

## **5 Apresentação e Análise dos Resultados**

### **5.1. Notas Iniciais**

Neste capítulo são mostrados e analisados os resultados obtidos nos ensaios das oito vigas, comparando-os com os valores teóricos das diversas expressões apresentadas na revisão bibliográfica do Capítulo 2. Os valores efetivos das resistências do concreto, aço e CFC são analisados de acordo com os ensaios realizados nesses materiais cujos resultados são mostrados no item 4.2 do Capítulo 4.

### **5.2. Apresentação dos Resultados**

#### **5.2.1. Viga VR1**

O ensaio da viga de referência da Série I foi realizado no dia 24/10/2006, sendo iniciado às 10 h: 15 min, e terminando às 13 h: 00 min. O incremento de força inicial foi de 1 kN, depois de 2 kN, passando para 5 kN e então para 10 kN até a sua ruptura. A primeira fissura de flexão surgiu com 70 kN, com abertura aproximada de 0,1 mm. As primeiras fissuras inclinadas na região do trecho de cortante, entre o ponto de aplicação da força e o apoio, apareceram com uma força de 95 kN, também com abertura da ordem de 0,1 mm, onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG3 com o valor de 0,067 %.

À medida que foram sendo realizados os incrementos de força, as fissuras inclinadas foram aumentando não somente em quantidade, mas também em abertura. A viga foi levada até a ruína para uma força de 407,22 kN, que ocorreu por tração diagonal no trecho entre a aplicação da força e o apoio.

A máxima deformação específica registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG3 com o valor de 5,508 %, ou seja, acima da deformação

específica de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm, que foi de 3,0 %. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 2,867 %. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 13,05 mm, e os LVDT 1 e 3 apresentaram problemas durante as suas respectivas leituras, abandonando-se esses valores.

As deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto são mostradas na Tabela 5.1. As leituras do extensômetro SG6 foram abandonadas, pois o mesmo apresentou valores inconsistentes.

Tabela 5.1 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VR1.

<b>Extensômetro</b>	<b>Ângulo em relação a horizontal</b>	<b><math>\epsilon_c</math> (%)</b>
<b>SG6</b>	90°	–
<b>SG7</b>	45°	-0,312
<b>SG8</b>	0°	-0,267
<b>SG9</b>	90°	-0,059
<b>SG10</b>	45°	-0,462
<b>SG11</b>	0°	-0,418

As Fotos A.21 e A.22 do Anexo A mostram os detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

### **5.2.2. Viga VI-1**

A primeira etapa de carregamento da viga VI-1 foi realizada no dia 16/06/2007, sendo iniciado às 14 h: 15 min e terminado às 15 h: 15 min. O ensaio foi inicialmente realizado com incrementos de força de 5 kN e depois com 10 kN até a sua interrupção, que ocorreu para uma força de 165,41 kN, para qual já havia a presença de fissuras de flexão e de cortante, com pequenas aberturas entre 0,1 e 0,2 mm, onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG1 com o valor de 0,220 %. Durante o carregamento em torno de 165 kN a viga de

concreto foi então “travada” e mantida sob deformação e carregamento teoricamente constantes.

Após a execução do reforço realizou-se a colagem dos EER no CFC e o ensaio foi retomado no dia 25/06/2007, às 11 h: 00 min e terminado às 12 h: 30 min. Os incrementos iniciais de força foram de 10 kN até 200 kN, sendo a partir deste valor aplicada uma força em incrementos de 20 kN até o final do carregamento. Antes da ruptura observaram-se alguns “estalos”, seguidos de pequenos descolamentos em alguns pontos do reforço. O rompimento da viga ocorreu para uma força de 552,79 kN devido a ruptura por tração diagonal na região entre a aplicação da força e o apoio (“trecho de cortante”) e o imediato descolamento do reforço na região da ancoragem (extremidade do estribo em U).

A máxima deformação específica 4,246 ‰ registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG2, ou seja, acima da deformação específica de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm, que foi de 3,0 ‰. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 4,208 ‰. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 19,19 mm e os LVDT 1 e 3 apresentaram as leituras de 16,95 mm e 16,67 mm, respectivamente. A deformação específica máxima registrada nas tiras em U de CFC foi lida no SG13 com o valor de 7,398 ‰, menor que o valor encontrado no ensaio à tração deste material que foi de 11,636 ‰. Os valores das deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VI-1.

<b>Extensômetro</b>	<b>Ângulo em relação a horizontal</b>	<b><math>\epsilon_c</math> (‰)</b>
<b>SG6</b>	60°	-0,358
<b>SG7</b>	45°	-0,477
<b>SG8</b>	30°	-1,018
<b>SG9</b>	60°	-0,742
<b>SG10</b>	45°	-0,511
<b>SG11</b>	30°	-1,063

As Fotos A.23 e A.24 do Anexo A mostram os detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

### **5.2.3. Viga VI-2**

A primeira etapa de carregamento da viga VI-2 foi realizada no dia 05/07/2007, sendo iniciado às 14 h: 10 min e terminado às 15 h: 20 min. O ensaio foi inicialmente realizado com incrementos de força de 5 kN e depois com 10 kN até a sua interrupção, que ocorreu para uma força de 166,97 kN, para qual já havia a presença de fissuras de flexão e de cortante, com pequenas aberturas entre 0,1 a 0,3 m, onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG2 com o valor de 0,319 ‰. Para o carregamento em torno de 166 kN ocorreu o “travamento” dessa viga para manutenção da deformação e do carregamento da mesma quando ocorresse o desligamento dos equipamentos de aplicação de carga.

Executado o reforço em CFC e a colagem dos EER em sua superfície, o ensaio foi retomado no dia 16/07/2007 às 09 h: 55 min, e terminado às 11 h: 30 min. Os incrementos iniciais de força foram de 10 kN até 200 kN, sendo a partir deste valor aplicado incrementos de força de 20 kN até o final do ensaio. Antes da ruptura observaram-se alguns “estalos”, seguidos de pequenos descolamentos em alguns pontos do reforço. A ruptura da viga ocorreu, para uma força de 586,65 kN, por tração diagonal no “trecho de cortante”, com o descolamento do reforço na região da ancoragem.

A máxima deformação específica registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG4 com o valor de 6,710 ‰, ou seja, acima da deformação específica de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm que foi de 3,0 ‰. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 4,581 ‰. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 17,91 mm e os LVDT 1 e 3 apresentaram as leituras de 16,63 mm e 16,53 mm, respectivamente. A deformação específica máxima registrada nas tiras em U de CFC foi lida no SG13 com o valor de 4,749 ‰, também abaixo do valor encontrado no ensaio à tração deste material. Os valores das deformações

específicas máximas lidas na superfície do concreto são mostradas na Tabela 5.3. As leituras do SG7 foram desprezadas por apresentarem valores inconsistentes.

Tabela 5.3 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VI-2.

<b>Extensômetro</b>	<b>Ângulo em relação a horizontal</b>	<b><math>\epsilon_c</math> (%)</b>
<b>SG6</b>	60°	-0,708
<b>SG7</b>	45°	–
<b>SG8</b>	30°	-1,166
<b>SG9</b>	60°	-0,525
<b>SG10</b>	45°	-0,586
<b>SG11</b>	30°	-0,519

As Fotos A.25 e A.26 do Anexo A mostram os detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

#### **5.2.4. Viga VI-3**

A etapa de pré-fissuração da viga VI-3 foi realizada no dia 10/08/2007, sendo iniciado às 13 h: 40 min, e terminado às 14 h: 30 min. O ensaio foi inicialmente realizado com incrementos de força de 5 kN e depois com 10 kN até a sua interrupção, que ocorreu com uma força de 168,55 kN, para qual já havia a presença de fissuras de flexão e de cortante, com pequenas aberturas entre 0,1 a 0,3 mm, onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG1 com o valor de 2,486 %. A viga foi devidamente “travada” para o carregamento em torno de 168 kN, mantida sob deformação e carregamento constantes.

Realizou-se a colagem do reforço em CFC e a fixação dos EER neste material, sendo o ensaio reiniciado no dia 20/08/2007, às 14 h: 10 min, e terminado às 15 h: 50 min. Os incrementos iniciais de força foram de 10 kN até 200 kN, sendo a partir deste valor aplicados incrementos de 20 kN até o final do carregamento. Antes da ruptura, observaram-se alguns “estalos”, seguidos de pequenos descolamentos em alguns pontos do reforço. O rompimento da viga

ocorreu por tração diagonal no “trecho de cortante” para uma força de 590,13 kN, com o descolamento do CFC na região da ancoragem.

A máxima deformação específica registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG1 com o valor de 7,458 ‰, ou seja, acima da deformação específica de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm que foi de 3,0 ‰. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 3,707 ‰. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 17,28 mm e os LVDT 1 e 3 apresentaram as leituras de 15,66 mm e 16,04 mm, respectivamente. A deformação específica máxima registrada nas tiras em U de CFC foi lida no SG15 com o valor de 4,533 ‰, também abaixo do valor encontrado no ensaio à tração deste material. Os valores das deformações máximas lidas na superfície do concreto são mostradas na Tabela 5.4. As leituras do SG6 foram desprezadas por apresentarem valores inconsistentes.

Tabela 5.4 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VI-3.

Extensômetro	Ângulo em relação a horizontal	$\epsilon_c$ (‰)
SG6	60°	–
SG7	45°	-0,180
SG8	30°	-0,699
SG9	60°	-0,368
SG10	45°	-1,386
SG11	30°	-1,011

As Fotos A.27 e A.28 do Anexo A mostram detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

### 5.2.5. Viga VR2

O ensaio da viga de referência da série II VR2 foi realizado no dia 01/11/2006, sendo iniciado às 14 h: 00 min, e terminando às 16 h: 15 min. O incremento de força inicial foi de 5 kN, passando-se para 10 kN até a sua ruptura.

A primeira fissura de flexão surgiu com 65 kN, com abertura aproximada de 0,1 mm. As primeiras fissuras inclinadas na região do trecho de cortante apareceram com uma força em torno de 108 kN, também com abertura da ordem de 0,1 mm, onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG3 com o valor de 0,037 %.

À medida que foram sendo realizados os incrementos de força, as fissuras inclinadas foram aumentando não somente em quantidade, mas também em abertura. A viga foi levada até a ruína para uma força de 302,50 kN, que ocorreu por tração diagonal no trecho entre a aplicação da força e o apoio.

