

8 Apresentação e Análise dos Resultados

8.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos no programa experimental realizado de acordo com as descrições do capítulo 7, no qual foram apresentados os ensaios de sete vigas de concreto armado submetidas à solicitação de torção pura, sendo uma viga de referência e seis vigas reforçadas com CFC.

8.2. Comportamento da Curva $T \times \theta$

As vigas de concreto armado solicitadas à torção têm o comportamento da curva de momento torçor *versus* ângulo de rotação por unidade de comprimento $T \times \theta$ caracterizado por três trechos: 1) o trecho elástico-linear quando do início do carregamento, limitado pelo momento torçor de fissuração T_{cr} ; 2) o trecho entre T_{cr} e o momento torçor de escoamento T_y ; 3) e o trecho entre T_y e o momento torçor de ruptura T_u . Para cada um desses momentos torçores tem-se o seu respectivo ângulo de torção por unidade de comprimento θ . Sendo θ_{cr} o ângulo correspondente a T_{cr} , θ_y o ângulo relativo a T_y , e θ_u o ângulo referente a T_u .

No capítulo 7 foi mostrada a localização dos Transdutores Lineares nas vigas, os quais foram posicionados sobre réguas, e que forneceram os deslocamentos da viga a partir de uma distância de 30 cm da lateral da mesma (40 cm do eixo vertical).

As réguas foram posicionadas na altura da superfície inferior da viga, não coincidindo com seu eixo horizontal. Portanto, a rotação não pode ser calculada de maneira direta admitindo-se $tg\phi = \Delta l / 40$, pois no ponto A onde a régua foi posicionada ocorre uma translação para o ponto A' (Figura 8.1).

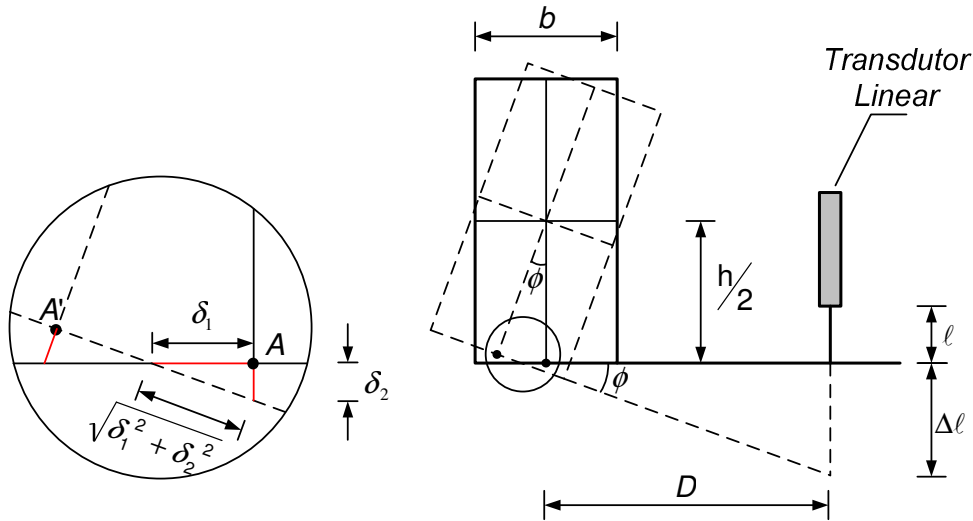


Figura 8.1 – Ângulo de rotação por unidade de comprimento.

Com os parâmetros da Figura 8.1 seguem-se por semelhança de triângulos:

$$\frac{\delta_2}{\delta_1} = \frac{\Delta l}{D + \delta_1} \quad (8.1)$$

$$\frac{h/2}{\delta_1 + \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}} = \frac{D + \delta_1}{\Delta l} \quad (8.2)$$

Isolando-se o deslocamento δ_2 na expressão 8.1, e substituindo-o na expressão 8.2 seguem-se:

$$\delta_2 = \frac{\Delta l \delta_1}{D + \delta_1} \quad (8.3)$$

$$\frac{h/2}{\delta_1 + \sqrt{\delta_1^2 + \left(\frac{\Delta l \delta_1}{D + \delta_1}\right)^2}} = \frac{D + \delta_1}{\Delta l} \quad (8.4)$$

Então δ_1 pode ser escrito como:

$$\delta_1 = \frac{1}{2(4\Delta l + 4h)} \left[-4D + 4(D^2 + \Delta l^2 + h\Delta l)^{1/2} \right] h \quad (8.5)$$

Calculando-se δ_2 a partir da expressão 8.1, pode-se determinar o ângulo de rotação correspondente ao deslocamento Δl :

$$\text{tg}\phi = \frac{\delta_2}{\delta_1} \quad (8.6)$$

$$\phi = \arctg\left(\frac{\delta_2}{\delta_1}\right) \quad (8.7)$$

O ângulo de torção por unidade de comprimento é dado pela expressão 8.8:

$$\theta = \frac{\phi_{L1} - \phi_{L5}}{L} \quad (8.8)$$

onde

ϕ_{L1} e ϕ_{L5} – ângulos de torção medidos nas posições L1 e L5, respectivamente (Figura 7.27);

L – distância entre os transdutores lineares L1 e L5.

Nas sete vigas ensaiadas os comportamentos das curvas $T \times \theta$ foram bastante similares, mantendo-se linear até atingir o momento torçor de fissuração T_{cr} . Observando-se que após a fissuração houve uma redução na inclinação da curva $T \times \theta$, que se manteve praticamente linear até atingir o momento torçor de escoamento T_y . Entre o momento torçor de escoamento e o momento torçor de ruptura a curva $T \times \theta$ também apresentou comportamento linear, entretanto, a inclinação da curva praticamente não se alterou.

A viga de referência apresentou fissuras para $T_{cr} = 16,4$ kNm, com $\theta_{cr} = 0,142$ %/m. Após a fissuração ocorreu uma grande redução na inclinação da curva $T \times \theta$ até se atingir $T_y = 20,7$ kNm, e $T_u = 22,4$ kNm, correspondentes a $\theta_y = 1,647$ %/m e $\theta_u = 2,293$ %/m, respectivamente (Figura 8.2).

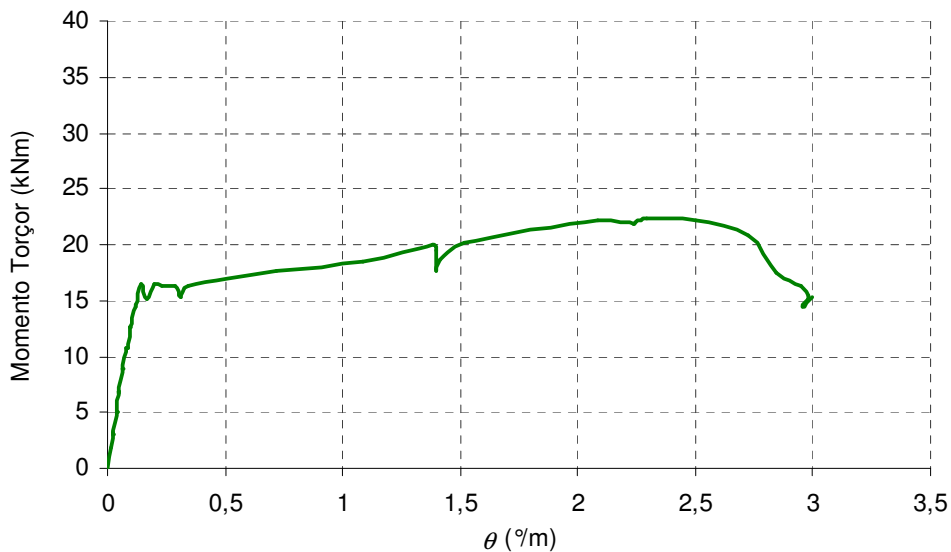
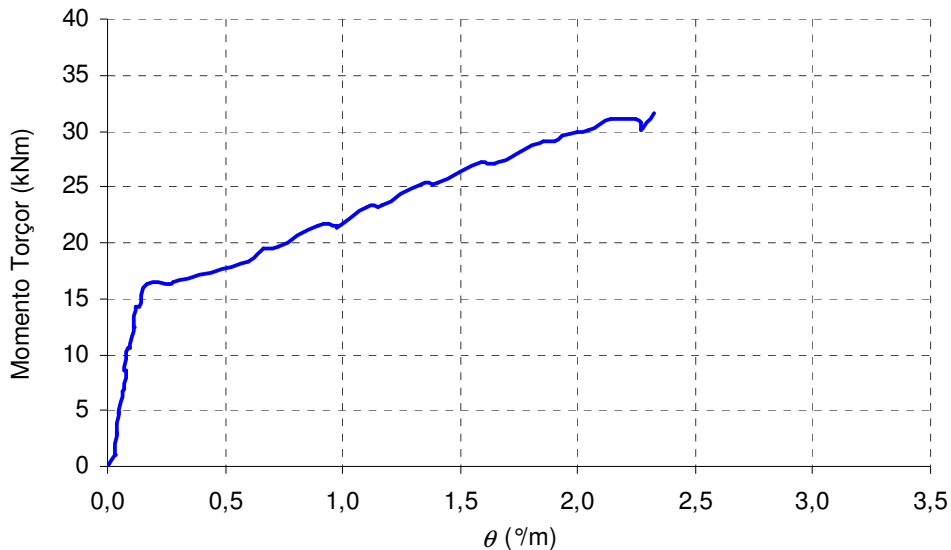


Figura 8.2 – Gráfico $T \times \theta$ da viga de referência.

Para a viga VT1 obteve-se $T_{cr} = 16,4$ kNm e $\theta_{cr} = 0,167$ %/m. Após a fissuração também ocorreu uma redução na inclinação da curva $T \times \theta$ até se atingir os momentos torçores T_y e T_u , entretanto, essa redução não foi tão acentuada como na viga de referência. Sendo $T_y = 27,9$ kNm e $T_u = 31,6$ kNm relativos a $\theta_y = 1,728$ %/m e $\theta_u = 2,326$ %/m, respectivamente (Figura 8.3).

Figura 8.3 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VT1 .

As vigas VT2 e VT3 apresentaram comportamentos semelhantes ao da viga VT1.

Para a viga VT2 foram obtidos $T_{cr} = 14,9$ kNm, $T_y = 22,7$ kNm e $T_u = 29,9$ kNm, e os respectivos ângulos de torção por unidade de comprimento foram $\theta_{cr} = 0,219$ %/m, $\theta_y = 1,507$ %/m e $\theta_u = 2,494$ %/m (Figura 8.4).

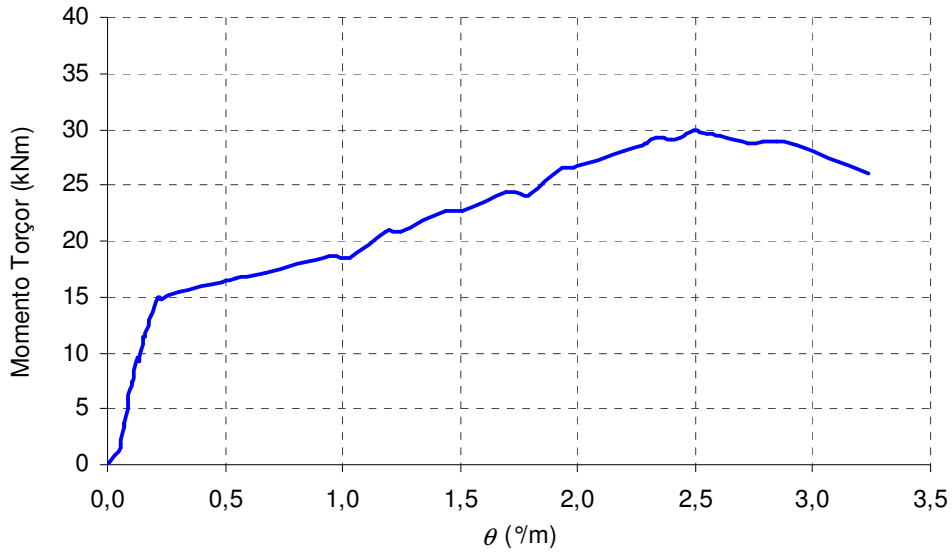


Figura 8.4 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VT2.

Os valores experimentais obtidos para a viga VT3 foram $T_{cr} = 16,8$ kNm, $T_y = 24,4$ kNm e o $T_u = 35,0$ kNm, e os respectivos ângulos de torção por unidade de comprimento foram $\theta_{cr} = 0,197$ %/m, $\theta_y = 1,496$ %/m e $\theta_u = 3,223$ %/m (Figura 8.5).

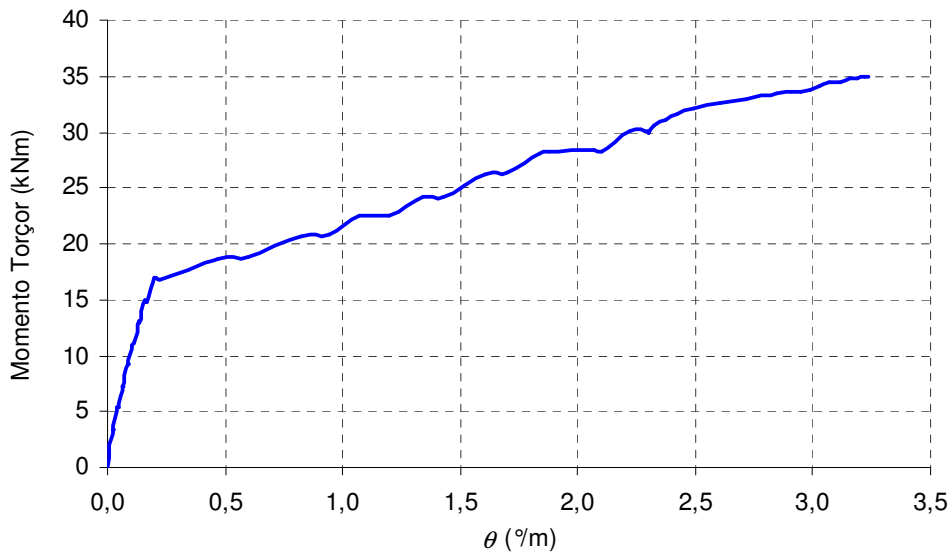


Figura 8.5 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VT3.

