antes da ruptura ficou a viga V6A075, e a situação mais desfavorável, isto é, as que tiveram rompimentos ainda com pouca deformação específica foram as vigas com estribos plásticos V3P075 e V2P100, cujos espaçamentos eram 75 mm e 100 mm, respectivamente.

#### 3.5 Deformações específicas na armadura de flexão

A armadura de flexão foi monitorada no meio do comprimento da barra central. Os gráficos que representam as deformações das armaduras de flexão são mostrados na Figura 33.



Figura 33 – Deformação específica da armadura de flexão.

Nesses gráficos observa-se que inicialmente que as armaduras de flexão de todas as vigas tiveram praticamente os mesmos comportamentos até a deformação específica de 1,5‰, isto é, antes do início das rupturas das vigas com estribos plásticos por força cortante a qual se deram após 2‰. Depois somente as vigas VRF150 e V6A075 alcançaram solicitações na armadura de flexão maiores que a tensão de escoamento  $f_{vs}$  que é equivalente a uma deformação específica de 3,05‰ ( $\mathcal{E}_{ys}$  = 3,057). Esse nível de solicitação caracteriza ruptura por flexão.

#### 3.6 Deformações específicas dos estribos plásticos

Foi monitorados o estribo plástico localizados na Viga V1P150 a 300 mm do apoio, na V2P100 a 400 mm, na V3P075 a 450 mm, na V4A150 a 300 mm, na V5A100 a 200 mm e na V6A075 a 225 mm do apoio. O gráfico que representa as deformações específicas dessas armaduras de cisalhamento é mostrado na Figura 34.



Figura 34 – Deformação específica dos estribos plásticos.

A melhor resistência ficou com a viga V6A075, pois teve a maior deformação específica antes da ruptura em virtude da grande contribuição do aço-concreto que levou a resistência próxima a 150 kN. A maioria das vigas tiveram pequenas deformações específicas (menor que 0,5%) antes de romperem. A viga V2P100 teve uma deformação específica praticamente igual a viga V1P150, mas rompeu antes, mesmo tendo um menor espaçamento entre os estribos. A viga V3P075, para uma mesma carga de ruptura, teve a maior deformação específica, e a menos resistente (60kN), mesmo tendo um menor espaçamento entre os estribos plásticos. Esse fato ocorreu em virtude da maior contribuição do concreto nas outras vigas de maior espaçamento. Observa-se também que todas vigas com estribo plástico romperam bem antes do limite de escoamento do aço estimado em 3,05‰.

#### 3.7 Deformações específicas dos estribos de aço

A armadura de cisalhamento foi monitorada pelos extensômetros colocados nos estribos de aço das vigas conforme mostrado na Figura 11 nas seguintes posições:

> VRF150 – localizado a 450 mm do apoio; V4A150 – localizado a 150 mm do apoio;

V5A100 – localizado a 300 mm do apoio; V6A075 – localizado a 300 mm do apoio;

O gráfico que representa as deformações específicas das armaduras de força cortante com estribos de aço é mostrado na Figura 35.



Figura 35 – Deformação específica dos estribos de aço.

Observa-se que todas as quatro vigas que apresentaram aço como estribo de combate ao força cortante, inicialmente tiveram o mesmo comportamento quanto as suas deformações específicas até a carga aproximada de 80 kN. As vigas V4A150 e V5A100 não apresentaram registro das suas deformações específicas antes de romperem com as cargas de com 87 kN e 120,5 kN, respectivamente, pois apesar da verificação do perfeito funcionamento do extensômetro, os caminhos das suas fissuras seguiram outras trajetórias impossibilitando a leitura. A viga VRF150 teve uma grande deformação específica próxima de 0,5‰ após aplicação de carga de 80 kN, no momento quando continha pouca contribuição de concreto para resistir à força cortante. A fissura seguiu deformando até a sua ruptura por força cortante, após a aplicação de uma carga de 145 kN. A viga V6A075 teve uma grande deformação após aplicação de uma carga de 85 kN, e depois em virtude das sequências dos carregamentos, continuou-se deformando passando do seu limite de deformação específica de 4,63‰, até a sua ruptura por flexão após a carga de 143,5 kN.

## 4 Comparação dos resultados estimados (NBR) com os do ensaio

Para comparação dos resultados dos ensaios com os resultados calculados de acordo com a norma NBR 6118 (2014), foram utilizados os resultados encontrados no modelo de cálculo I com  $f_{c,m} = 43,7$  MPa, pois foram os menores encontrados entre os modelos de cálculo. De acordo com a Tabela 7 verificou-se que que a razão  $V_u / V_{u,est}$  ficou próximo a de um com uma diferença para mais ou para menos no intervalo de -6% a 19%. Esses resultados comprovam que os ensaios foram executados conforme estabelece a norma brasileira.