A máxima deformação específica registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG4 com o valor de 0,86 %, sendo este menor que a deformação específica de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm que foi de 3,0 %. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 2,24 %. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 12,89 mm, o LVDT 1 registrou o valor de 6,93 mm e o LVDT 3 apresentou problemas em suas leituras, sendo, portanto desprezados esses valores. Os valores das deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto são mostradas na Tabela 5.5. As leituras dos extensômetros SG6, SG9 e SG11 foram desprezadas, pois os mesmos apresentaram valores inconsistentes.

Tabela 5.5 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VR2.

<b>Extensômetro</b>	<b>Ângulo em relação a horizontal</b>	<b><math>\epsilon_c</math> (%)</b>
<b>SG6</b>	90°	–
<b>SG7</b>	45°	-0,375
<b>SG8</b>	0°	-0,715
<b>SG9</b>	90°	–
<b>SG10</b>	45°	-0,432
<b>SG11</b>	0°	–

As Fotos A.29 e A.30 do Anexo A mostram os detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

### 5.2.6. Viga VII-1

A etapa de pré-fissuração da viga VII-1 foi realizada no dia 09/02/2007, sendo iniciado às 13 h: 30 min, e terminado às 15 h: 00 min. O ensaio foi realizado com incrementos de força de 5 kN até a sua interrupção, que ocorreu com uma força de 111,68 kN, no qual já havia a presença de fissuras de flexão e de cortante, com pequenas aberturas da ordem de 0,1 mm, onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG1 com o valor de 0,012 ‰. O “travamento” da viga foi realizado para a força em torno de 110 kN, onde a mesma foi mantida sob deformação e carregamento constantes.

Na seqüência efetuou-se o reforço em CFC e a respectiva colagem dos EER neste material, sendo o ensaio reiniciado no dia 23/02/2007, às 14 h: 00 min, e terminado às 15 h: 45 min. Os incrementos iniciais de força foram de 10 kN até a força de 170 kN, adotando-se a partir deste valor, o incremento de força de 20 kN até o final do ensaio. Antes da ruptura observaram-se alguns “estalos”, seguidos de pequenos descolamentos em alguns pontos do reforço. O rompimento da viga ocorreu para uma força de 433,34 kN, por tração diagonal na região do cortante e o imediato descolamento do reforço na região da ancoragem.

A máxima deformação específica registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG3 com o valor de 1,552 ‰, estando este abaixo da deformação específica de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm que foi de 3,0 ‰. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 2,062 ‰. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 12,52 mm e os LVDT 1 e 3 apresentaram problemas durante as suas respectivas leituras, sendo, portanto desprezados esses valores. A deformação específica máxima registrada nas tiras em U de CFC foi lida no SG12 com o valor de 2,080 ‰, menor que o valor encontrado no ensaio à tração deste material que foi de 11,636 ‰. Os valores das deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto são mostrados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VII-1.

Extensômetro	Ângulo em relação a horizontal	$\epsilon_c$ (%)
SG6	60°	-0,276
SG7	45°	-0,428
SG8	30°	-0,277
SG9	60°	-0,534
SG10	45°	-0,332
SG11	30°	-0,120

As Fotos A.31 e A.32 do Anexo A mostram os detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

### 5.2.7. Viga VII-2

A primeira etapa de carregamento da viga VII-2 foi realizada no dia 27/03/2007, sendo iniciado às 14 h: 15 min, e terminado às 15 h: 30 min. O ensaio foi realizado com incrementos de força de 5 kN até a sua interrupção, que ocorreu com uma força de 135,37 kN, para a qual já se observava a presença de fissuras de no meio do vão, e também no trecho de cortante (fissuras inclinadas), onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG2 com o valor de 0,090 %. Para a força em torno de 135 kN, a viga foi então “travada” e mantida sob deformação e carregamento teoricamente constantes, após o desligamento dos equipamentos de aplicação de carga.

Efetuuou-se a execução do reforço em CFC e depois foram fixados os EER no reforço, sendo o ensaio retomado no dia 12/04/2007, às 14 h: 30 min. Porém, no instante de aplicação da força de 385,46 kN ocorreu uma pequena torção na viga metálica que transmitia as forças lidas por meio da célula de carga para a viga de concreto, o que comprometia o andamento do ensaio. Logo se tentou por meio de um “enrijecimento” da alma da viga metálica, dar prosseguimento ao carregamento, porém, essa viga continuou apresentando deformação devido à torção. Optou-se por interromper o ensaio com a força em torno de 250 kN e

substituir a viga metálica por outra com maior resistência a torção, mantendo-se também a deformação e carregamento constantes.

Os incrementos iniciais de força foram de 10 kN até 150 kN, sendo a partir deste valor, aplicado o incremento de força igual a 20 kN até o final do carregamento. Pouco antes da ruptura observaram-se alguns “estalos”, seguidos de pequenos descolamentos em alguns pontos do reforço. O rompimento da viga ocorreu para uma força igual a 466,57 kN, por tração diagonal na região do cortante, com o descolamento do CFC na região da ancoragem.

A máxima deformação específica registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG4 com o valor de 1,632 ‰, estando este abaixo da deformação de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm que foi de 3,0 ‰. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 2,721 ‰. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 12,60 mm, o LVDT 1 registrou o valor de 10,36 mm e LVDT 3 apresentou problemas em suas leituras, sendo, portanto desprezado esses valores. A deformação específica máxima registrada nas tiras em U de CFC foi lida no SG15 com o valor de 5,463 ‰, sendo este também menor que o valor encontrado no ensaio à tração deste material. Os valores das deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto são mostrados na Tabela 5.7. As leituras do SG8 foram desprezadas por apresentarem valores inconsistentes.

Tabela 5.7 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VII-2.

<b>Extensômetro</b>	<b>Ângulo em relação a horizontal</b>	<b><math>\epsilon_c</math> (‰)</b>
<b>SG6</b>	60°	-0,725
<b>SG7</b>	45°	-1,076
<b>SG8</b>	30°	–
<b>SG9</b>	60°	-0,625
<b>SG10</b>	45°	-0,756
<b>SG11</b>	30°	-0,700

As Fotos A.33 e A.34 do Anexo A mostram detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

### **5.2.8. Viga VII-3**

A primeira etapa de carregamento da viga VII-3 foi realizada no dia 24/07/2007, sendo iniciado às 10 h: 10 min, e terminado às 11 h: 30 min. O ensaio foi inicialmente realizado com incrementos de força de 5 kN até a sua interrupção, que ocorreu com uma carga de 140,34 kN, no qual já havia a presença de fissuras de flexão e de cortante, com pequenas aberturas entre 0,1 a 0,3 mm, onde a maior deformação específica nos estribos foi registrada no SG4 com o valor de 0,319 ‰. Durante o carregamento em torno de 140 kN a viga de concreto foi “travada” e mantida sob deformação e carregamento constantes.

Após a execução da colagem reforço e dos EER neste material, o ensaio foi retomado no dia 02/08/2007, às 14 h: 35 min, e terminado às 16 h: 10 min. Os incrementos iniciais de força foram de 10 kN até 180 kN, sendo a partir deste valor, aplicados incrementos de 20 kN até o final do ensaio. Antes da ruptura, observou-se um pequeno descolamento em uma faixa de CFC para uma carga próxima a 400 kN, seguido de alguns “estalos” no reforço. A ruptura da viga ocorreu para uma carga de 416,30 kN, por tração diagonal na região do cortante, com imediata descolamento do reforço na região da ancoragem.

A máxima deformação específica registrada nos estribos foi lida no extensômetro SG1 com o valor de 0,745 ‰, estando também abaixo da deformação específica de escoamento encontrada no ensaio de tração do aço para a barra de 5,0 mm que foi de 3,0 ‰. Para a deformação específica última (SG5) da barra de flexão chegou-se a um valor de 2,603 ‰. A flecha lida no meio do vão pelo LVDT 2 foi de 13,31 mm e os LVDT 1 e 3 apresentaram as leituras de 11,76 mm e 12,97 mm, respectivamente. A deformação específica máxima registrada nas tiras em U de CFC foi lida no SG12 com o valor de 4,428 ‰, sendo este também menor que o valor encontrado no ensaio à tração deste material. Os valores das deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto são mostrados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Deformações específicas máximas lidas na superfície do concreto da viga VII-3.

<b>Extensômetro</b>	<b>Ângulo em relação a horizontal</b>	<b><math>\epsilon_c</math> (%)</b>
<b>SG6</b>	60°	-0,237
<b>SG7</b>	45°	-0,318
<b>SG8</b>	30°	-0,366
<b>SG9</b>	60°	-0,404
<b>SG10</b>	45°	-0,556
<b>SG11</b>	30°	-0,656

As Fotos A.35 e A.36 do Anexo A mostram detalhes da ruptura desta viga. As leituras e os gráficos das forças, deformações específicas e flechas são mostrados nos Anexos D e E.

### **5.3. Análise dos Resultados**

As Tabelas 5.9 e 5.10 mostram resumidamente os resultados das forças últimas alcançadas, as deformações específicas máximas registradas nas armaduras de flexão, nos estribos de aço e de CFC, os deslocamentos máximos verticais lidos no LVDT 2 (meio do vão), e os parâmetros registrados nos ensaios das vigas e dos materiais. Alguns valores dos ensaios dos corpos-de-prova dos materiais mostrados no item 4.2 são os seguintes:  $E_{sw} = 198,51 \text{ MPa}$ ,  $E_f = 255,18 \text{ MPa}$  e  $\epsilon_{f,u} = 11,636 \%$ .

Tabela 5.9 – Forças, deformações específicas, flechas últimas e modo de ruptura das vigas.