Os diagramas $T \times \theta$ das vigas da série VTL foram muito semelhantes aos das vigas da série VT, sendo a redução na inclinação da curva após a fissuração menos acentuada do que a da viga de referência.

Para a viga VTL1 os resultados foram $T_{cr} = 14,9$ kNm para um $\theta_{cr} = 0,204$ %/m, e após a fissuração a sua rigidez diminuiu, sendo $T_y = 24,4$ kNm para $\theta_y = 1,710$ %/m. O momento torçor último $T_u = 28$ kNm teve um ângulo de torção por unidade de comprimento $\theta_u = 2,392$ %/m (Figura 8.6).

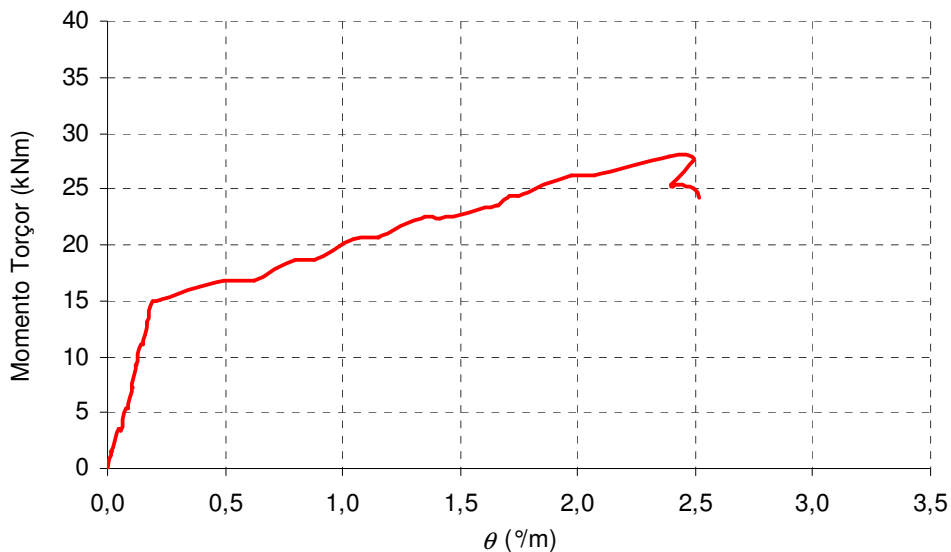


Figura 8.6 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VTL1.

As vigas VTL2 e VTL3 apresentaram comportamentos semelhantes ao da viga VTL1.

Para a viga VTL2 foram obtidos os seguintes momentos torçores $T_{cr} = 16,3$ kNm, $T_y = 24,1$ kNm e $T_u = 32,9$ kNm, e os respectivos ângulos de torção por unidade de comprimento foram $\theta_{cr} = 0,223$ %/m, $\theta_y = 1,426$ %/m e $\theta_u = 3,352$ %/m (Figura 8.7).

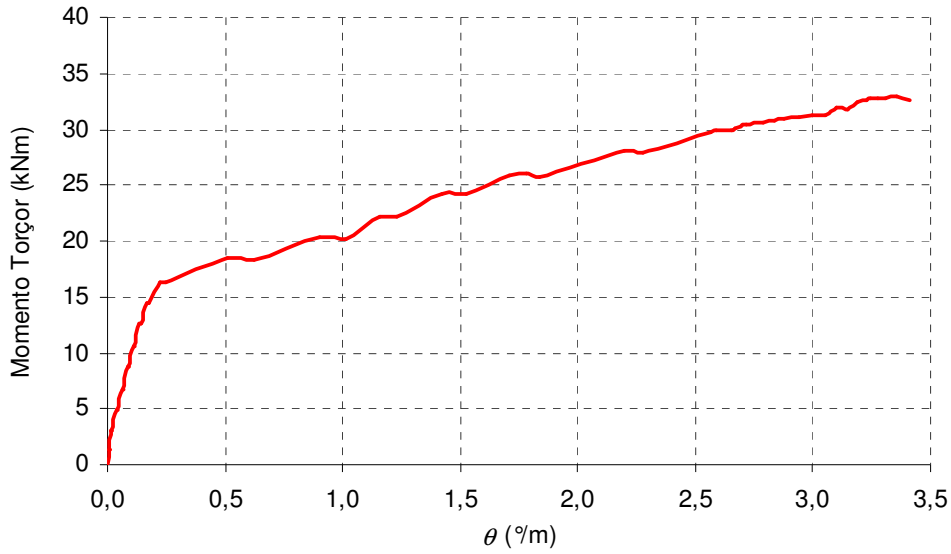


Figura 8.7 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VTL2.

Para a viga VTL3 os resultados foram $T_{cr} = 16,8$ kNm, $T_y = 28,3$ kNm e o $T_u = 31,7$ kNm, e seus respectivos ângulos de torção por unidade de comprimento foram $\theta_{cr} = 0,251$ %/m, $\theta_y = 2,027$ %/m e $\theta_u = 2,811$ %/m (Figura 8.8).

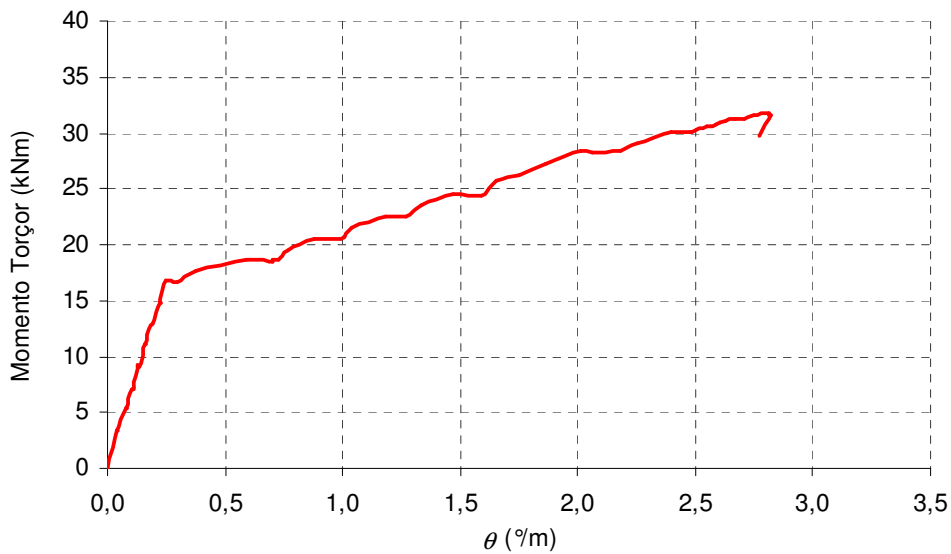


Figura 8.8 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VTL3.

Os gráficos $T \times \theta$ de todas as vigas mostram que o comportamento das mesmas apresentou três trechos bem delineados: o trecho elástico linear pré-fissuração, o trecho pós-fissuração até o escoamento de uma das armaduras e o trecho até a ruptura.

Isso indica que os resultados dos ensaios mostraram-se consistentes para uma avaliação teórica.

A Tabela 8.1 apresenta um resumo dos momentos torçores de fissuração, de escoamento e de ruptura, com seus respectivos ângulos de torção por unidade de comprimento. Mostra também a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação correspondente a cada série de vigas.

Tabela 8.1 – Resultados experimentais.

Viga		T_{cr} (kNm)	θ_{cr} (°/m)	T_y (kNm)	θ_y (°/m)	T_u (kNm)	θ_u (°/m)
VRef		16,4	0,142	20,7	1,647	22,4	2,293
Série VT	VT1	16,4	0,167	27,9	1,728	31,6	2,326
	VT2	14,9	0,219	22,7	1,507	29,9	2,494
	VT3	16,8	0,197	24,4	1,496	35,0	3,223
Série VTL	VTL1	14,9	0,204	24,4	1,710	28,0	2,392
	VTL2	16,3	0,223	24,1	1,426	32,9	3,352
	VTL3	16,8	0,251	28,3	2,027	31,7	2,811
Série VT	Média	16,03	0,19	25,0	1,58	32,17	2,68
	D. P.	1,00	0,03	2,65	0,13	2,60	0,48
	Coef. Var. (%)	6,25	13,43	10,61	8,30	8,07	17,79
Série VTL	Média	16,00	0,23	25,60	1,72	30,87	2,85
	D. P.	0,98	0,02	2,34	0,30	2,55	0,48
	Coef. Var. (%)	6,16	10,46	9,15	17,47	8,27	16,88

8.3. Análise das Rigidezes

No item 8.2 foi mostrado que as vigas apresentaram grande redução de rigidez após a fissuração, e que no trecho compreendido entre o momento torçor de escoamento e o momento torçor de ruptura a rigidez à torção não apresentou grandes variações.

Os valores das rigidezes de cada viga (Figura 8.9), para cada estágio de comportamento foram calculados a partir das expressões 8.9, 8.10 e 8.11. e são apresentados na Tabela 8.2 e na Figura 8.10:

$$(GJ)_{CR} = tg\beta_{CR} = \frac{T_{CR}}{\theta_{CR}} \quad (8.9)$$

$$(GJ)_y = \text{tg}\beta_y = \frac{T_y - T_{CR}}{\theta_y - \theta_{CR}} \quad 8.10$$

$$(GJ)_u = \text{tg}\beta_u = \frac{T_u - T_y}{\theta_u - \theta_y} \quad 8.11$$

onde:

$(GJ)_{CR}$ – rigidez elástica calculada entre o início do carregamento e a fissuração da viga;

$(GJ)_y$ – rigidez secante calculada entre a fissuração da viga e o escoamento da armadura de aço;

$(GJ)_u$ – rigidez calculada entre os trechos de escoamento e ruptura da viga.

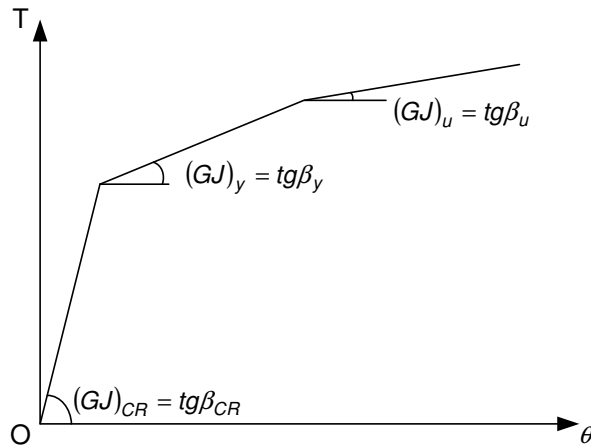


Figura 8.9 – Comportamento da curva de momento torçor versus ângulo de rotação por unidade de comprimento $T \times \theta$

A partir dos dados apresentados na Tabela 8.2, conclui-se que:

1. na viga de referência, até se atingir a fissuração, a rigidez à torção em regime elástico e linear foi 6617,26 kNm². Em seguida ocorreu uma redução de 97,52% da rigidez à torção, que diminuiu para 163,70 kNm². Entre o momento torçor de escoamento e o momento torçor de ruptura a rigidez secante diminuiu para 150,78 kNm², ou seja, uma redução de 97,72 % da rigidez em relação ao valor inicial;
2. a série VT apresentou em média uma rigidez à torção inicial de 4803,66 kNm², com um desvio padrão de 867,17 kNm² e um coeficiente de variação de 18,05%. Após a fissuração o valor da rigidez secante média reduziu 91,78%, ficando em 394,66 kNm² com um desvio padrão de 36,29 kNm² e um coeficiente de variação de 9,20%. Após o escoamento a rigidez praticamente não se alterou, apresentado um valor médio de

369,68 kNm², o que representou uma redução de 92,30% quando comparado com o valor inicial. O desvio padrão foi de 369,68 kNm² e o coeficiente de variação de 7,78%.

3. a rigidez média à torção em regime elástico linear para a série VTL foi 4069,25 kNm², com um desvio padrão de 202,93 kNm² e um coeficiente de variação de 4,99%. Assim como a viga de referência e as vigas da série VT, a rigidez média da série VTL caiu bruscamente após a fissuração das vigas, em torno de 90,96%, sendo 367,97 kNm², com um desvio padrão de 5,68 kNm² e um coeficiente de variação de 1,54%. O trecho compreendido entre o escoamento e a ruptura apresentou uma rigidez média a torção de 267,93 kNm², com um desvio padrão de 29,97 kNm² e um desvio padrão de 11,19%. Em relação a rigidez inicial, o valor médio após o escoamento teve uma redução de 93,42%.

Tabela 8.2 – Rigidez à torção.

Viga		(GJ) _{cr} (kNm ²)	(GJ) _y (kNm ²)	(GJ) _u (kNm ²)
VRef		6617,26	163,70	150,78
Série VT	VT1	5626,65	422,10	354,51
	VT2	3898,21	408,37	402,87
	VT3	4886,14	353,51	351,67
Série VTL	VTL1	4184,84	361,43	302,44
	VTL2	4187,99	371,49	252,86
	VTL3	3834,94	371,00	248,48
Série VT	Média	4803,66	394,66	369,68
	Desvio Padrão	867,17	36,29	28,78
	Coef. de Var. (%)	18,05	9,20	7,78
Série VTL	Média	4069,25	367,97	267,93
	Desvio Padrão	202,93	5,68	29,97
	Coef. de Var. (%)	4,99	1,54	11,19

Baseando-se nos valores dos coeficientes de variação apresentados na Tabela 8.2, conclui-se que as vigas da série VTL tiveram uma menor dispersão dos resultados relativos às rigidezes de fissuração e escoamento.