A determinação do modo de ruptura foi baseada no comportamento das vigas no momento da falha, observando-se as deformações específicas da armadura de flexão e do concreto, deslocamentos verticais e fissuração. Quanto à carga última  $V_u$ , foi considerada como a máxima carga registrada pela leitora da célula de carga. A viga de referência VRF150 e a V6A075 foram as que apresentaram maior carga de ruptura, ambas rompendo por flexão, com esmagamento das fibras comprimida do concreto em virtude da sua maior deficiência naquela região. As vigas entraram em colapso antes mesmo que o aço das fibras tracionada tenha entrado em escoamento, enquanto que as demais tiveram ruptura características por força cortante com

**Tabela 7** – Comparação: resultados de cálculos NBR6118:2014 x resultados dos ensaios.

Viga	Modo de ruptura	Modelo de Cálculo I $\infty = 90^{\circ}$ $(V_{u,est})$	P <sub>flex</sub> (kN)	Resultados dos ensaios $V_u$ (kN)	$V_u/V_u$	Perda de resistência vigas ensaiadas %	Perda média de resistência %
VRF150	Flexão	111,6	153,7	145	0,94	0,0	0,0
V1P150	Força cortante	80,9		96	1,19	33,8	
V2P100	Força cortante	81,7		73	0,89	49,7	43,9
V3P075	Força cortante	82,5		75	0,91	48,3	_
V4A150	Força cortante	96,2		87	0,90	40,0	
V5A100	Força cortante	104,7		120,5	1,15	16,9	19,3
V6A075	Flexão	113,2		143,5	0,93	1,0	

ruptura inicialmente dos estribos plásticos destinados a resolver as forças de trações que surgem por influência das forças cortantes.

No geral, as vigas se comportaram da maneira esperada e com cargas de ruptura próximas às estimadas teoricamente, com exceção das vigas V1A150 que apresentou um resultado acima do esperado, visto a comparação de sua composição estrutural com as demais vigas, pois sua resistência foi maior que a da viga V2A100, V3A075 e V4A150. Tal resistência, acredita-se que em ambas situações, seja a grande contribuição do concreto e da armadura de flexão. A Tabela 7 também apresenta as cargas últimas  $V_u$  das vigas ensaiadas em comparação com as cargas características teóricas estimadas  $V_{uest}$  segundo a NBR 6118 (2014).

# 5 Conclusões

Os resultados experimentais mostraram que o estribo plástico apresentado neste trabalho como elemento estrutural de resistência à força cortante em vigas de concreto armado, tem uma resistência a tração muito baixa, em torno 21 MPa quando comparada com os 529 MPa do estribo de aço, e o seu módulo de elasticidade de 0,30 GPa também é muito baixo comparado com o do estribo de aço ensaiado (201 GPa). Os resultados dos ensaios mostraram que sua contribuição na resistência à força cortante nas vigas é quase que desprezível, ficando o conjunto aço-concreto os responsáveis pelos valores registrados nos referidos ensaios.

As perdas nas resistências das seis vigas com estribos plásticos variaram muito em relação a viga de referência em virtude das disposições dos espaçamentos entre os estribos, sendo que as vigas V1P150, V2P100 e V3P075 cujas armaduras transversais eram compostas somente por estribos plásticos, houve uma perda da resistência em média da viga de 43,9%, enquanto que as vigas V4A150, V5A100 e V6075 que tinham estribos alternados plásticos-aço, essa perda ficou em média de 19,3%. Nas vigas V4A150 e V5A100, as perdas foram somente em virtude do aumento dos espacamentos entre os seus estribos de aço, os quais ficaram com 200 mm e 300 mm, respectivamente. A viga V6A075 foi a que teve menor perda de resistência (1%), em virtude do espacamento entre os estribos de aço alternados ficarem 150 mm, ou seja o mesmo espaçamento da viga de referência, e a presença desse estribo entre dois de aço não melhorou

a sua eficiência. Desta forma conclui-se que o uso do estribo plástico como armadura resistente à força cortante, é ineficiente, pois praticamente as vigas que continham somente esses estribos se comportaram como se não houvessem armaduras transversais, e quando usados alternadamente com os estribos de aço, não melhoraram os seus desempenhos a ruptura.

# Referências

AMERICAN STANDARTS FOR TESTING AND MA-TERIALS. D 638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. EUA, ASTM, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉC-NICAS. NBR 5738: Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos-de-prova. Rio de Janeiro, ABNT, 2015. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉC-NICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉC-NICAS. NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto: Procedimentos, Rio de Janeiro, ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉC-NICAS. NBR 6892-1: Materiais metálicos – Ensaio de Tração – Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2015.

CAMACHO, J. S. (2004) Curso de concreto armado – Estudo do esforço cortante. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Civil. Ilha Solteira, São Paulo.

CHAER, A. V.; OLIVEIRA, M. G. D. Notas de Aula da disciplina Estruturas de Concreto Armado I. Curso Engenharia Civil – Goiânia – GO; 2001.

FUSCO, P. B. (1981). Estruturas de Concreto. Solicitações Normais. Rio de Janeiro: LTC.

HIBBELER, R. C. Resistência dos Materiais. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. Construções de Concreto, Rio de Janeiro, v. 1, 2 e 3, 1981.

MacGREGOR, J. G., WIGHT, J. K. – Reinforced Concrete: Mechanics and Design – 6th ed. – 2009.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P. Fundamentos do Concreto e Projeto de Edificios. (Apostila), São Paulo, Universidade de São Carlos, 2003.