Viga	Camadas de CFC	Deformação específica máxima $\varepsilon_{exp}$ (‰)			Flecha máxima (mm) LVDT 2	$P_{u,exp}$ (kN)	Tipo de Ruptura
		Flexão (SG5)	Estribo de aço	Estribo de CFC			
VR1	–	2,87	5,51 (SG3)	–	13,05	407,22	tração diagonal
VI-1	1	4,21	4,25 (SG2)	7,40 (SG13)	19,19	552,79	tração diagonal com descolamento imediato do CFC
VI-2	2	4,58	6,71 (SG4)	4,75 (SG13)	17,91	586,65	tração diagonal com descolamento imediato do CFC
VI-3	3	3,71	7,46 (SG1)	4,53 (SG15)	17,28	590,13	tração diagonal com descolamento imediato do CFC
VR2	–	2,24	0,86 (SG4)	–	12,89	302,50	tração diagonal
VII-1	1	2,06	1,55 (SG3)	2,08 (SG12)	12,52	433,34	tração diagonal com descolamento imediato do CFC
VII-2	2	2,72	1,63 (SG4)	5,46 (SG15)	12,60	466,57	tração diagonal com descolamento imediato do CFC
VII-3	3	2,60	0,75 (SG1)	4,43 (SG12)	13,31	416,30	tração diagonal com descolamento imediato do CFC

Para as vigas da Série I (VR1, VI-1, VI-2 e VI-3) observou-se uma boa consistência nos resultados conforme mostram os dados apresentados na Tabela 5.9, com deformações específicas máximas registradas na armadura transversal para o aço da mesma ordem da observadas para o CFC. Constata-se também que para esta Série todos os estribos de aço escoaram.

Na Série II (VR2, VII-1, VII-2 e VII-3), as deformações específicas nos estribos de aço não atingiram o escoamento e apresentaram valores bem inferiores que as das tiras de CFC, com exceção da deformação específica máxima do

reforço da viga VII-1 lido pelo SG12 que apresentou um valor bem inferior em relação às outras vigas.

Pela Tabela 5.9 observou-se que as deformações específicas últimas da armadura de flexão em todas as vigas ficaram acima da deformação específica de escoamento registrada nos ensaios de tração da barra de 16,0 mm, que foi de 1,99%. Nas vigas VI-1 e VI-2, apesar das deformações específicas últimas apresentaram valores um pouco acima da deformação de ruptura encontrada no mesmo ensaio de tração dessa barra de aço, que foi de 4,14%, as suas rupturas não ocorreram por flexão e sim por tração diagonal.

Tabela 5.10 – Força cortante última e parâmetros das vigas.

Viga	$V_{u,exp}$ (kN)	$f_c$ (kN)	$\rho_{sw}$ (%)	$t_f$ (mm)	$\rho_f$ (%)	$\frac{V_{u,exp}}{V_{u,ref}}$
<b>VR1</b>	203,61	48,44	0,262	–	–	–
<b>VI-1</b>	276,40	51,73	0,262	0,122	0,072	1,36
<b>VI-2</b>	293,33	51,73	0,262	0,244	0,145	1,44
<b>VI-3</b>	295,07	52,30	0,262	0,366	0,217	1,45
<b>VR2</b>	151,25	49,92	0,131	–	–	–
<b>VII-1</b>	216,67	50,94	0,131	0,122	0,072	1,43
<b>VII-2</b>	233,29	51,73	0,131	0,244	0,145	1,54
<b>VII-3</b>	208,15	52,30	0,131	0,366	0,217	1,38
<b>Média</b>						<b>1,43</b>
<b>Desvio padrão</b>						<b>0,07</b>
<b>Coef. de var. (%)</b>						<b>4,55</b>

Por meio dos dados da Tabela 5.10 observa-se que houve um ganho considerável de resistência à força cortante para as vigas reforçadas com CFC em relação a sua respectiva viga de referência, cuja média de acréscimo foi de 43%. Porém, a viga VII-3 com três camadas de tiras em U, registrou uma força última inferior às vigas VII-1 e VII-2. Este fato provavelmente ocorreu devido a uma deficiência na colagem da terceira camada de algumas tiras de CFC para esta viga.

Nas Figuras 5.1 e 5.2 são mostrados os gráficos comparativos entre as forças cortantes últimas das Séries I e II.

Os valores da resistência do concreto mostrados na Tabela 5.11 apresentaram uma pequena variação de 7,97 % entre o menor (48,44 MPa) e o maior valor (52,30 MPa) registrados durante o ensaio de cada viga.

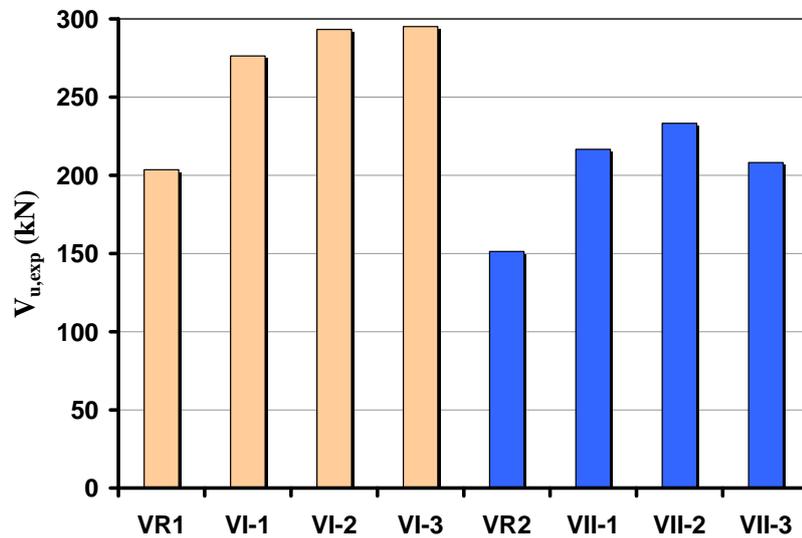


Figura 5.1 – Forças cortantes últimas registradas nos ensaios das vigas.

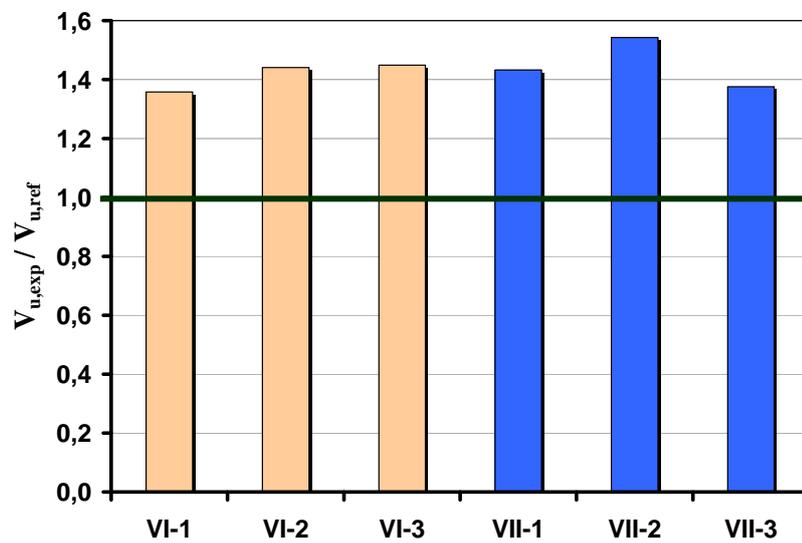


Figura 5.2 – Razão entre a força cortante última da viga reforçada e da viga de referência.

### 5.3.1. Parcelas Resistidas pelo Aço, Concreto e CFC

Para a determinação das parcelas da força cortante última relativas ao concreto, aço e CFC foi realizada a análise considerando-se dois ângulos para a inclinação da biela: o ângulo das fissuras  $\theta_{CR}$  e o ângulo da deformação específica principal  $\theta_\varepsilon$  obtido por medições do estado de deformação da viga.

O ângulo médio de fissuração  $\theta_{CR}$  no “trecho de cortante” foi determinado digitalmente com a utilização de uma foto digital para cada uma das vigas ensaiadas e o software *Autocad 2007*, na qual interpolou-se graficamente uma reta sobre a fissura inclinada principal (Figura 5.3). Os valores dos ângulos obtidos para cada viga são mostrados na Tabela 5.11.

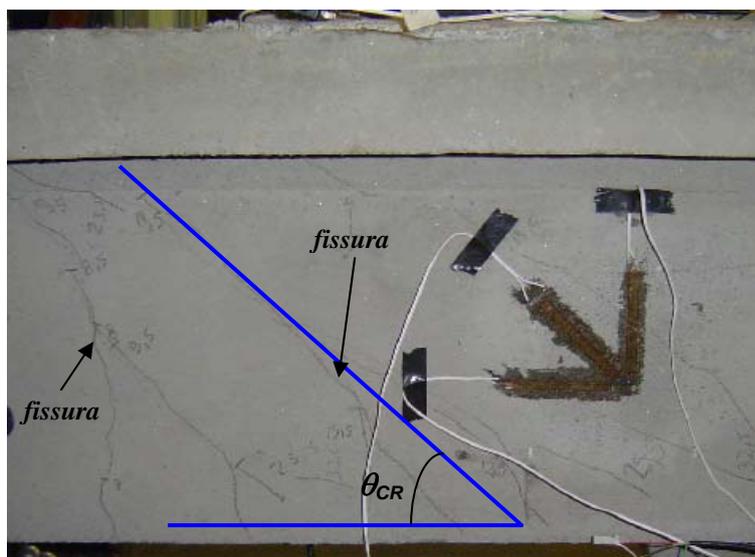


Figura 5.3 – Ângulo médio de fissuração no “trecho de cortante” da viga VR1 medido por meio digital.