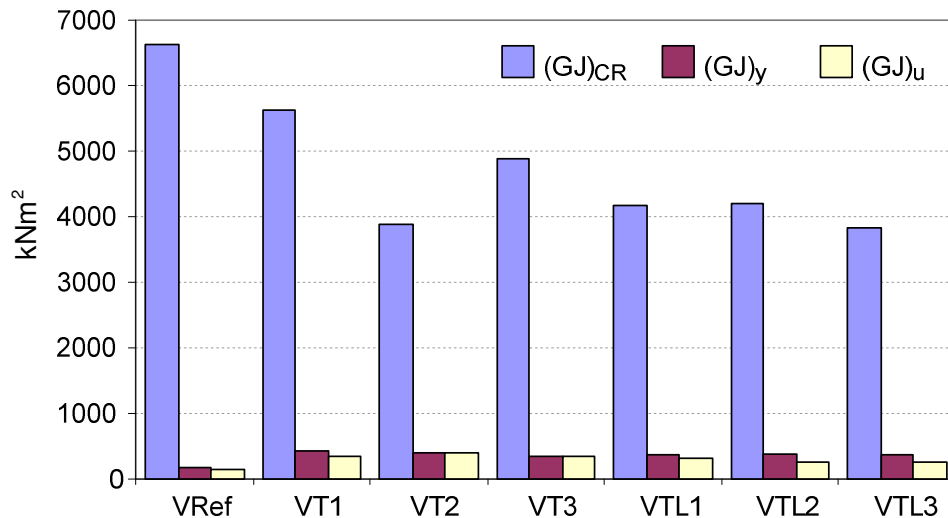


Figura 8.10 – Rigidezes das vigas.

As Figuras 8.11, 8.12 e 8.13 comparam as rigidezes das vigas para cada estágio de comportamento, permitindo concluir que:

1. a rigidez inicial da viga de referência foi 37,75% superior à rigidez inicial média da série VT e 62,62% superior ao valor médio da série VTL;
2. a série VT apresentou rigidez inicial média 18,05% superior ao valor médio da série VTL;
3. após a fissuração a rigidez média da série VT foi 141,09% maior que o valor da viga de referência, e 7,25% superior à rigidez média da série VTL;
4. a rigidez média da série VTL depois da fissuração foi 124,78% maior que a viga de referência;
5. entre o escoamento e a ruptura a série VT apresentou uma rigidez média 145,18% maior que a viga de referência e 37,98% superior à média da série VTL;
6. a rigidez média da série VTL no trecho compreendido entre o escoamento e a ruptura superou em 77,70% a rigidez da viga de referência.

As rigidezes $(GJ)_y$ e $(GJ)_u$ são da mesma ordem de grandeza para todas as vigas (Figura 8.10).

Verifica-se que tal como nas vigas de concreto armado a fissuração diminui acentuadamente a rigidez à torção da viga. O reforço com CFC pouco contribuiu para o acréscimo da rigidez das vigas ensaiadas.

Observa-se que a viga VRef apresentou $(GJ)_{CR}$ muito superior às demais vigas, mas suas rigidezes $(GJ)_y$ e $(GJ)_u$ foram inferiores.

A análise das rigidezes, face aos resultados obtidos, não é conclusivo, e requer um estudo mais apurado de modo a associar essas rigidezes à ductilidade das vigas.

Ressalta-se que para as vigas de concreto armado ainda não se tem um estudo conclusivo quanto à rigidez à torção na fase fissurada.

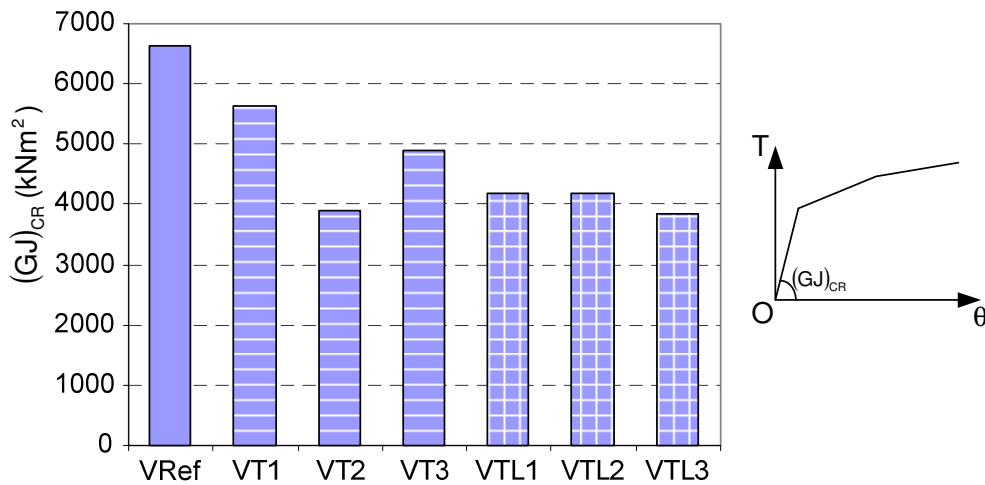


Figura 8.11 – Comparação entre as rigidezes elásticas das vigas.

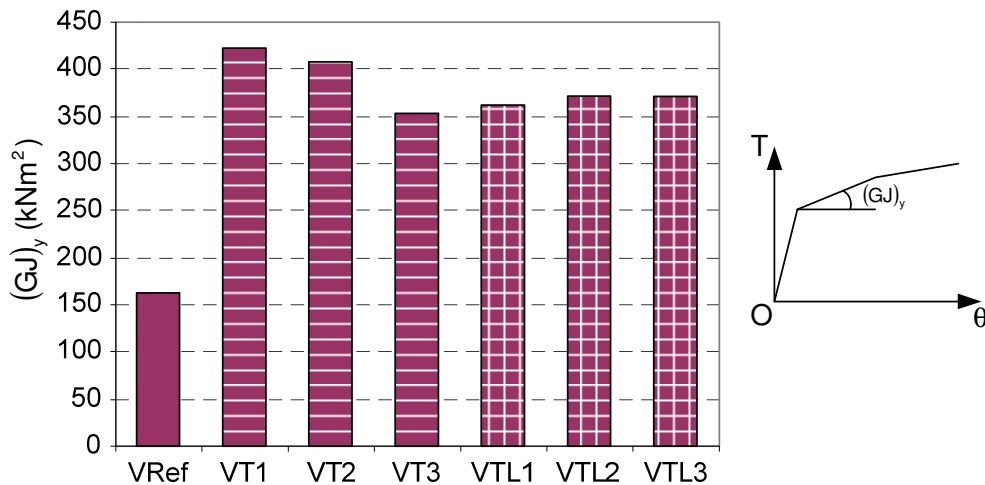


Figura 8.12 – Comparação entre as rigidezes secantes das vigas.

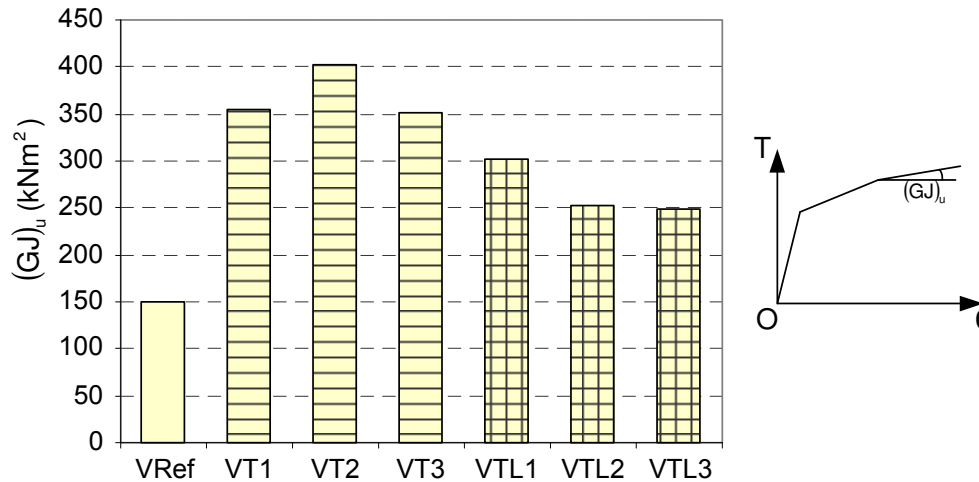


Figura 8.13 – Comparação entre as rigidezes após o escoamento das vigas.

8.4. Modo de Ruptura e Resistência à Torção

As taxas de armadura e os modos de ruptura das vigas podem ser observados na Tabela 8.3. Observa-se que todas as vigas apresentaram ruptura por esmagamento da biela de concreto.

Tabela 8.3 – Armaduras de aço e CFC e modos de ruptura.

Viga	A_{sl} mm ²	A_{st} mm ²	A_{fl} mm ²	A_{ft} mm ²	ρ_{sl} %	ρ_{st} %	ρ_{fl} %	ρ_{ft} %	Modos de Rupt.	
VRef	78,54	736,3	–	–	0,92	0,785	–	–	Esmagamento da biela de concreto	
Serie VT	VT1	78,54	736,3	–	36,6	0,92	0,785	–		0,183
	VT2	78,54	736,3	–	36,6	0,92	0,785	–		0,183
	VT3	78,54	736,3	–	36,6	0,92	0,785	–		0,183
Serie VTL	VTL1	78,54	736,3	73,2	18,3	0,92	0,785	0,118		0,092
	VTL2	78,54	736,3	73,2	18,3	0,92	0,785	0,118		0,092
	VTL3	78,54	736,3	73,2	18,3	0,92	0,785	0,118		0,092

A Tabela 8.4 e a Figura 8.14 mostram a resistência última à torção das sete vigas ensaiadas. As vigas das séries VT e VTL tiveram resistência à torção última superior à da viga de referência.

Para as vigas VT1, VT2 e VT3 obteve-se o valor médio $T_u = 32,17$ kNm, com desvio padrão igual a 2,60 kNm, e coeficiente de variação de 8,07%. O

valor médio de T_u da série VT foi 44% superior ao valor médio de T_u da viga de referência.

As três vigas da série VTL foram em média 38% mais resistentes que a viga de referência. O valor médio de T_u da série foi igual a 30,87 kNm, com desvio padrão igual a de 2,55 kNm, e coeficiente de variação de 8,27%.

As duas séries de vigas apresentaram valores médios de ruptura bem próximos, entretanto, o valor médio de T_u da série VT foi 4,21% superior ao valor médio de T_u da série VTL.

A análise estatística dos dados da Tabela 8.3 mostra que os resultados obtidos foram muito uniformes, e que o coeficiente de variação foi baixo.

Tabela 8.4 – Valores dos momentos torçores últimos.

Viga		T_u (kNm)	$\frac{T_u}{T_{u,ref}}$
VRef		22,4	–
Série VT	VT1	31,6	1,41
	VT2	29,9	1,33
	VT3	35,0	1,56
Série VTL	VTL1	28,0	1,25
	VTL2	32,9	1,47
	VTL3	31,7	1,42
Série VT	Média	32,17	1,44
	Desv. Pad.	2,60	0,12
	Coef. Var. (%)	8,07	
Série VTL	Média	30,87	1,38
	Desv. Pad.	2,55	0,11
	Coef. Var. (%)	8,27	

O aumento da resistência à torção foi de cerca de 40%, o que mostra que esse tipo de reforço é efetivo.

Verificou-se que a ruptura sempre foi controlada pela biela flexo-comprimida, o que mostra que tal como nas vigas de concreto armado a verificação da biela é uma etapa fundamental nesse tipo de análise.

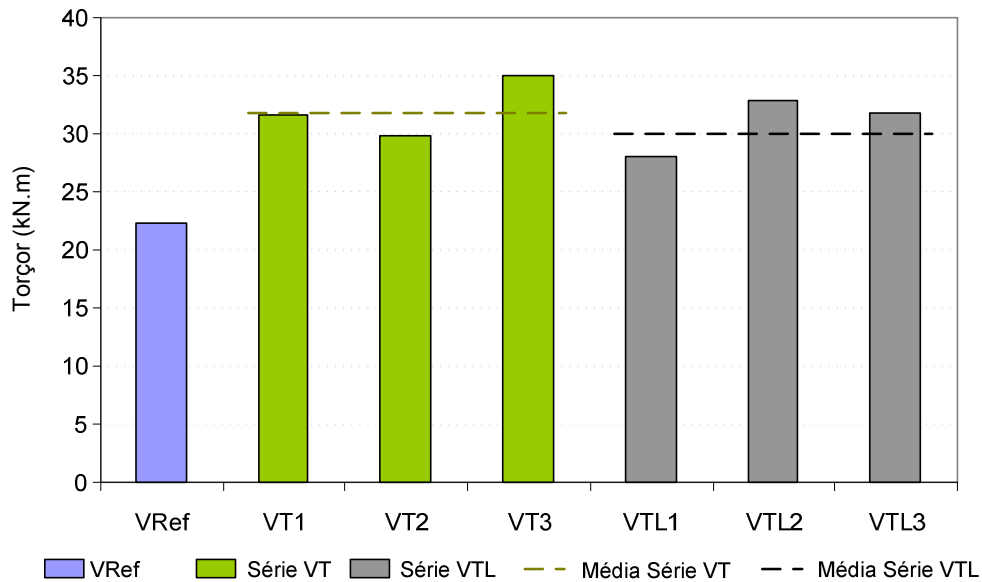


Figura 8.14 – Comparação entre os momentos torçores de ruptura.

8.5. Análise das Deformações Específicas nas Armaduras de Aço e CFC

As Figuras 8.15, 8.16 e 8.17 mostram os diagramas momento torçor vs. deformação específica $T \times \varepsilon$, das armaduras de aço e do reforço com CFC da viga VTL2, nas direções transversal e longitudinal, nas posições instrumentadas com os EER tal como apresentadas no capítulo 7.

Até se atingir o momento torçor de fissuração as deformações específicas foram praticamente nulas, tanto nas armaduras de aço e nos reforços de CFC, nas direções transversal e longitudinal.

Após a fissuração as deformações específicas nas armaduras de aço aumentaram expressivamente, apresentando um comportamento aproximadamente linear.

As deformações específicas das armaduras de CFC, longitudinais e transversais, também aumentaram bruscamente após o momento torçor de fissuração, entretanto, o comportamento da curva $T \times \varepsilon$ não apresentou um padrão definido.

Os gráficos das demais vigas apresentaram o mesmo padrão, e constam do Anexo A.