O ângulo de inclinação da deformação específica principal de compressão no concreto  $\theta_\varepsilon$  para cada lado da viga foi determinado em função das deformações lidas pelos EER (roseta tripla), e foi calculado por meio das seguintes expressões da resistência dos materiais:

a) Vigas VR1 e VR2

$$\theta_\varepsilon = \frac{1}{2} \arctg \left( \frac{\varepsilon_0 - 2\varepsilon_{45} + \varepsilon_{90}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}} \right) \quad (5.1)$$

b) Vigas VI-1, VI-2, VI-3, VII-1, VII-2 e VII-3

$$\varepsilon_{30} = \varepsilon_x \cos^2 \theta_{30} + \varepsilon_y \sin^2 \theta_{30} + \gamma_{xy} \sin \theta_{30} \cos \theta_{30} \quad (5.2)$$

$$\varepsilon_{45} = \varepsilon_x \cos^2 \theta_{45} + \varepsilon_y \sin^2 \theta_{45} + \gamma_{xy} \sin \theta_{45} \cos \theta_{45} \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_{60} = \varepsilon_x \cos^2 \theta_{60} + \varepsilon_y \sin^2 \theta_{60} + \gamma_{xy} \sin \theta_{60} \cos \theta_{60} \quad (5.4)$$

Resolvendo-se este sistema linear com três equações e três incógnitas, tem-se:

$$\theta_\varepsilon = \frac{1}{2} \arctg \left( \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \right) \quad (5.5)$$

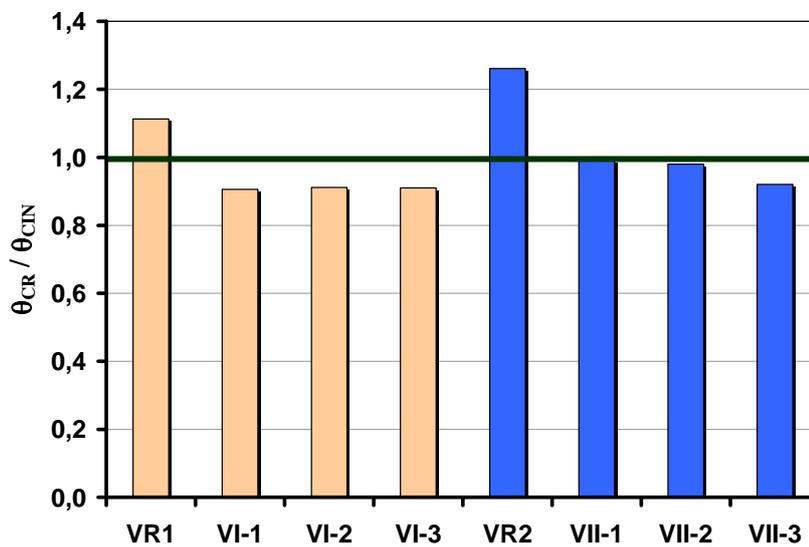
Para uma análise comparativa com o ângulo  $\theta_{CR}$  determinou-se o ângulo teórico da fissura diagonal (fissura deslizante)  $\theta_{CIN}$  por meio do modelo cinemático apresentado no item 3.3.9 (expressão 3.124). A comparação entre  $\theta_{CR}$  e  $\theta_{CIN}$  tem como objetivo avaliar a precisão da hipótese assumida no modelo cinemático, onde a linha de ruptura por força cortante é a fissura diagonal.

A Tabela 5.11 apresenta os valores dos ângulos  $\theta_{CR}$ ,  $\theta_\varepsilon$  e  $\theta_{CIN}$ , e a razão entre  $\theta_{CR}$  e  $\theta_{CIN}$ . O resultado do ângulo  $\theta_\varepsilon$  para a viga VR2 foi desprezado em função dos EER SG6, SG9 e SG11 apresentarem leituras inconsistentes. A Figura 5.4 mostra graficamente a relação entre os ângulos  $\theta_{CR}$  e  $\theta_{CIN}$ .

Tabela 5.11 – Ângulos  $\theta_{CR}$ ,  $\theta_\varepsilon$  e  $\theta_{CIN}$ , e a razão  $\frac{\theta_{CR}}{\theta_{CIN}}$ .

Viga	$\theta_{CR}$ (°)	$\theta_\varepsilon$ (°)	$\theta_{CIN}$ (°)	$\frac{\theta_{CR}}{\theta_{CIN}}$	$\frac{\theta_{CR}}{\theta_{CIN}}^{(1)}$
VR1	40	30,37	35,94	1,11	–
VI-1	39	33,63	43,06	0,91	0,91
VI-2	41	40,04	45,00	0,91	0,91
VI-3	42	41,38	46,16	0,91	0,91
VR2	34	–	26,96	1,26	–
VII-1	38	44,97	38,30	0,99	0,99
VII-2	40	41,93	40,82	0,98	0,98
VII-3	39	43,75	42,36	0,92	0,92
<b>Média</b>	<b>39,13</b>	<b>39,44</b>	<b>39,82</b>	<b>1,05</b>	<b>0,94</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>2,42</b>	<b>5,41</b>	<b>6,18</b>	<b>0,13</b>	<b>0,04</b>
<b>Coef. de var. (%)</b>	<b>6,18</b>	<b>13,71</b>	<b>15,53</b>	<b>12,69</b>	<b>4,15</b>

<sup>(1)</sup> Desprezados os valores das vigas VR1 e VR2 nos cálculos da média, desvio padrão e C.V.

Figura 5.4 – Razão entre os ângulos  $\theta_{CR}$  e  $\theta_{CIN}$ .

Com os valores dos ângulos  $\theta_{CR}$  e  $\theta_\varepsilon$  determinado em cada ensaio, calculou-se o valor experimental da parcela resistida pelo reforço de CFC  $V_{f,exp}$  por meio da expressão 4.13, que é baseada na **Treliça Generalizada**. Tomando-se

como base essa teoria, a parcela referente ao aço (estribos)  $V_{sw,exp}$  é determinada pela expressão 3.4, considerando-se  $f_y = 595,5$  MPa e:

$$z = 0,9d \quad (5.6)$$

A parcela resistida pelo concreto é determinada pela seguinte expressão:

$$V_{c,exp} = V_{u,exp} - V_{f,exp} - V_{sw,exp} \quad (5.7)$$

A Tabela 5.12 e os gráficos das Figuras 5.5, 5.7 e 5.8 mostram os valores das parcelas  $V_{c,exp}$ ,  $V_{sw,exp}$ , e  $V_{f,exp}$  em relação aos ângulos  $\theta_{CR}$  e  $\theta_\epsilon$ .

Tabela 5.12 – Parcelas experimentais da força cortante última (CFC, aço e concreto) considerando-se os ângulos  $\theta_{CR}$  e  $\theta_\epsilon$ .

Viga	$\theta_{CR}$			$\theta_\epsilon$		
	$V_{f,exp}$ (kN)	$V_{sw,exp}$ (kN)	$V_{c,exp}$ (kN)	$V_{f,exp}$ (kN)	$V_{sw,exp}$ (kN)	$V_{c,exp}$ (kN)
<b>VR1</b>	–	88,79	114,82	–	127,14	76,47
<b>VI-1</b>	80,55	92,01	103,84	98,06	112,01	66,32
<b>VI-2</b>	96,33	85,71	111,28	99,66	88,67	105,00
<b>VI-3</b>	133,16	82,75	79,16	136,09	84,57	74,40
<b>VR2</b>	–	55,23	96,02	–	–	–
<b>VII-1</b>	23,47	47,68	145,52	18,36	37,29	161,02
<b>VII-2</b>	114,80	44,40	74,09	107,25	41,48	84,56
<b>VII-3</b>	144,63	46,00	17,52	122,34	38,91	46,89

Para o ângulo  $\theta_{CR}$  a parcela  $V_{f,exp}$  apresentou um aumento de resistência de uma viga para outra dentro da mesma série, conforme mostram os dados da Tabela 5.12 e a Figura 5.5, exceto para a viga VII-1 que em função do baixo valor da deformação específica última do CFC apresentou um valor inferior se comparado às demais. Este fato pode ter ocorrido devido a um descolamento prematuro não somente na região da ancoragem do CFC, mas também ao longo de uma tira (estribo) do mesmo. A Figura 5.6 mostra a região de descolamento do reforço quando da ruptura da viga por tração diagonal.

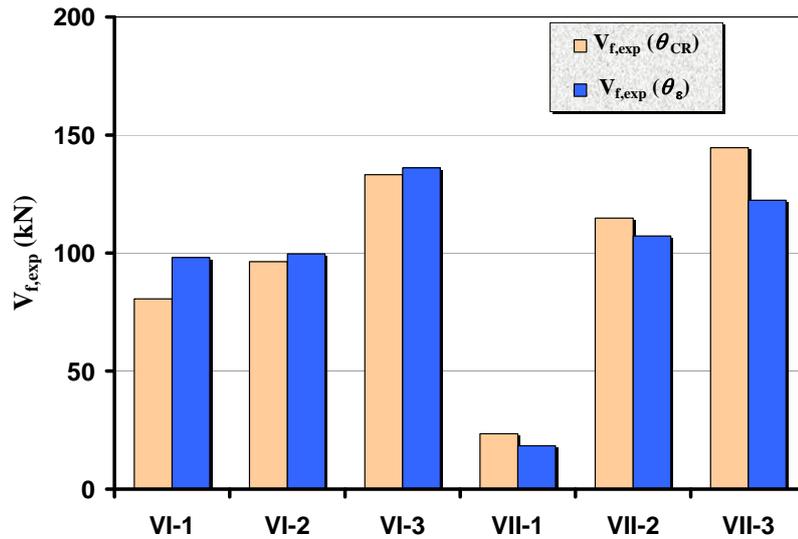


Figura 5.5 – Parcelas da força cortante última resistida pelo CFC considerando-se os ângulos  $\theta_{CR}$  e  $\theta_{\epsilon}$ .

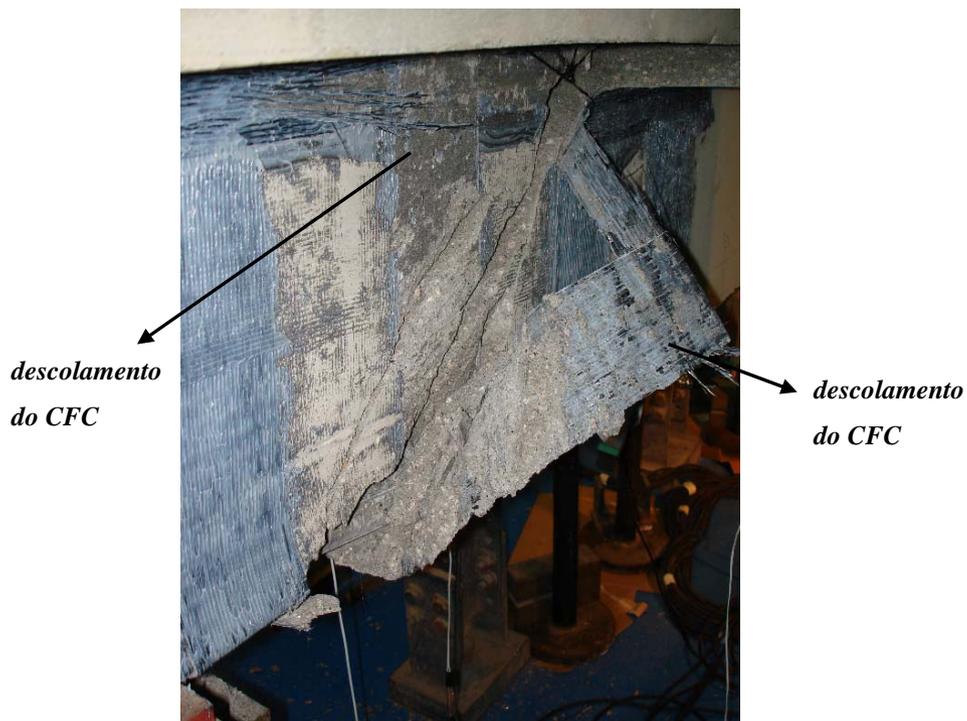


Figura 5.6 – Região de descolamento do CFC da superfície de concreto da viga VII-1.

A Figura 5.7 mostra que parcela resistida pelo aço  $V_{sw,exp}$  apresentou certa constância em seus valores para as vigas dentro da mesma série, sendo os valores da Série I bem superiores aos da Série II para ambos os ângulos  $\theta_{\epsilon}$  e  $\theta_{CR}$ .

Na parcela referente ao concreto  $V_{c,exp}$  constata-se para a Série I considerando-se ambos os ângulos  $\theta_\varepsilon$  e  $\theta_{CR}$ , que o houve um decréscimo dessa parcela em relação à viga de referência. Na Série II a parcela  $V_{c,exp}$  apresenta um decréscimo desse valor para as vigas VII-2 e VII-3 quando comparados à viga VII-1 conforme mostrado na Figura 5.8.

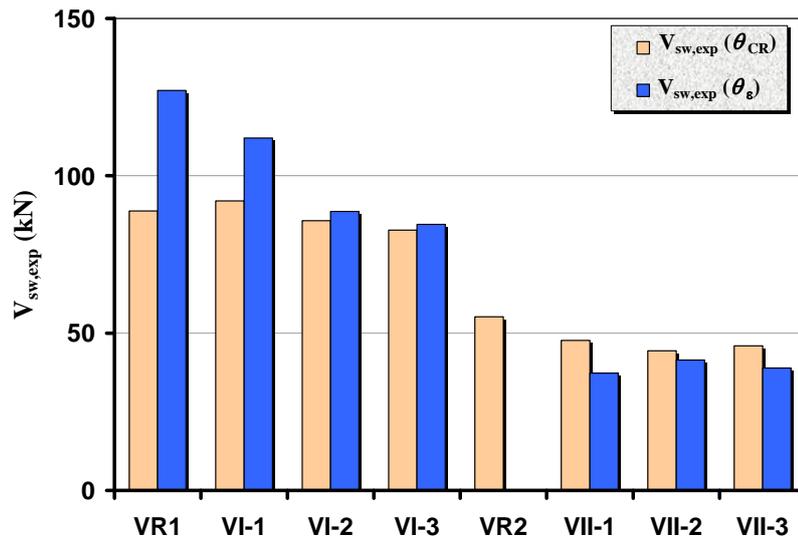


Figura 5.7 – Parcelas da força cortante última resistida pelo aço considerando-se os ângulos  $\theta_{CR}$  e  $\theta_\varepsilon$ .

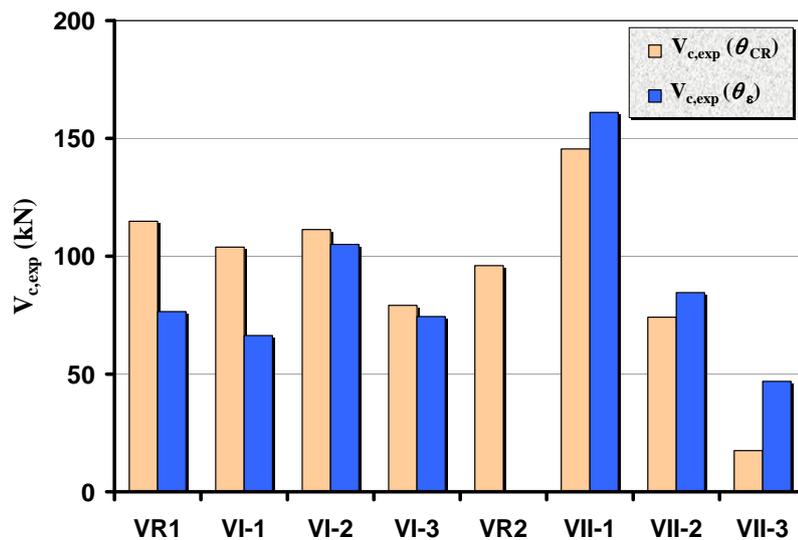


Figura 5.8 – Parcelas da força cortante última resistida pelo concreto considerando-se os ângulos  $\theta_{CR}$  e  $\theta_\varepsilon$ .

Para a determinação dos valores teóricos da força cortante foram adotados os resultados das sistemáticas de cálculo do modelo cinemático, o ACI-318 (1999) e ACI-440 (2001), e o de Colloti *et al.* (2004), no qual se observou pela Tabela 5.13 que o modelo cinemático apresentou um coeficiente de variação, C.V. = 7,31%, sendo este inferior ao modelo do ACI, C.V. = 9,94%, e o de Colloti, C.V. = 13,81%. As rotinas de cálculo desses modelos são descritas no Anexo F.

A Figura 5.9 mostra que os valores do cinemático estão bem próximos dos resultados experimentais, onde a média que relaciona esses resultados foi de 1,09, seguido do modelo do ACI-440 (2001) e o de Colloti *et al.* (2004). Nesta figura observa-se que para as vigas com menor taxa de armadura transversal interna (Série II) os valores do modelo de Colloti *et al.* (2004) são menos conservativos do que os valores calculados para as vigas da Série I.

Tabela 5.13 – Força cortante teórica segundo o modelo cinemático, o modelo do ACI-318 (1999) e ACI-440 (2001), e modelo de Colloti *et al.* (2004).

Viga	$V_{u,exp}$ (kN)	Modelo Cinemático		ACI-318 (1999) ACI-440 (2001)		Colloti <i>et al.</i> (2004)	
		$V_{u,teor}$ (kN)	$\frac{V_{u,exp}}{V_{u,teor}}$	$V_{u,teor}$ (kN)	$\frac{V_{u,exp}}{V_{u,teor}}$	$V_{u,teor}$ (kN)	$\frac{V_{u,exp}}{V_{u,teor}}$
VR1	203,61	207,64	0,98	189,96	1,07	–	–
VI-1	276,40	250,07	1,11	223,87	1,23	215,62	1,28
VI-2	293,33	259,83	1,13	254,20	1,15	225,49	1,30
VI-3	295,07	266,85	1,11	274,70	1,07	225,62	1,31
VR2	151,25	141,98	1,07	150,19	1,01	–	–
VII-1	216,67	201,00	1,08	181,63	1,19	207,41	1,04
VII-2	233,29	215,43	1,08	212,81	1,10	220,58	1,06
VII-3	208,15	224,49	0,93	233,31	0,89	220,75	0,94
<b>Média</b>		<b>1,06</b>	–	<b>1,09</b>	–	<b>1,16</b>	–
<b>Desvio padrão</b>		<b>0,07</b>	–	<b>0,11</b>	–	<b>0,16</b>	–
<b>Coef. de var. (%)</b>		<b>6,55</b>	–	<b>9,94</b>	–	<b>13,81</b>	–

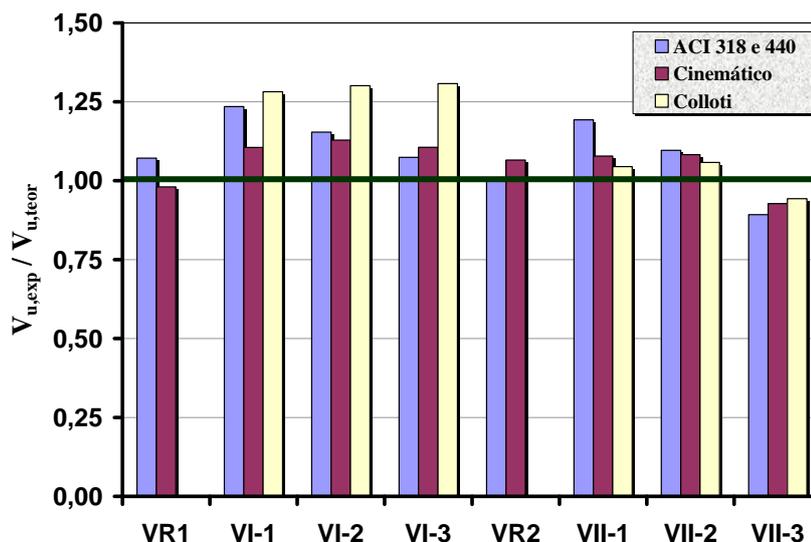


Figura 5.9 – Razão entre os valores da força cortante última *versus* os valores da força cortante teórica segundo o ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001), o modelo cinemático e o modelo de Colloti *et al.* (2004).

Os valores teóricos segundo o ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001) para as parcelas da força cortante resistidas pelo concreto, aço e CFC, e as suas respectivas razões com os valores experimentais, para os ângulos  $\theta_{CR}$  e  $\theta_{\varepsilon}$ , são mostrados nas Tabelas 5.14 e 5.15, e nas Figuras 5.10 e 5.11. Conforme descrito nos itens 3.4 e 3.7, as parcelas de  $V_{sw,theor}$  e  $V_{f,theor}$  desse modelo foram calculadas considerando-se o ângulo  $\theta$  igual à  $45^\circ$ .

Constata-se, para ambos os ângulos  $\theta_{CR}$  e  $\theta_{\varepsilon}$ , que as razões entre os valores últimos e teóricos da parcela da força cortante referente ao aço  $V_{sw}$  apresentam coeficientes de variação (C.V.) de regulares a bom, ou seja, abaixo de 25%, o que mostra a boa consistência da sistemática do ACI para a determinação dessa parcela.

Também segundo o ACI para as razões entre as parcelas das forças últimas e teóricas relativas ao concreto  $V_c$  e ao CFC  $V_f$ , os valores mostrados nas Tabelas 5.14 e 5.15 são bastante dispersos, com coeficientes de variação acima de 30%.

Tabela 5.14 – Parcelas teóricas da força cortante última segundo o ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001) considerando-se o ângulo  $\theta_{CR}$ .