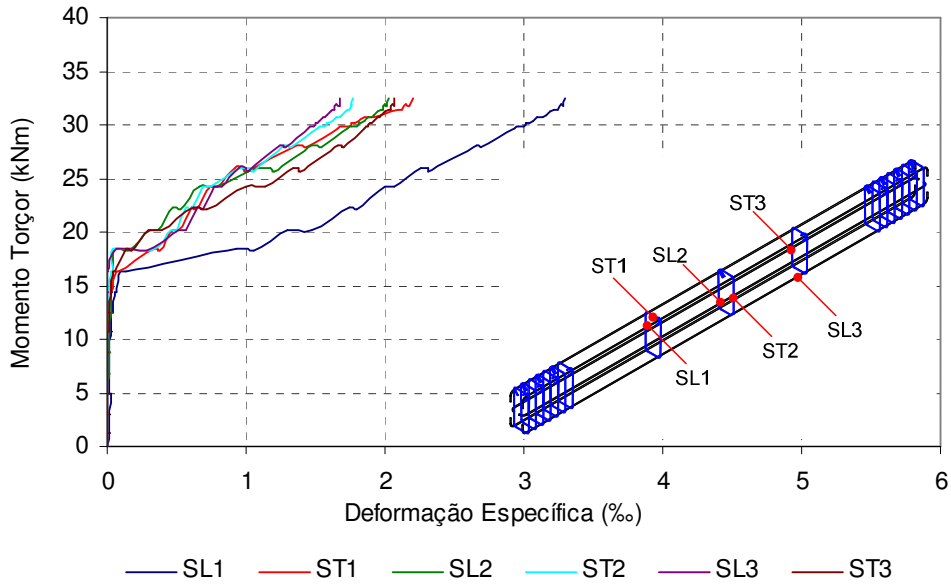


Figura 8.15 – Momento torçor x deformação específica da armadura transversal e longitudinal de aço da viga VTL2.

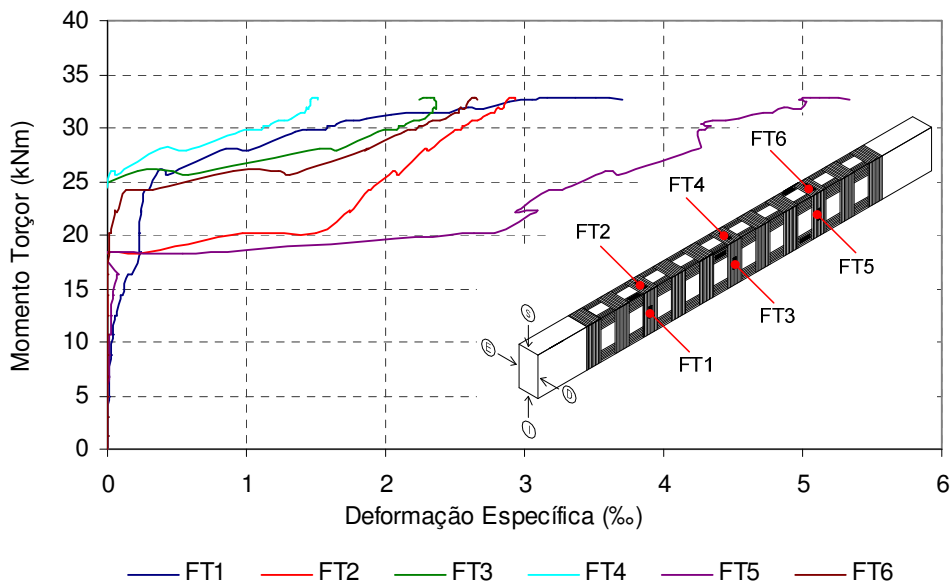


Figura 8.16 – Momento torçor x deformação específica da armadura transversal de CFC da viga VTL2.

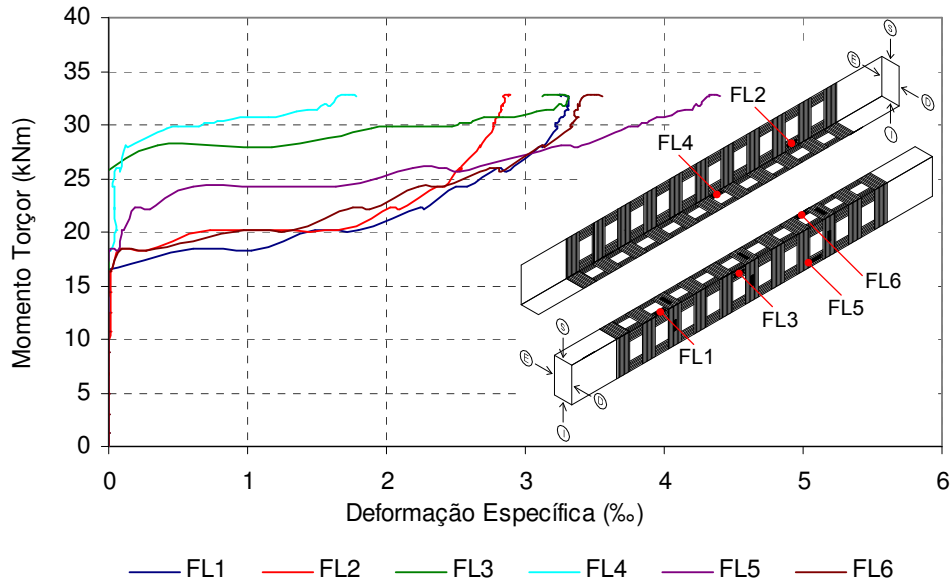


Figura 8.17 – Momento torçor x deformação específica da armadura longitudinal de CFC da viga VTL2.

Os valores das deformações específicas últimas nas armaduras de aço e do reforço com CFC das vigas ensaiadas são mostrados na Tabela 8.5, e as posições onde esses valores foram obtidos são mostrados nas Figuras 8.18 e 8.19.

Tabela 8.5 – Deformações específicas últimas nas armaduras de aço e no reforço com CFC, nas direções transversal e longitudinal.

Viga	ϵ_{su} (‰)		ϵ_{fu} (‰)		
	Transv.	Long.	Transv.	Long.	
Ref	2,186	2,387	–	–	
Série VT	VT1	2,145	2,302	3,486	–
	VT2	2,428	2,587	4,064	–
	VT3	1,690	3,151	4,271	–
Série VTL	VTL1	1,713	2,408	3,247	3,302
	VTL2	2,275	3,397	5,253	4,382
	VTL3	2,151	2,475	4,090	3,566

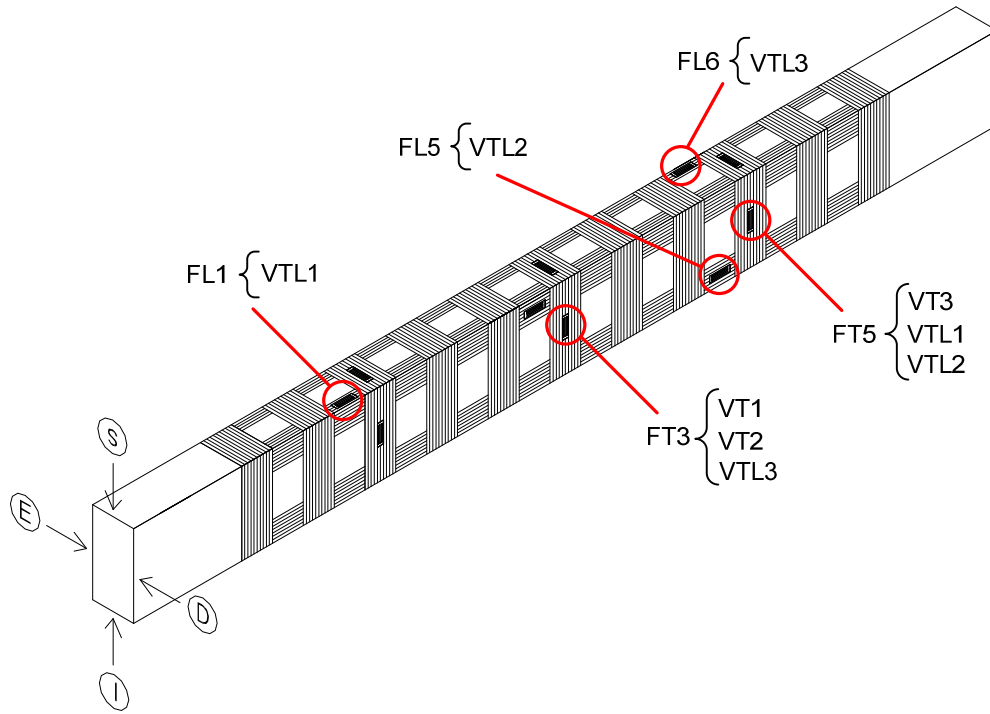


Figura 8.18 – Posição onde foram obtidas as deformações específicas máximas no CFC.

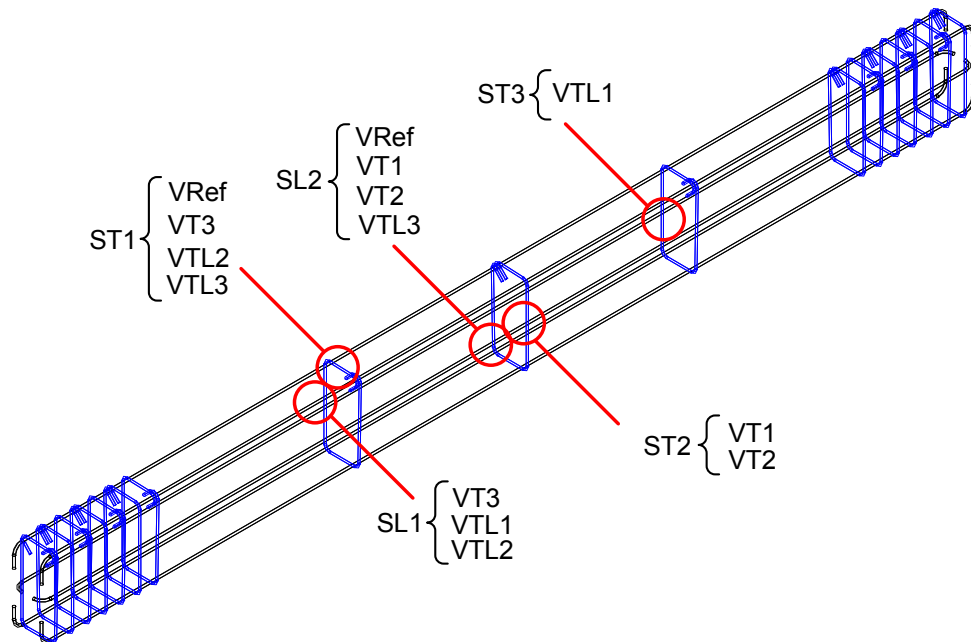


Figura 8.19 – Posição onde foram obtidas as deformações específicas máximas nas armaduras internas de aço.

O gráfico da Figura 8.20 apresenta o fator de efetividade das deformações específicas do CFC, que é a razão entre a deformação específica máxima obtida

nos ensaios das vigas e a deformação específica última média obtida nos ensaios de tração do CFC.

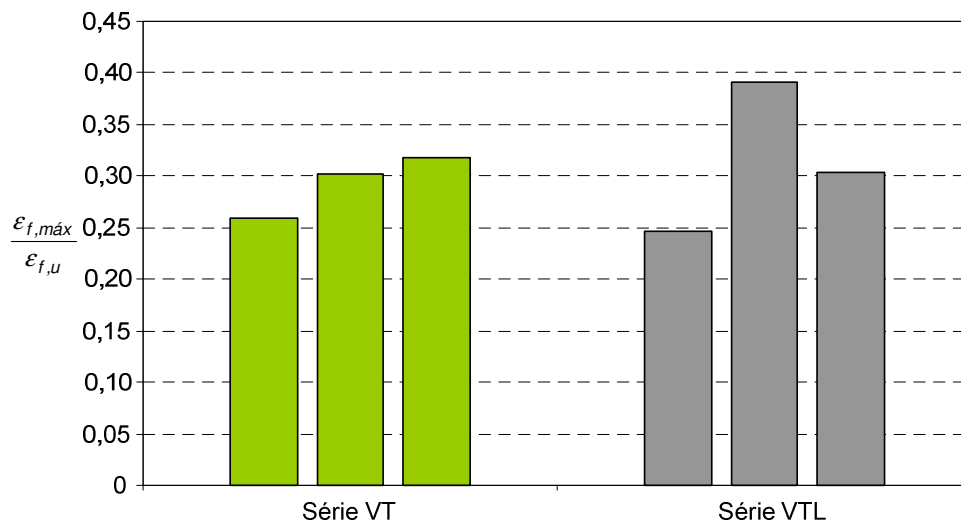


Figura 8.20 – Fator de efetividade das deformações específicas do CFC.

Os valores de das deformações específicas de todas as vigas mostraram-se consistentes, mas para se obter uma relação das mesmas com os demais parâmetros das vigas, tais como, resistência à compressão do concreto f_c e taxa geométrica total das armaduras $\rho_{TOTAL} = (\rho_{st} + \rho_{sl}) + (\rho_{ft} + \rho_{fl})$, é necessário a realização de ensaios apropriados para esse tipo de análise.

8.6. Análise do Ângulo de Inclinação da Biela

Para cada viga ensaiada foram obtidos quatro diferentes ângulos de inclinação da biela: o ângulo determinado a partir do estado de deformação da viga α_ϵ , o ângulo das fissuras α_f , o ângulo calculado a partir do campo de tensões existentes na viga α_σ e o ângulo α_{Ap} calculado a partir da expressão 6.138 de Aprile e Benedetti (2004) (Figura 8.21a e 8.21b).

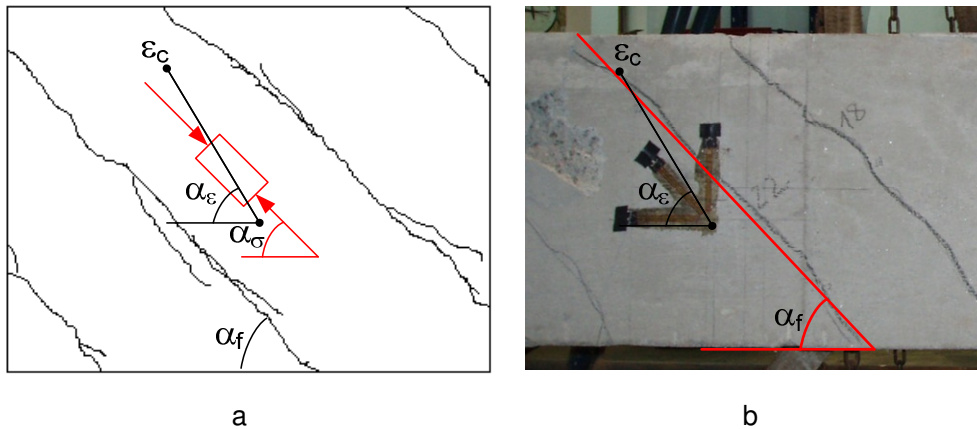


Figura 8.21 – Deformações específicas: a) painel fissurado; b) viga VRef.