Viga	$V_{c,teór}$ (kN)	$V_{sw,teór}$ (kN)	$V_{f,teór}$ (kN)	$\frac{V_{c,exp}}{V_{c,teór}}$	$\frac{V_{sw,exp}}{V_{sw,teór}}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teór}}$
VR1	107,18	82,78	–	1,07	1,07	–
VI-1	110,76	82,78	30,33	0,94	1,11	2,66
VI-2	110,76	82,78	60,66	1,00	1,04	1,59
VI-3	111,36	82,78	80,55	0,71	1,00	1,65
VR2	108,80	41,39	–	0,88	1,33	–
VII-1	109,91	41,39	30,33	1,32	1,15	0,77
VII-2	110,76	41,39	60,66	0,67	1,07	1,89
VII-3	111,36	41,39	80,55	0,16	1,11	1,80
<b>Média</b>				<b>0,84</b>	<b>1,11</b>	<b>1,73</b>
<b>Desvio padrão</b>				<b>0,35</b>	<b>0,10</b>	<b>0,60</b>
<b>Coef. de var. (%)</b>				<b>40,97</b>	<b>9,17</b>	<b>35,02</b>

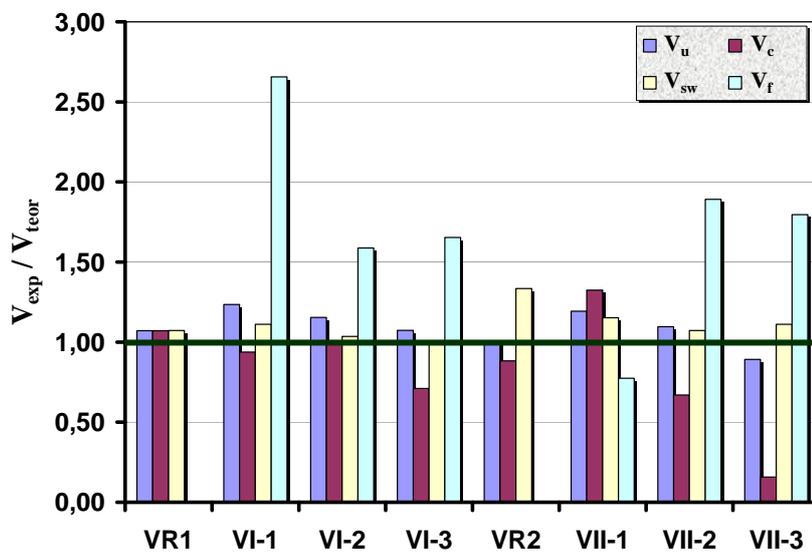
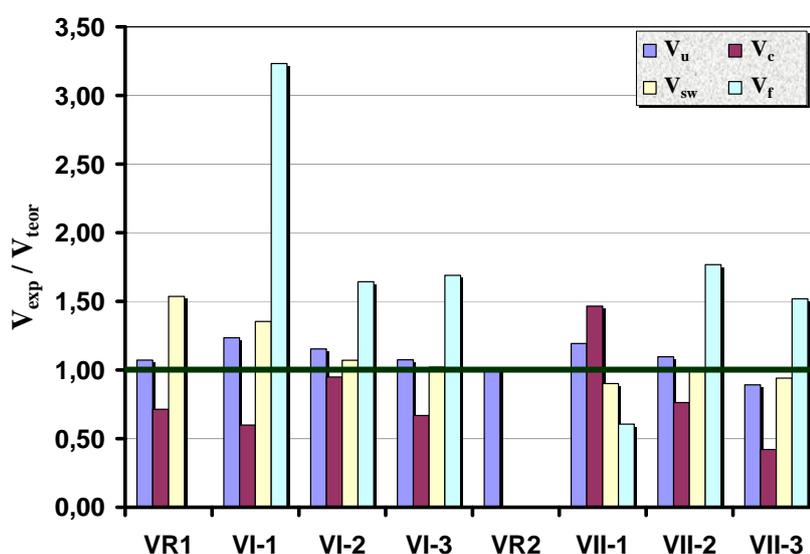
Figura 5.10 – Razão entre os valores da força cortante última versus os valores da força cortante teórica segundo o ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001) considerando-se o ângulo  $\theta_{CR}$ .

Tabela 5.15 – Parcelas teóricas da força cortante última segundo o ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001) considerando-se o ângulo  $\theta_c$ .

Viga	$V_{c,teor}$ (kN)	$V_{sw,teor}$ (kN)	$V_{f,teor}$ (kN)	$\frac{V_{c,exp}}{V_{c,teor}}$	$\frac{V_{sw,exp}}{V_{sw,teor}}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$
VR1	107,18	82,78	–	0,71	1,54	–
VI-1	110,76	82,78	35,42	0,60	1,35	3,23
VI-2	110,76	82,78	70,84	0,95	1,07	1,64
VI-3	111,36	82,78	106,26	0,67	1,02	1,69
VR2	108,80	41,39	–	–	–	–
VII-1	109,91	41,39	35,42	1,47	0,90	0,61
VII-2	110,76	41,39	70,84	0,76	1,00	1,77
VII-3	111,36	41,39	106,26	0,42	0,94	1,52
<b>Média</b>				<b>0,80</b>	<b>1,12</b>	<b>1,74</b>
<b>Desvio padrão</b>				<b>0,34</b>	<b>0,24</b>	<b>0,85</b>
<b>Coef. de var. (%)</b>				<b>42,07</b>	<b>21,09</b>	<b>48,54</b>

Figura 5.11 – Razão entre os valores da força cortante última versus os valores da força cortante teórica segundo o ACI-318 (1999) e o ACI-440 (2001) considerando-se o ângulo  $\theta_c$ .

Além da sistemática do ACI-440 (2001), a parcela da força cortante teórica resistida pelo CFC foi analisada segundo os modelos da FIB-Bulletin 14 (2001), Khalifa e Nanni (2002) e Chen e Teng (2002), e os resultados dessas análises em

relação à parcela experimental  $V_{f,exp}$  considerando-se os ângulos medidos nos ensaios  $\theta_{CR}$  e  $\theta_\varepsilon$  são mostrados nas Tabelas 5.16 e 5.17. Nessas tabelas o valor de  $V_{f,teor}$  das sistemáticas da FIB–Bulletin 14 (2001) e de Chen e Teng (2002) foi determinado utilizando-se os ângulos  $\theta_{CR}$  e  $\theta_\varepsilon$ , enquanto para o modelo de Khalifa e Nanni (2002) o ângulo é de 45°. As rotinas de cálculo desses modelos são descritas no Anexo F.

Para uma melhor análise comparativa os gráficos das Figuras 5.12 e 5.13 são acrescidos dos resultados do modelo do ACI-440 (2001) apresentados nas Tabelas 5.14 e 5.15.

Constatam-se para a maioria dos modelos que os valores da parcela teórica resistida pelo CFC  $V_{f,teor}$  são maiores que os resultados experimentais, onde também ocorre uma grande dispersão na relação  $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$  considerando-se os ângulos  $\theta_{CR}$  e  $\theta_\varepsilon$ , sendo que o coeficiente de variação mínimo encontrado foi de 34,70% para o modelo da FIB-Bulletin 14 (2001).

Os dados das Tabelas 5.16 e 5.17 mostram que os resultados fornecidos pelos modelos da FIB–Bulletin 14 (2001) e de Chen e Teng (2002) usando-se os ângulos  $\theta_{CR}$  e  $\theta_\varepsilon$  fornecem, para uma mesma viga, a razões entre o valor teórico e experimental sempre iguais. Isto ocorre, pois as fórmulas para o cálculo de  $V_{f,exp}$  e  $V_{f,teor}$  são baseadas no modelo da Treliça Generalizada, e o ângulo  $\theta$  não é fixo. Nas sistemáticas do ACI-440 (2001) e Khalifa e Nanni (2002), onde o ângulo  $\theta$  é igual à 45° para o cálculo de  $V_{f,teor}$ , as razões  $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$  são diferentes para uma mesma viga.

Para ambos os ângulos considerados os gráficos das Figuras 5.12 e 5.13 mostram que todos os modelos apresentaram resultados conservativos, exceto para a viga VII-1, que devido ao baixo valor de sua deformação específica registrada no ensaio, apresentou a relação  $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$  menor que a unidade.

Tabela 5.16 – Valores teóricos da parcela resistida pelo CFC segundo diversos modelos considerando-se o ângulo  $\theta_{CR}$ .

Viga	$V_{f,teor}$	$V_{f,teor}$	$V_{f,teor}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$
	(kN) FIB	(kN) Khalifa	(kN) Teng	FIB	Khalifa	Teng
VI-1	62,98	45,49	49,41	1,28	1,77	1,63
VI-2	80,44	71,30	62,10	1,20	1,35	1,55
VI-3	93,20	72,61	70,93	1,43	1,83	1,88
VII-1	65,08	45,49	51,00	0,36	0,52	0,46
VII-2	83,33	71,30	64,33	1,38	1,61	1,78
VII-3	103,63	72,61	78,87	1,40	1,99	1,83
<b>Média</b>				<b>1,17</b>	<b>1,51</b>	<b>1,52</b>
<b>Desvio padrão</b>				<b>0,41</b>	<b>0,53</b>	<b>0,54</b>
<b>Coef. de var. (%)</b>				<b>34,70</b>	<b>35,35</b>	<b>35,14</b>

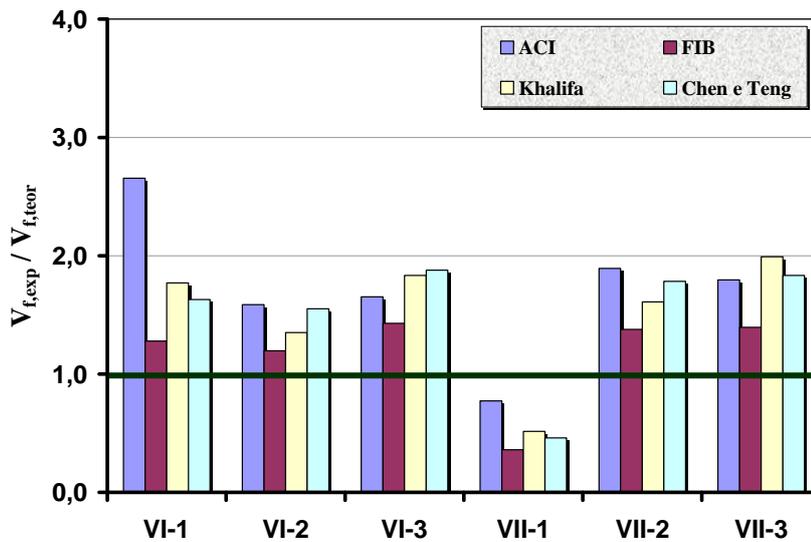


Figura 5.12 – Razão entre a parcela experimental resistida pelo CFC versus o seu valor teórico segundo diversos modelos considerando-se o ângulo  $\theta_{CR}$ .

Tabela 5.17 – Valores teóricos da parcela resistida pelo CFC segundo diversos modelos considerando-se o ângulo  $\theta_c$ .

Viga	$V_{f,teor}$	$V_{f,teor}$	$V_{f,teor}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$	$\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$
	(kN) FIB	(kN) Khalifa	(kN) Teng	FIB	Khalifa	Teng
VI-1	76,68	45,49	60,16	1,28	2,16	1,63
VI-2	83,21	71,30	64,24	1,20	1,40	1,55
VI-3	95,26	72,61	72,50	1,43	1,87	1,88
VII-1	50,90	45,49	39,89	0,36	0,40	0,46
VII-2	77,85	71,30	60,10	1,38	1,50	1,78
VII-3	87,67	72,61	66,72	1,40	1,69	1,83
<b>Média</b>				<b>1,17</b>	<b>1,50</b>	<b>1,52</b>
<b>Desvio padrão</b>				<b>0,41</b>	<b>0,60</b>	<b>0,54</b>
<b>Coef. de var. (%)</b>				<b>34,70</b>	<b>40,10</b>	<b>35,14</b>

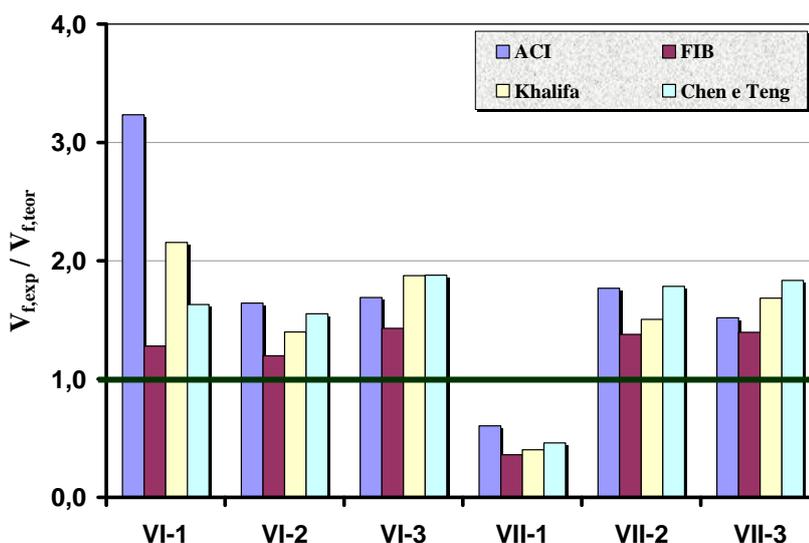


Figura 5.13 – Razão entre a parcela experimental resistida pelo CFC versus o seu valor teórico segundo diversos modelos considerando-se o ângulo  $\theta_c$ .

Excluindo-se a viga VII-1 das análises da parcela resistida pelo CFC tem-se que as médias, os desvios padrões e os coeficientes de variação da razão  $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$  apresentam resultados menos dispersos para as demais vigas, conforme mostram os dados da Tabela 5.18. Observa-se nessa tabela que para o ângulo  $\theta_{CR}$  a

sistemática da FIB apresenta uma menor dispersão (C.V = 7,13%), e a do ACI uma maior variação em seus resultados (C.V = 22,42%). Para o ângulo  $\theta_\epsilon$  ambos os modelos, da FIB e do ACI, apresentam o menor e o maior coeficientes de variação, respectivamente.

Tabela 5.18 – Razão  $\frac{V_{f,exp}}{V_{f,teor}}$  segundo os diversos modelos teóricos considerando-se os

ângulos  $\theta_{CR}$  e  $\theta_\epsilon$ .

Viga	$\theta_{CR}$				$\theta_\epsilon$			
	ACI	FIB	Khalifa	Teng	ACI	FIB	Khalifa	Teng
VI-1	2,66	1,28	1,77	1,63	3,23	1,28	2,16	1,63
VI-2	1,59	1,20	1,35	1,55	1,64	1,20	1,40	1,55
VI-3	1,65	1,43	1,83	1,88	1,69	1,43	1,87	1,88
VII-1 <sup>(1)</sup>	–	–	–	–	–	–	–	–
VII-2	1,89	1,38	1,61	1,78	1,77	1,38	1,50	1,78
VII-3	1,80	1,40	1,99	1,83	1,52	1,40	1,69	1,83
<b>Média</b>	<b>1,92</b>	<b>1,34</b>	<b>1,71</b>	<b>1,74</b>	<b>1,97</b>	<b>1,34</b>	<b>1,72</b>	<b>1,74</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>0,43</b>	<b>0,10</b>	<b>0,24</b>	<b>0,14</b>	<b>0,71</b>	<b>0,10</b>	<b>0,30</b>	<b>0,14</b>
<b>C.V. (%)</b>	<b>22,42</b>	<b>7,13</b>	<b>14,23</b>	<b>8,00</b>	<b>36,11</b>	<b>7,13</b>	<b>17,53</b>	<b>8,00</b>

<sup>(1)</sup> Viga desprezada nos cálculos da média, desvio padrão e C.V.

### 5.3.2.

#### Parâmetros que Influenciam na Resistência do CFC

Conforme citado por Pellegrino e Modena (2002) e estudado por Bousseham e Challal (2004) várias são as influências de alguns parâmetros na resistência à força cortante de vigas de concreto armado reforçadas com CFC. Na Tabela 5.19 são mostrados alguns valores desses parâmetros que se basearam nos resultados apresentados no item 5.3.1. Nas Figuras 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19 são mostrados os gráficos que relacionam esses parâmetros.

Para uma melhor análise dessas curvas são explicitadas as suas equações (reta de regressão) e o coeficiente de determinação  $R^2$ . O coeficiente de determinação pode ser definido como o grau de ajuste da reta estimada ao

conjunto de dados, podendo variar de 0 a 1. Sendo a dispersão em torno da reta de regressão pequena em relação à variação total dos valores de  $y$  em torno de sua média, significa que a variação explicada responde por uma grande percentagem da variação total, e  $R^2$  estará muito próximo de 1. Inversamente, quando a dispersão em torno da reta é grande, r-quadrado será pequeno, ou seja, estará próximo de 0.

Nos cálculos considerou-se:  $E_{sw} = 198,51 \text{ GPa}$ ,  $E_f = 255,18 \text{ GPa}$  e  $\varepsilon_{f,u} = 11,636\%$ .

Tabela 5.19 – Parâmetros que influenciam a deformação específica última do reforço em CFC.

Viga	$\frac{\varepsilon_{f,exp}}{\varepsilon_{f,u}}$	$E_f \rho_f$	$\frac{E_{sw} \rho_{sw}}{E_f \rho_f}$	$\frac{E_f \rho_f}{f_c^{2/3}}$	$E_{sw} \rho_{sw} + E_f \rho_f$	$\frac{E_{sw} \rho_{sw} + E_f \rho_f}{f_c^{2/3}}$
VI-1	0,64	0,18	2,82	0,013	0,704	0,051
VI-2	0,41	0,37	1,41	0,027	0,889	0,064
VI-3	0,39	0,55	0,94	0,040	1,073	0,077
VII-1	0,18	0,18	1,41	0,013	0,444	0,032
VII-2	0,37	0,37	0,70	0,027	0,629	0,045
VII-3	0,55	0,55	0,47	0,040	0,813	0,058

Observa-se na Tabela 5.19 que a razão  $\frac{\varepsilon_{f,exp}}{\varepsilon_{f,u}}$ , denominada de coeficiente de efetividade do reforço  $\nu_f$ , que correlaciona a deformação específica última e deformação específica registrada no ensaio à tração do CFC, apresentou um valor inconsistente para a viga VII-1 em relação às demais vigas, sendo o mesmo desprezado nas análises seguintes. A média dos valores de  $\nu_f$ , exceto para a viga VII-1, foi de 0,46.

Na Figura 5.14 o gráfico  $\nu_f \times E_f \rho_f$  mostra que para  $E_f \rho_f$  variando entre 0,18 e 0,55 a relação  $\frac{\varepsilon_{f,exp}}{\varepsilon_{f,u}}$  varia de 0,64 a 0,38, ou seja, 68,4%, verificando-se que com aumento da rigidez  $E_f \rho_f$  há um decréscimo da deformação específica última do CFC  $\varepsilon_{f,exp}$ .

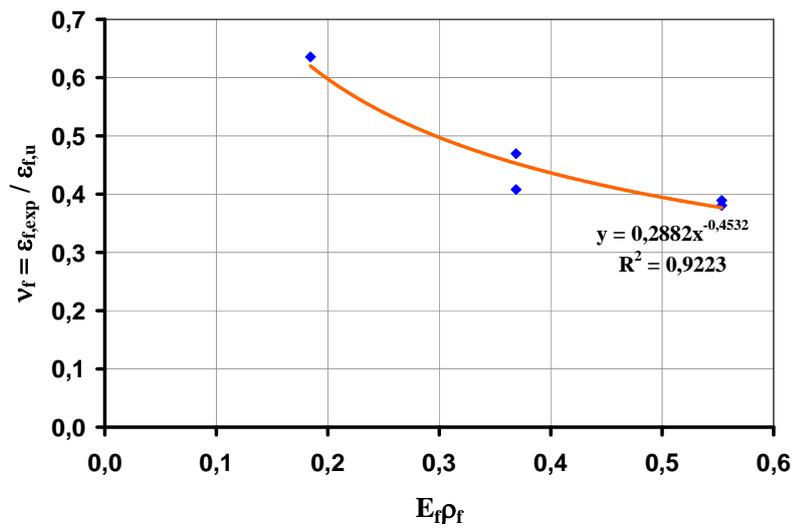


Figura 5.14 – Gráfico  $v_f \times E_f \rho_f$ .