Utilizando-se o círculo de Mohr, calculou-se o ângulo α_ϵ a partir das deformações específicas medidas por meio dos três extensômetros colados na superfície da viga.

O ângulo α_f foi determinado graficamente por meio da utilização de programa de computador para edição gráfica. Para cada viga foram feitas várias medições dos ângulos das fissuras, e para o cálculo de α_f foi obtida uma média desses valores.

O ângulo α_σ foi calculado utilizando-se a formulação apresentada no item 6.2, e as deformações específicas medidas no concreto e nas armaduras transversal e longitudinal de aço e CFC. O processo foi executado de forma iterativa, de acordo com o fluxograma mostrado na Figura 8.22:

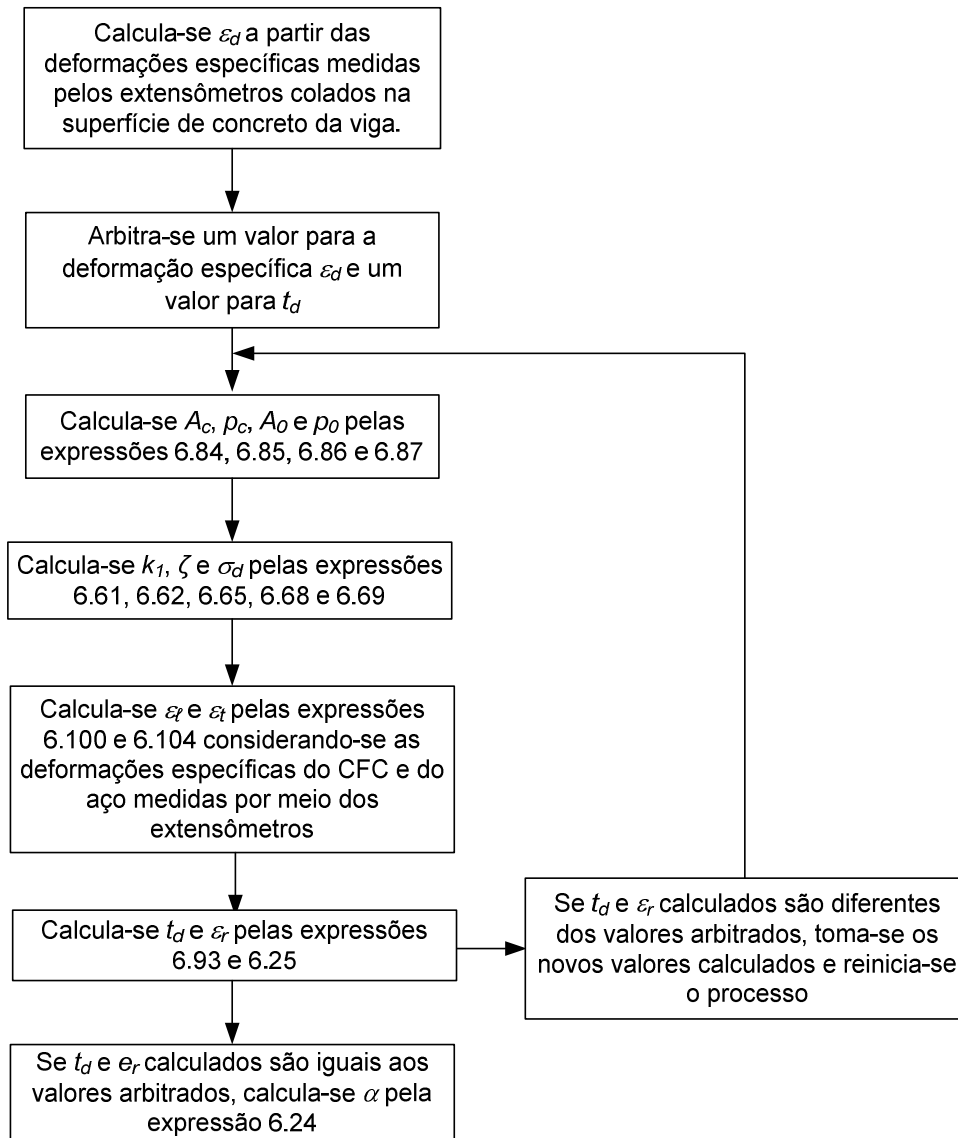


Figura 8.22 – Fluxograma.

Analisando-se os dados apresentados na Tabela 8.6 e na Figura 8.23 conclui-se que:

1. α_{Ap} é constante em cada grupo de vigas, pois depende apenas de parâmetros mecânicos;
2. com exceção da viga de VTL1, observa-se que $\alpha_\varepsilon > \alpha_f > \alpha_{Ap} > \alpha_\sigma$;
3. para a viga VTL1 obteve-se $\alpha_\varepsilon > \alpha_\sigma > \alpha_f > \alpha_{Ap}$;
4. nas quatro diferentes formas de determinação do ângulo de inclinação das fissuras, as vigas da série VT apresentaram valores maiores que as vigas da série VTL.

5. as vigas das séries VT e VTL apresentaram valores de ângulo de inclinação da biela superiores ao da viga de referência.

Tabela 8.6 – Ângulo de inclinação das bielas das vigas.

Viga		T_u (kNm)	α_ε (°)	α_f (°)	α_σ (°)	α_{Ap} (°)
VRef		22,4	46,1	42,6	35,7	-
Série VT	VT1	31,6	54,5	49,4	45,0	46,0
	VT2	29,9	56,4	48,5	43,8	46,0
	VT3	35	55,7	48,1	39,4	46,0
Série VTL	VTL1	28	50,6	45,9	46,5	44,0
	VTL2	32,9	49,6	46,1	38,7	44,0
	VTL3	31,7	49,2	46,7	40,5	44,0

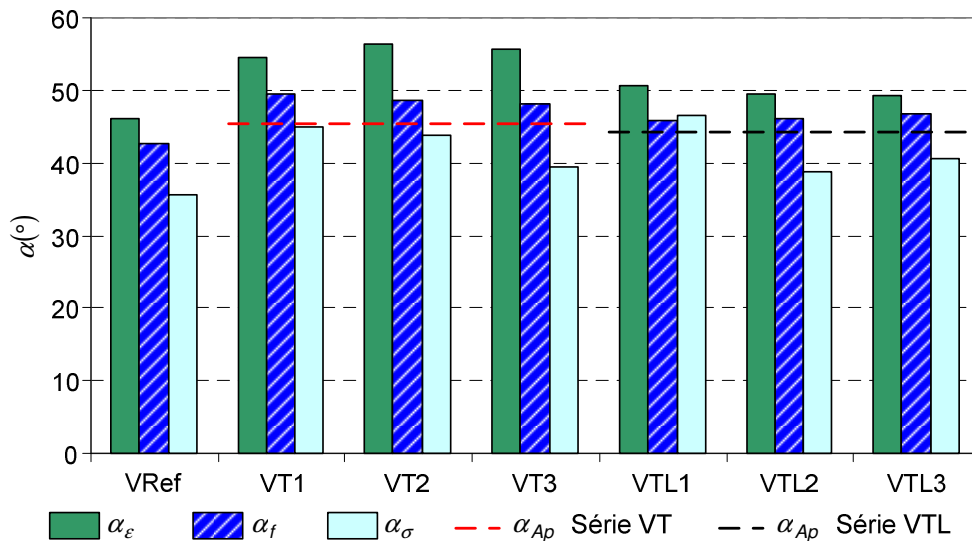


Figura 8.23 – Ângulo de inclinação das bielas.

As Figuras 8.24 e 8.25 mostram as comparações dos valores desses ângulos, marcando-se o limite de $\pm 20\%$ de diferença eles. Observa-se que:

- na comparação entre $\alpha_\varepsilon \times \alpha_\sigma$ duas vigas da série VT e uma viga da série VTL ficaram fora do limite de $+20\%$;
- na comparação entre $\alpha_f \times \alpha_\sigma$ todas as vigas ficaram dentro dos limites de $\pm 20\%$.

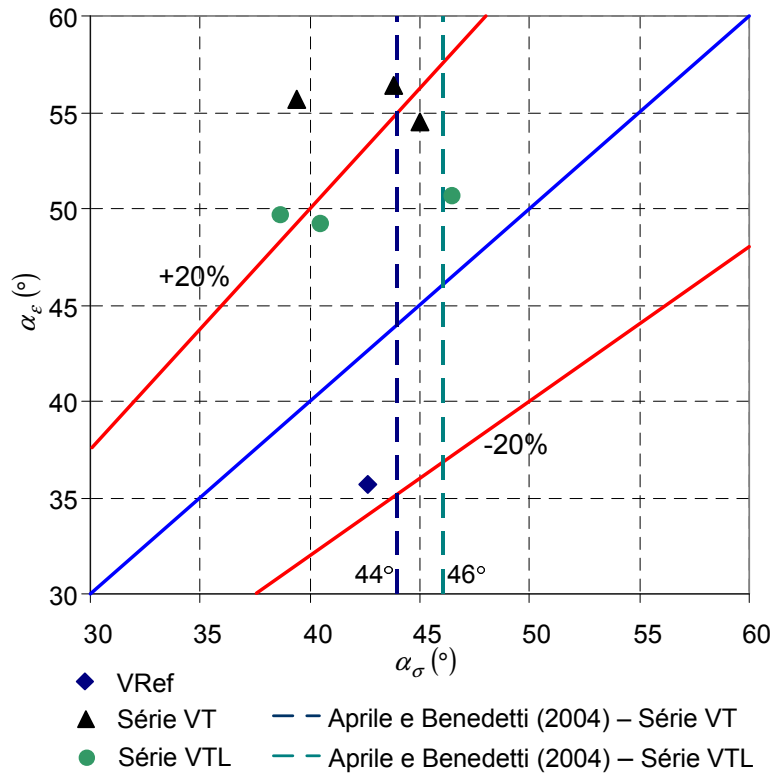


Figura 8.24 – Ângulo de inclinação das bielas.

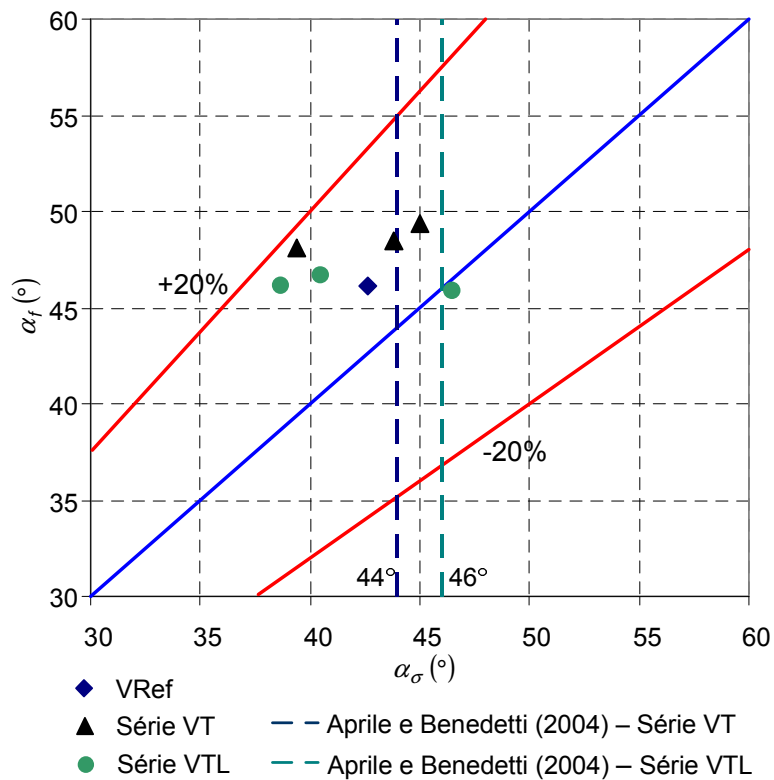


Figura 8.25 – Ângulo de inclinação das bielas.

As Figuras 8.26 e 8.27 apresentam as comparações entre $\frac{\epsilon_{st,exp}}{\epsilon_{ft,exp}} \times \alpha$ e

$\frac{\epsilon_{sl,exp}}{\epsilon_{ft,exp}} \times \alpha$, considerando-se α_ϵ , α_f , α_σ e α_{Ap} . Para a direção transversal

observa-se que relação $\frac{\epsilon_{st,exp}}{\epsilon_{ft,exp}}$ apresenta valores entre 0,396 e 0,615. Na

direção longitudinal os valores da razão $\frac{\epsilon_{sl,exp}}{\epsilon_{ft,exp}}$ variam entre 0,694 e 0,775

(Tabela 8.7).

Tabela 8.7 – Razões entre $\frac{\epsilon_{st,exp}}{\epsilon_{ft,exp}}$ e $\frac{\epsilon_{sl,exp}}{\epsilon_{ft,exp}}$.

Viga		$\epsilon_{st,exp}$	$\epsilon_{sl,exp}$	$\epsilon_{ft,exp}$	$\epsilon_{ft,exp}$	$\frac{\epsilon_{st,exp}}{\epsilon_{ft,exp}}$	$\frac{\epsilon_{sl,exp}}{\epsilon_{ft,exp}}$
Série VT	VT1	2,145	2,302	3,486	—	0,615	—
	VT2	2,428	2,587	4,064	—	0,597	—
	VT3	1,69	3,151	4,271	—	0,396	—
Série VTL	VTL1	1,713	2,408	3,247	3,302	0,528	0,729
	VTL2	2,275	3,397	5,253	4,382	0,433	0,775
	VTL3	2,151	2,475	4,090	3,566	0,526	0,694

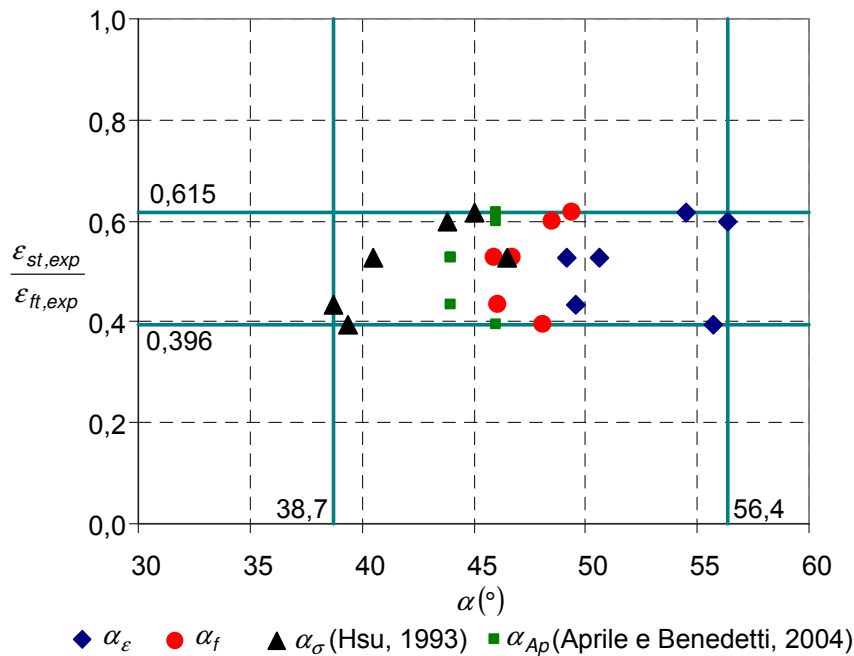


Figura 8.26 – Gráfico $\frac{\epsilon_{st,exp}}{\epsilon_{ft,exp}} \times \alpha$.

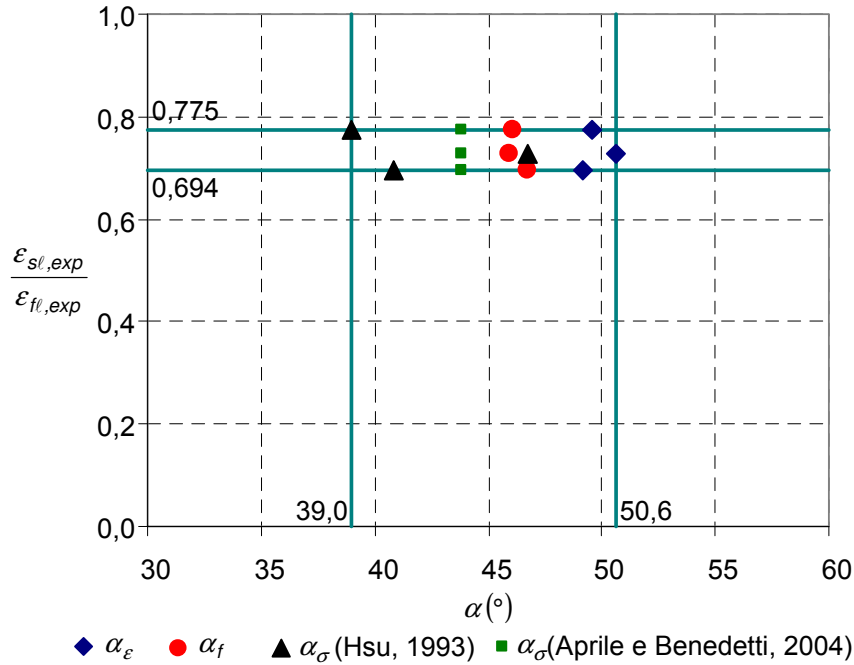


Figura 8.27 – Figura 8.16 – Gráfico $\frac{\epsilon_{sl,exp}}{\epsilon_{fl,exp}} \times \alpha$.

A tensão de compressão na biela foi determinada considerando-se os valores de α_ϵ , α_f e α_σ , e calculada a partir das seguintes expressões:

$$\sigma_{c,\epsilon} = \frac{T}{2tA_0 \text{sen} \alpha_\epsilon \text{cos} \alpha_\epsilon} \quad (8.12)$$

$$\sigma_{c,f} = \frac{T}{2tA_0 \text{sen} \alpha_f \text{cos} \alpha_f} \quad (8.13)$$

$$\sigma_{c,\sigma} = \frac{T}{2tA_0 \text{sen} \alpha_\sigma \text{cos} \alpha_\sigma} \quad (8.14)$$

$$\sigma_{c,Ap} = \frac{T}{2tA_0 \text{sen} \alpha_{Ap} \text{cos} \alpha_{Ap}} \quad (8.15)$$

onde

$\sigma_{c,\epsilon}$ – tensão de compressão na biela calculado a partir de α_ϵ ;

$\sigma_{c,f}$ – tensão de compressão na biela calculado a partir de α_f ;

$\sigma_{c,\sigma}$ – tensão de compressão na biela calculado a partir de α_σ ;

$\sigma_{c,Ap}$ – tensão de compressão na biela calculado a partir de α_{Ap} ;

Com os valores da tensão de compressão na biela e com a resistência média do concreto utilizado nas vigas, determinou-se o fator de efetividade do concreto, calculado pelas seguintes expressões (Tabela 8.8 e Figuras 8.28 e 8.29):

$$v_{\varepsilon} = \frac{\sigma_{c,\varepsilon}}{f_c} \quad (8.16)$$

$$v_f = \frac{\sigma_{c,f}}{f_c} \quad (8.17)$$

$$v_{\sigma} = \frac{\sigma_{c,\sigma}}{f_c} \quad (8.18)$$

$$v_{Ap} = \frac{\sigma_{c,Ap}}{f_c} \quad (8.19)$$

onde

- v_{ε} – fator de efetividade do concreto calculado a partir de $\sigma_{c,\varepsilon}$;
- v_f – fator de efetividade do concreto calculado a partir de $\sigma_{c,f}$;
- v_{σ} – fator de efetividade do concreto calculado a partir de $\sigma_{c,\sigma}$;
- v_{Ap} – fator de efetividade do concreto calculado a partir de $\sigma_{c,Ap}$;
- f_c – resistência à compressão do concreto;

Para o cálculo do coeficiente de efetividade utilizou-se a resistência média à compressão do concreto, pois as vigas foram ensaiadas com idades em torno de um ano.

A hipótese admitida pelos modelos teóricos de que o ângulo de inclinação das fissuras, o ângulo do campo de deformações e o ângulo do campo de tensões são iguais é adequada, e fornece resultados consistentes e próximos.

Contudo, recomenda-se a realização de mais ensaios com medições desses ângulos, considerando-se a variação da resistência à compressão do concreto e das taxas geométricas das armaduras de aço e de CFC.

Tabela 8.8 – Tensão de compressão na biela e fator de efetividade do concreto de acordo com os ângulos medidos e calculados.

Viga	f_c (MPa)	$\sigma_{c,\varepsilon}$ (MPa)	$\sigma_{c,f}$ (MPa)	$\sigma_{c,\sigma}$ (MPa)	$\sigma_{c,Ap}$ (MPa)	v_ε	v_f	v_σ	$v_{\sigma,Ap}$	
Ref	36,6	10,31	10,34	10,87	–	0,282	0,282	0,297	–	
Série VT	VT1	36,6	14,13	13,52	13,36	13,37	0,386	0,369	0,365	0,365
	VT2	36,6	13,71	12,73	12,65	12,65	0,375	0,348	0,346	0,346
	VT3	36,6	15,89	14,88	15,08	14,80	0,434	0,407	0,412	0,404
Série VTL	VTL1	36,6	12,08	11,85	11,86	11,85	0,330	0,324	0,324	0,324
	VTL2	36,6	14,10	13,93	14,26	13,93	0,385	0,381	0,390	0,381
	VTL3	36,6	13,56	13,44	13,58	13,42	0,370	0,367	0,371	0,367
Série VT	Média		14,58	13,71	13,70	13,61	0,398	0,375	0,374	0,372
	Des. Pad.		1,16	1,09	1,25	1,10	0,032	0,030	0,034	0,030
	Coef. Var. (%)		7,94	7,93	9,13	8,07	7,94	7,93	9,13	8,07
Série VTL	Média		13,25	13,07	13,24	13,07	0,362	0,357	0,362	0,357
	Des. Pad.		1,05	1,09	1,24	1,08	0,029	0,030	0,034	0,030
	Coef. Var. (%)		7,91	8,30	9,34	8,27	7,91	8,30	9,34	8,27
VT+VTL	Média		13,91	13,39	13,47	13,34	0,380	0,366	0,368	0,364
	Des. Pad.		1,15	0,95	1,05	0,94	0,031	0,026	0,029	0,026
	Coef. Var. (%)		8,25	7,09	7,76	7,01	8,25	7,09	7,76	7,01

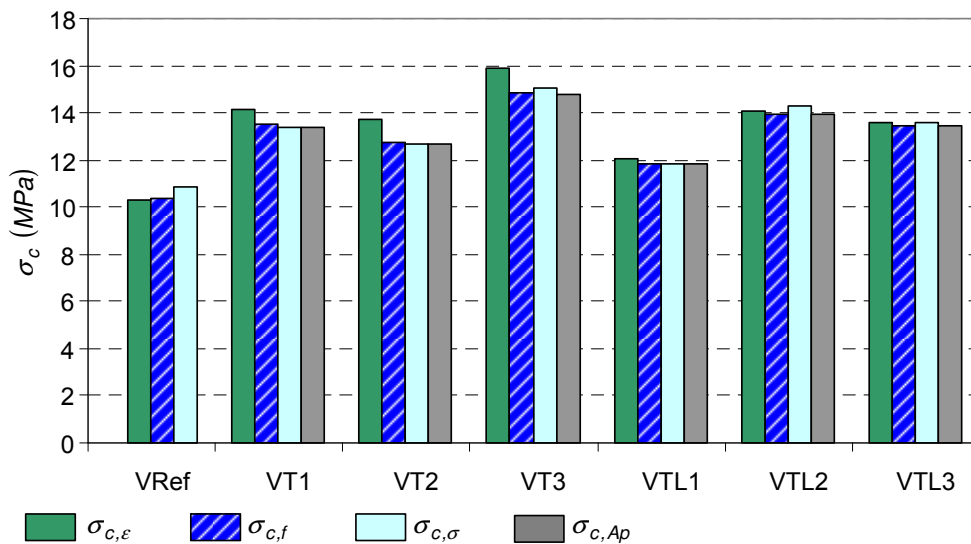


Figura 8.28 – Tensão de compressão na biela.

O cálculo dos ângulos de inclinação da biela segundo Aprile e Benedetti (2004) apresentadas resultados consistentes, o que indica que esse modelo pode ser usado para a análise do reforço à torção.

Os fatores de efetividade do concreto para as diversas formulações foram inferiores aos prescritos pelo Eurocode 2 e diversos autores para vigas de concreto armado.

Com exceção do valor calculado para a viga de referência e a viga VTL2, constatou-se que os valores da tensão de compressão na biela da treliça espacial $\sigma_{c,\varepsilon}$ são superiores aos valores de $\sigma_{c,\sigma}$, $\sigma_{c,f}$ e $\sigma_{c,Ap}$.

A tensão $\sigma_{c,f}$ só é maior do que a tensão $\sigma_{c,\sigma}$ nas vigas VT1 e VT2.

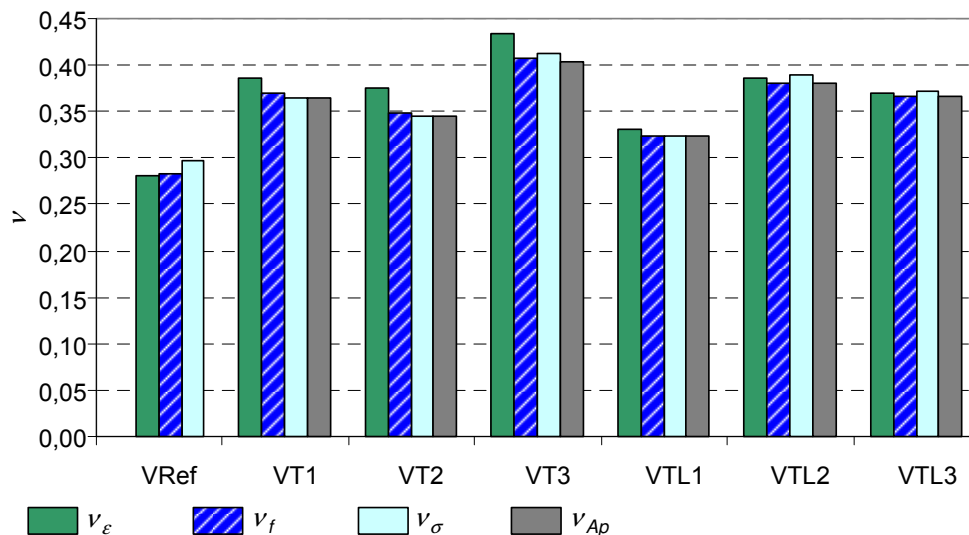


Figura 8.29 – Fator de efetividade do concreto.

Assim como no cálculo da tensão de compressão da biela verificou-se que os valores do fator de efetividade do concreto v_ε são maiores que os valores de v_σ e v_f , exceto na viga de referência e nas vigas VTL2 e VTL3 onde v_σ é maior que v_ε .

8.7.

Deformações Específicas Teóricas Calculadas de Acordo com o Bulletin 14 da FIB

A Tabela 8.9 e as Figuras 8.30, 8.31, 8.32 e 8.33 comparam as deformações específicas últimas no CFC obtidas nos ensaios das vigas reforçadas com as deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB, considerando-se o acréscimo do momento torçor proporcionado pelo reforço com CFC. Verifica-se que as deformações específicas teóricas nas armaduras

do CFC transversal da série VT, são inferiores aos valores obtidos experimentalmente.

Na série VTL os valores das deformações específicas teóricas nas armaduras de CFC, tanto transversais como longitudinais, são em geral maiores que os valores obtidos no programa experimental.

Tabela 8.9 – Deformações específicas últimas calculadas de acordo com o Bulletin 14 da FIB.