O comportamento do gráfico  $v_f \times \frac{E_{sw} \rho_{sw}}{E_f \rho_f}$  (Figura 5.15) mostra que para  $\frac{E_{sw} \rho_{sw}}{E_f \rho_f}$  variando entre 0,47 e 2,82 tem-se  $v_f$  variando de 0,38 a 0,64, ou seja, 68,4%. Verifica-se que para o acréscimo da razão  $\frac{E_{sw} \rho_{sw}}{E_f \rho_f}$ , a deformação específica última  $\epsilon_{f,exp}$  aumenta.

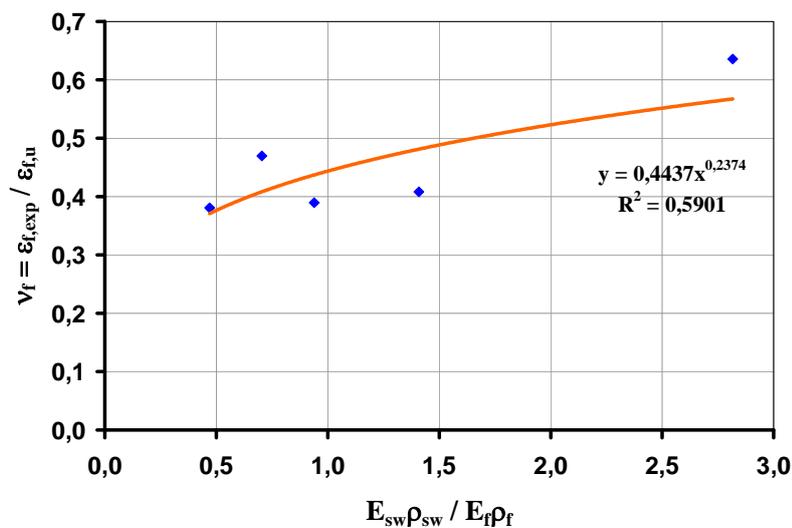


Figura 5.15 – Gráfico  $\nu_f \times \frac{E_{sw}\rho_{sw}}{E_f\rho_f}$ .

Na Figura 5.16 tem-se o parâmetro  $\frac{E_f\rho_f}{f_c^{2/3}}$  variando entre 0,013 e 0,040, e  $\nu_f$  variando de 0,64 a 0,38, ou seja, 68,4%. Constata-se um decréscimo na deformação específica última  $\varepsilon_{f,exp}$  com o aumento dessa razão.

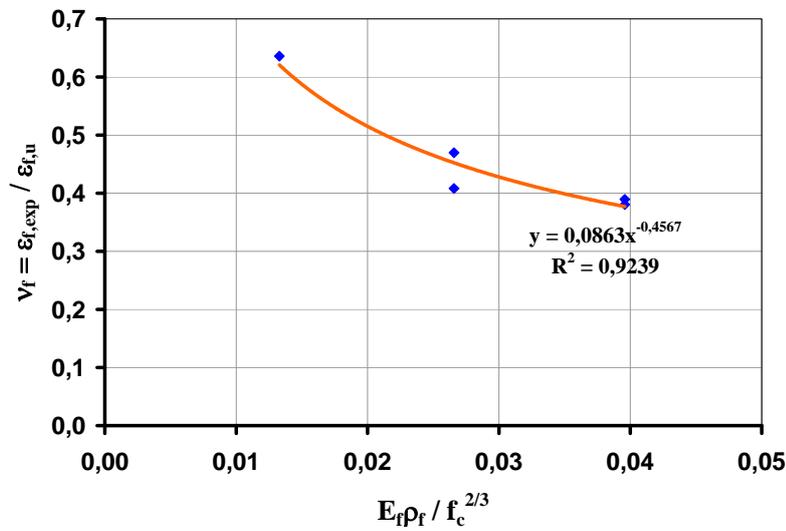


Figura 5.16 – Gráfico  $\nu_f \times \frac{E_f\rho_f}{f_c^{2/3}}$ .

O análise do gráfico  $\nu_f \times (E_{sw}\rho_{sw} + E_f\rho_f)$  mostra que para o parâmetro  $E_{sw}\rho_{sw} + E_f\rho_f$  variando entre 0,629 e 1,043 tem-se  $\nu_f$  variando de 0,64 a 0,38, ou seja, 68,4%, o que representa um decréscimo da deformação específica última  $\varepsilon_{f,exp}$  em relação a esse parâmetro.

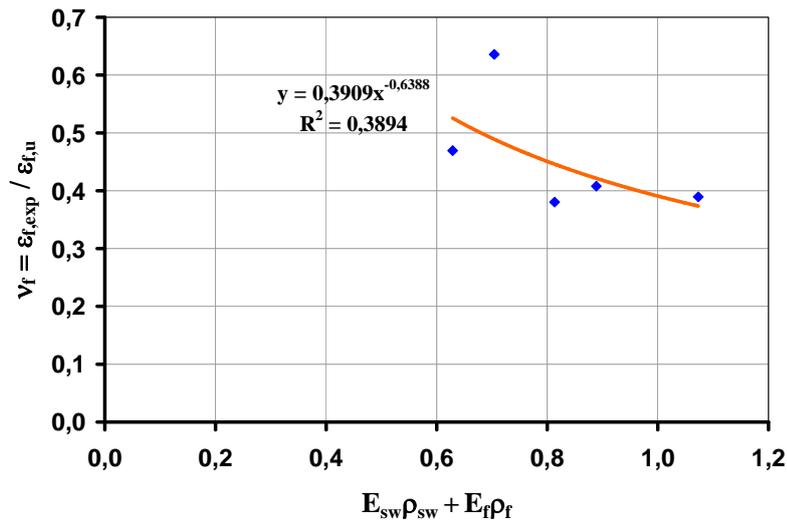


Figura 5.17 – Gráfico  $\nu_f \times (E_{sw}\rho_{sw} + E_f\rho_f)$ .

Da mesma forma o comportamento do gráfico  $\nu_f \times \frac{E_{sw}\rho_{sw} + E_f\rho_f}{f_c^{2/3}}$  mostra que para  $\frac{E_{sw}\rho_{sw} + E_f\rho_f}{f_c^{2/3}}$  variando entre 0,045 e 0,077 tem-se  $\nu_f$  variando de 0,64 a 0,38, ou seja, 68,4%, onde verifica-se que para o aumento do parâmetro  $\frac{E_{sw}\rho_{sw} + E_f\rho_f}{f_c^{2/3}}$  a deformação específica última  $\epsilon_{f,exp}$  diminui.

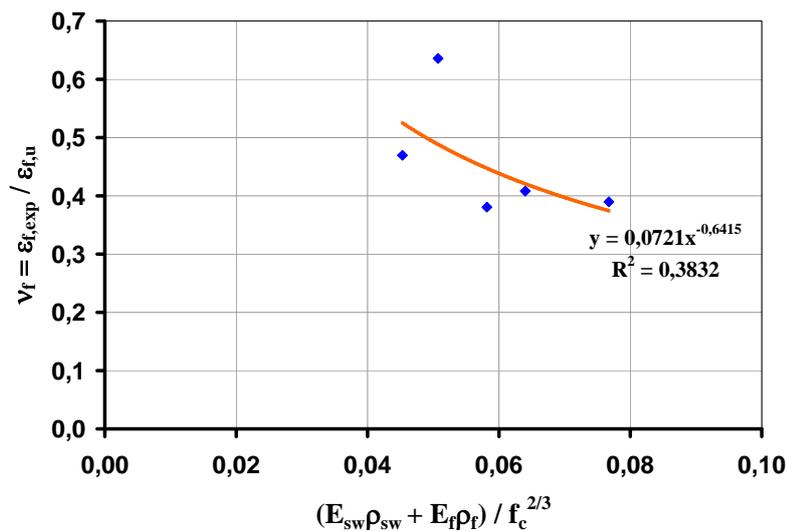


Figura 5.18 – Gráfico  $\nu_f \times \frac{E_{sw}\rho_{sw} + E_f\rho_f}{f_c^{2/3}}$ .

Para os diferentes ângulos de inclinação da biela observa-se na Figura 5.19 uma maior dispersão dos ângulos  $\theta_\varepsilon$  ( $\Delta=13,68^\circ$ ), seguido do ângulo  $\theta_{CIN}$  ( $\Delta=5,98^\circ$ ) e por último  $\theta_{CR}$  ( $\Delta=3,0^\circ$ ), para uma variação de 0,26 para o fator de efetividade do reforço em CFC  $\nu_f$ .

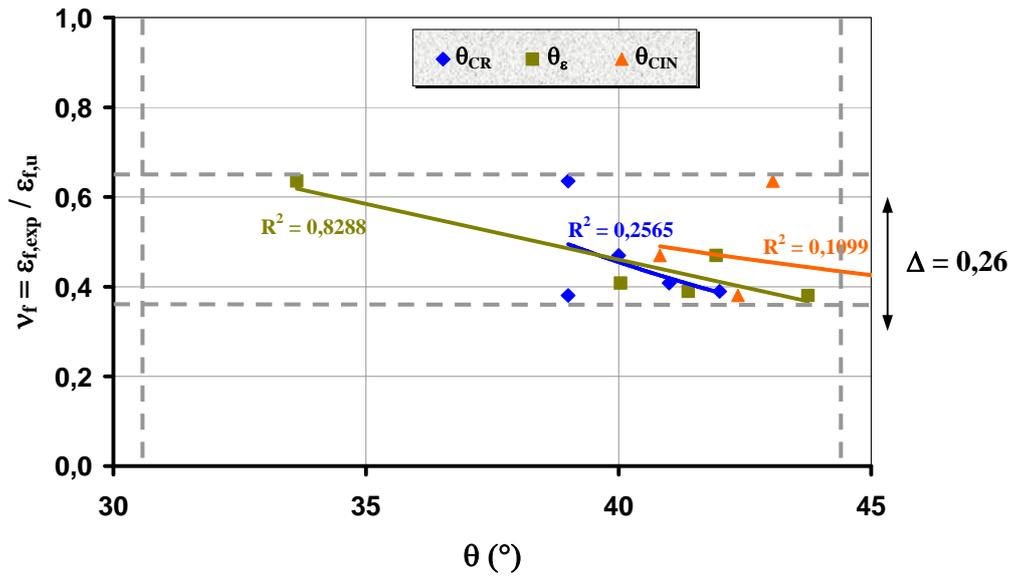


Figura 5.19 – Gráfico  $\nu_f \times \theta$ .