Viga	$T_{u,exp}$	$\Delta T_{u,CFC}$	Bulletin 14 da FIB								
			α_ε		α_f		α_σ		α_{Ap}		
			ε_{ftu}	ε_{flu}	ε_{ftu}	ε_{flu}	ε_{ftu}	ε_{flu}	ε_{ftu}	ε_{flu}	
	kNm	kNm	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	
VRef	22,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Série VT	VT1	31,6	9,2	2,561	–	2,131	–	1,833	–	1,892	–
	VT2	29,9	7,5	2,241	–	1,683	–	1,433	–	1,542	–
	VT3	35,0	12,6	3,667	–	2,788	–	2,062	–	2,591	–
Série VTL	VTL1	28,0	5,6	2,707	1,827	2,295	2,155	2,360	2,096	2,147	2,303
	VTL2	32,9	10,5	4,899	3,549	4,333	4,012	3,376	5,149	4,026	4,318
	VTL3	31,7	9,3	4,278	3,188	3,919	3,480	3,188	4,278	3,566	3,824
Série VT	Média	9,8	2,823	–	2,201	–	1,776	–	2,008	–	–
	Des. Pad.	2,6	0,748	–	0,556	–	0,318	–	0,534	–	–
	C. V. (%)	26,59	26,51	–	25,25	–	17,93	–	26,59	–	–
Série VTL	Média	8,5	3,962	2,854	3,515	3,216	2,975	3,841	3,247	3,482	–
	Des. Pad.	2,6	1,130	0,908	1,077	0,957	0,541	1,573	0,979	1,050	–
	C. V. (%)	30,17	28,52	31,82	30,6	29,74	18,18	40,95	30,17	30,17	–

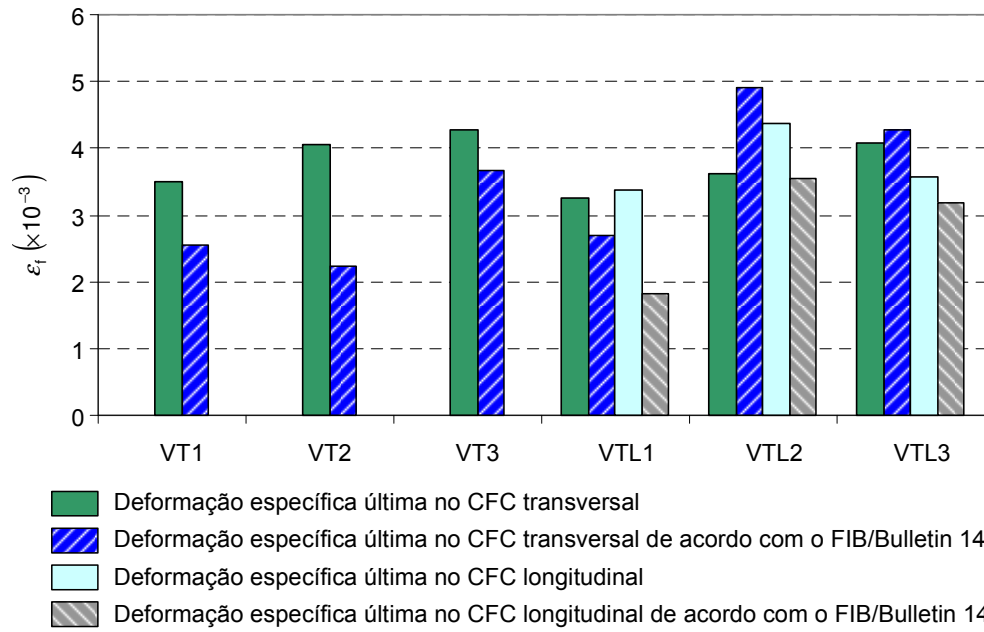


Figura 8.30 – Comparação entre deformações específicas últimas experimentais e deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB considerando-se α_{ϵ} .

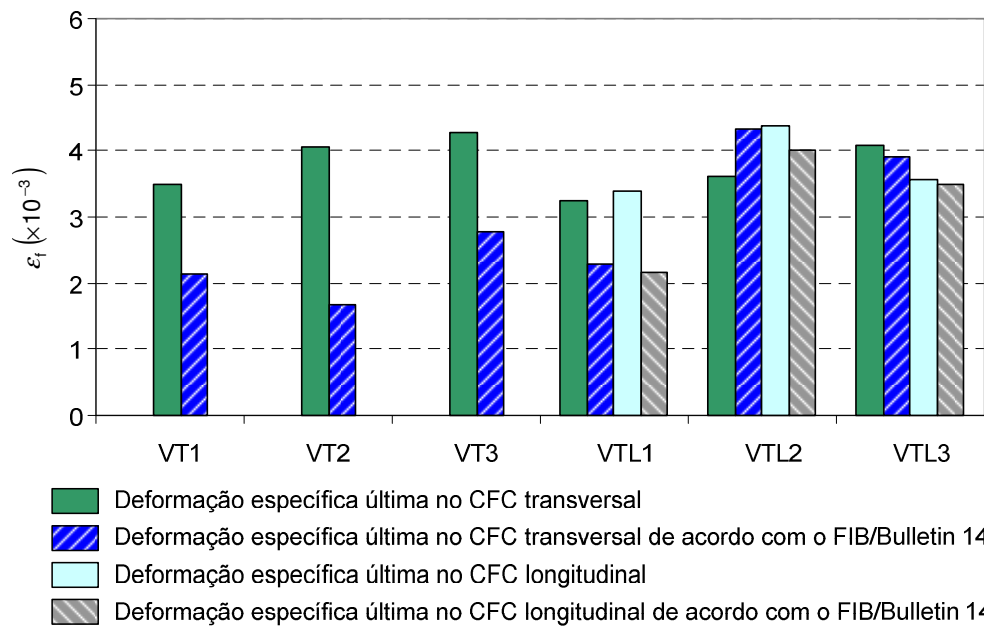


Figura 8.31 – Comparação entre deformações específicas últimas experimentais e deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB considerando-se α_{ϵ} .

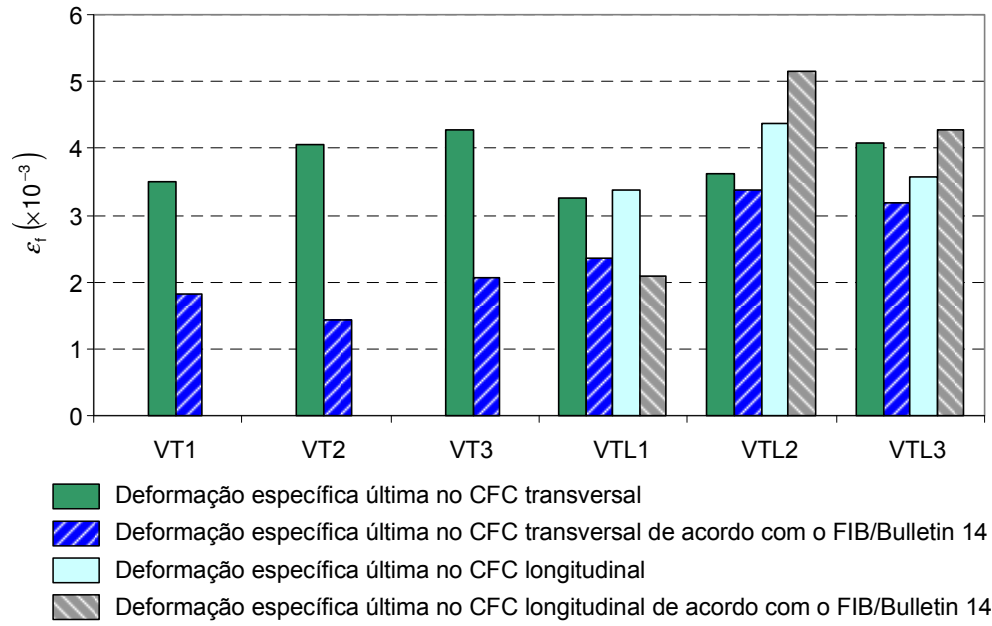


Figura 8.32 – Comparação entre deformações específicas últimas experimentais e deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB considerando-se α_σ .

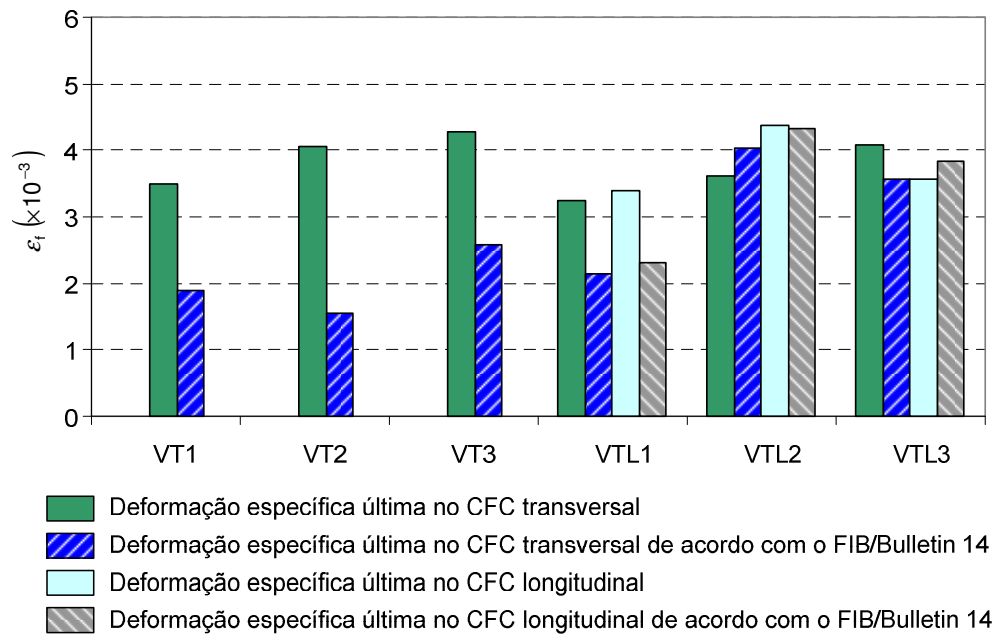


Figura 8.33 – Comparação entre deformações específicas últimas experimentais e deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB considerando-se α_{Ap} .

Com as deformações específicas teóricas do CFC calculadas a partir dos ângulos α_ε , α_f , α_σ e α_{Ap} e as deformações específicas últimas obtidas nos ensaios das vigas, se tem as razões η_t e η_ℓ , que relacionam os valores das

deformações específicas teóricas calculadas a partir do FIB bulletin 14 com os valores das deformações específicas experimentais, apresentados na Tabela 8.10 e nas Figuras 8.34 e 8.35, sendo:

$$\eta_t = \frac{\varepsilon_{ft,teo}}{\varepsilon_{ft,exp}} \quad (8.20)$$

$$\eta_\ell = \frac{\varepsilon_{fl,teo}}{\varepsilon_{fl,exp}} \quad (8.21)$$

onde

$\varepsilon_{ft,teo}$ – deformação específica teórica do CFC na direção transversal;

$\varepsilon_{fl,teo}$ – deformação específica teórica do CFC na direção longitudinal;

$\varepsilon_{ft,exp}$ – deformação específica experimental do CFC na direção transversal;

$\varepsilon_{fl,exp}$ – deformação específica experimental do CFC na direção longitudinal;

Tabela 8.10 – Valores das razões η_t e η_ℓ para os ângulos α_ε , α_f , α_σ e α_{Ap} .

Viga	ε_{ftu}	ε_{flu}	α_ε		α_f		α_σ		α_{Ap}		
	‰	‰	η_t	η_ℓ	η_t	η_ℓ	η_t	η_ℓ	η_t	η_ℓ	
Série VT	VT1	3,486	–	1,36	–	1,64	–	1,90	–	1,84	–
	VT2	4,064	–	1,81	–	2,41	–	2,84	–	2,64	–
	VT3	4,271	–	1,16	–	1,53	–	2,07	–	1,65	–
Série VTL	VTL1	3,247	3,302	1,20	1,85	1,41	1,57	1,38	1,61	1,51	1,47
	VTL2	5,253	4,382	0,74	1,23	0,83	1,09	1,07	0,85	0,90	1,01
	VTL3	4,090	3,566	0,96	1,12	1,04	1,02	1,28	0,83	1,15	0,93
Série VT	Média			1,45	–	1,86	–	2,27	–	2,04	–
	Desvio Padrão			0,33	–	0,48	–	0,50	–	0,52	–
	Coef. de Var. (%)			23,0	–	25,9	–	21,9	–	25,6	–
Série VTL	Média			0,96	1,40	1,10	1,23	1,24	1,10	1,19	1,14
	Desvio Padrão			0,23	0,39	0,29	0,30	0,16	0,45	0,31	0,29
	Coef. de Var. (%)			24,0	28,1	26,8	24,2	12,6	40,5	26,1	25,4

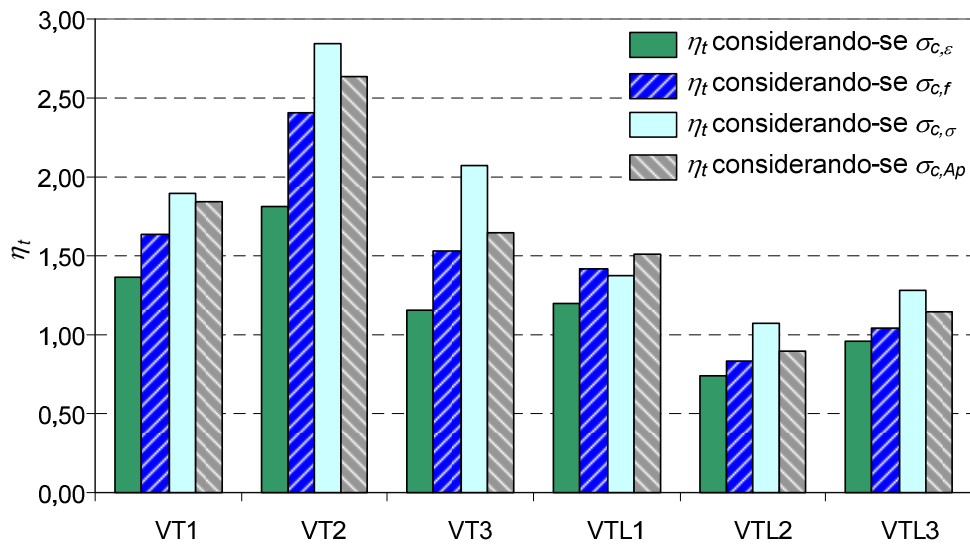


Figura 8.34 – Razões η_t do CFC longitudinal.

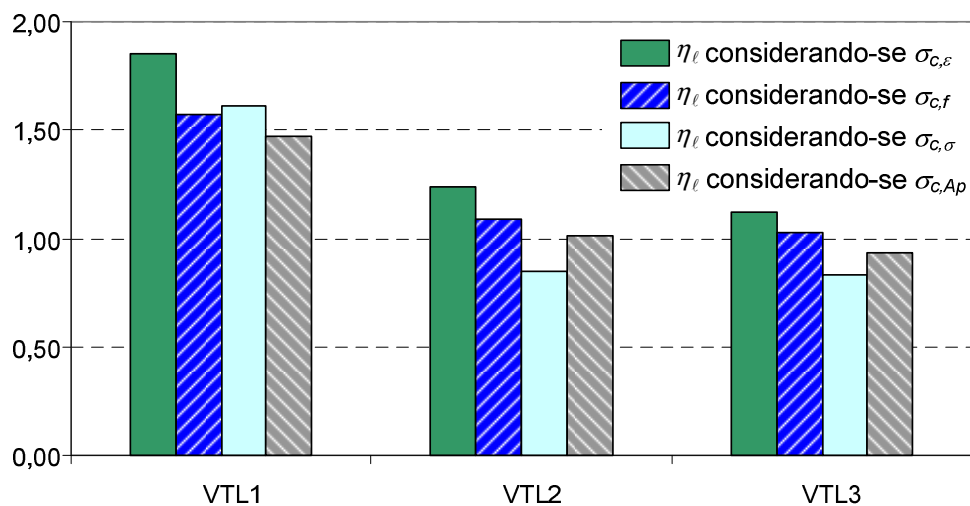


Figura 8.35 – Razões η_l do CFC transversal.

As expressões para a deformação específica do CFC fornecidas pelo Bulletin 14 da FIB devem ser usadas com cautela, pois foram estabelecidas para vigas ensaiadas a força cortante. Essa adaptação é um procedimento não recomendável e passível de críticas, pois o mecanismo resistente à torção não é o mesmo do mecanismo resistente à força cortante.

8.8.**Comparação Entre os Valores Experimentais e os Valores Obtidos com o Modelo da Treliça Espacial do Eurocode 2**

O momento torçor de ruptura da viga de referência foi calculado segundo a sistemática recomendada pelo Eurocode 2, que se baseia no modelo da treliça espacial generalizada. Verificou-se a resistência da biela de concreto T_{Rd1} e a resistência das armaduras. As parcelas resistentes das armaduras foram calculadas com os dados obtidos nos ensaios de tração do aço, e as deformações específicas dos estribos e barras longitudinais. Os resultados obtidos por intermédio da sistemática do Eurocode 2 foram bons, tanto os das vigas da série VT, como os das vigas da série VTL (Tabela 8.11 e Figura 8.36).

O momento torçor de ruptura experimental da série VT foi em média 8,9% menor que o momento torçor último obtido a partir do modelo do Eurocode 2. O desvio padrão foi de 0,074 kNm e o coeficiente de variação de 8,07%.

Para a série VTL o valor médio do momento torçor de ruptura foi 5,3% menor que o momento torçor teórico obtido a partir do modelo do Eurocode 2. O desvio padrão foi de 0,078 kNm e o coeficiente de variação 8,27%.

Considerando-se todas as vigas reforçadas, o momento torçor teórico médio de ruptura foi 7,1% menor que o obtido experimentalmente, apresentando um desvio padrão de 0,071 kNm e um coeficiente de variação de 7,61%.

A comparação entre os resultados experimentais e teóricos mostra que o modelo da Treliça Espacial Generalizada adotado pelo Eurocode2 e consistente.

Contudo, faz-se necessário a realização de mais ensaios para um estudo mais conclusivo sobre a deformação específica no CFC, de modo a se estabelecer um valor máximo para esse parâmetro de modo a se atender à aderência completa entre o reforço e o substrato de concreto.

Tabela 8.11 – Comparação entre os resultados experimentais e os valores obtidos por intermédio do modelo do Eurocode 2.

Viga	T_{Rd1}	T_{RdrcT}	T_{RdrcL}	ΔTsd_{aft}	ΔTsd_{afl}	$T_{RdrcT} + \Delta Tsd_{aft}$	$T_{RdrcL} + \Delta Tsd_{afl}$	$T_u / T_{teó}$	
	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	
Ref	38,2	23,7	23,7	–	–	–	–	0,945	
Série VT	VT1	39,2	25,4	44,6	9,9	0	35,3	44,6	0,895
	VT2								0,847
	VT3								0,992
Série VTL	VTL1	39,2	27,3	41,5	5,3	5,0	32,7	46,5	0,859
	VTL2								1,009
	VTL3								0,972
Série VT								Média	0,911
								Desvio Padrão	0,074
								Coef. de Var. (%)	8,07
Série VTL								Média	0,947
								Desvio Padrão	0,078
								Coef. de Var. (%)	8,27
VT + VT								Média	0,929
								Desvio Padrão	0,071
								Coef. de Var. (%)	7,61

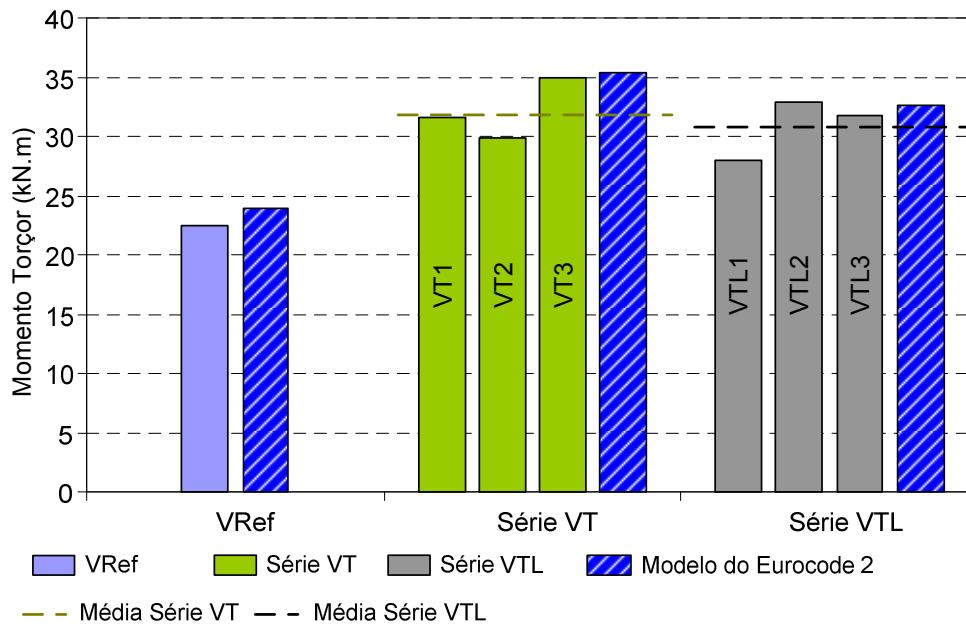


Figura 8.36 – Comparação entre os resultados experimentais e os valores obtidos por intermédio do modelo do Eurocode 2.

8.9.

Comparação entre os Valores Experimentais e os Valores Teóricos Obtidos com o Modelo da Trelça Espacial com Abrandamento de Tensões

O modelo de análise proposto mostrado no capítulo 6, apresentou resultados para os momentos torçores de ruptura e para os seus respectivos ângulos de torção por unidade de comprimento bem próximos à média dos valores experimentais. Esse modelo será denominado de forma abreviada por TEAT (Trelça Espacial com Abrandamento de Tensões).

8.9.1.

Momento Torçor de Ruptura

A Tabela 8.12 e a Figura 8.37 mostram os resultados experimentais para o momento torçor de ruptura e os respectivos valores teóricos obtidos com o modelo TEAT.

Tabela 8.12 – Comparação entre o momento torçor de ruptura experimental e o valor obtido por meio do modelo TEAT.

Viga	$T_{u,exp}$	$T_{u,teo}$	$T_u/T_{u,teo}$
	kNm	kNm	kNm
VRef	22,4	27,7	0,81
Série VT	VT1	31,6	1,03
	VT2	29,9	0,97
	VT3	35,0	1,14
Série VTL	VTL1	28,0	0,91
	VTL2	32,9	1,07
	VTL3	31,7	1,03
Série VT	Média		1,04
	Desvio Padrão		0,08
	Coef. de Var. (%)		8,07
Série VTL	Média		1,00
	Desvio Padrão		0,08
	Coef. de Var (%)		8,27
VT + VTL	Média		1,02
	Desvio Padrão		0,08
	Coef. de Var. (%)		7,65

Com os dados da Tabela 8.11 conclui-se que:

1. o momento torçor de ruptura da viga VRef foi 19% menor que o obtido a partir do modelo TEAT;
2. o momento torçor de ruptura da série VT foi em média 4% maior que o valor fornecido pelo modelo teórico de análise, com desvio padrão de 0,08 kNm e coeficiente de variação de 8,07%;
3. para a série VTL o valor médio do momento torçor de ruptura foi o mesmo que o fornecido pelo modelo de análise. O desvio padrão foi de 0,08 kNm e o coeficiente de variação foi de 8,27%;
4. considerando-se todas as vigas reforçadas, o momento torçor de ruptura experimental médio foi 2% maior que o fornecido pelo modelo TEAT. O desvio padrão foi de 0,08 kNm e o coeficiente de variação foi de 7,65%;

5. a análise estatística dos dados apresentados na Tabela 8.10 mostra que a relação entre valores experimentais e os valores fornecidos pelo modelo TEAT foram uniformes e bem próximos, tanto para as vigas da série VT quanto para as vigas da série VTL.

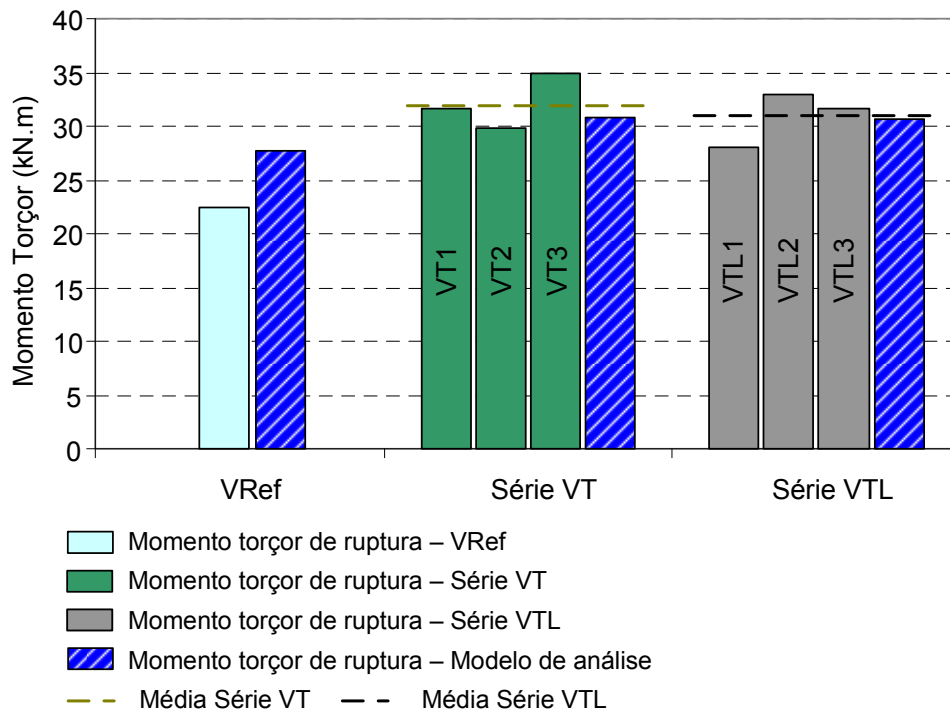


Figura 8.37 – Comparação entre o momento torçor de ruptura experimental e o valor obtido por meio do modelo TEAT.

8.9.2.

Ângulo de Torção por Unidade de Comprimento na Ruptura

Os valores dos ângulos de torção por unidade de comprimento, relativos à ruptura, fornecidos pelo modelo TEAT são mostrados na Tabela 8.13 e na Figura 8.38. A partir destes dados pode-se concluir que:

1. o ângulo de torção por unidade de comprimento θ_u , da viga de referência 12% menor que o valor fornecido pelo modelo de análise;
2. o ângulo de torção por unidade de comprimento θ_u , da série VT foi em média 5% menor que o valor fornecido pelo modelo de análise. O desvio padrão foi 0,17 ($^{\circ}/m$) e o coeficiente de variação 17,79%;
3. o ângulo de rotação por unidade de comprimento θ_u médio da série VTL foi 1 % maior que o valor fornecido pelo modelo de análise, com desvio padrão de 0,17 ($^{\circ}/m$) e coeficiente de variação 16,88%;

4. o ângulo de torção por unidade de comprimento θ_u médio, considerando-se todas as vigas reforçadas ensaiadas, foi 2% menor que o valor fornecido pelo modelo TEAT. O desvio padrão foi 0,15 (°/m) e o coeficiente de variação 15,81%;

O TEAT apresentou resultados consistentes e com boa dispersão em relação aos resultados experimentais. Recomenda-se a aplicação desse modelo a outros resultados experimentais de modo a aprimorá-lo.

Tabela 8.13 – Comparação entre o ângulo de torção por unidade de comprimento θ_u experimental e o valor obtido por meio do modelo TEAT.

Viga		$\theta_{u,exp}$	$\theta_{u,teo}$	$\theta_u / \theta_{u,teo}$
		(°/m)	(°/m)	(°/m)
VRef		2,29	2,603	0,88
Série VT	VT1	2,326	2,824	0,82
	VT2	2,494		0,88
	VT3	3,223		1,14
Série VTL	VTL1	2,392	2,83	0,85
	VTL2	3,352		1,18
	VTL3	2,811		0,99
Série VT	Média			0,95
	Desvio Padrão			0,17
	Coef. de Var. (%)			17,79
Série VTL	Média			1,01
	Desvio Padrão			0,17
	Coef. de Var. (%)			16,88
VT + VTL	Média			0,98
	Desvio Padrão			0,15
	Coef. de Var. (%)			15,81

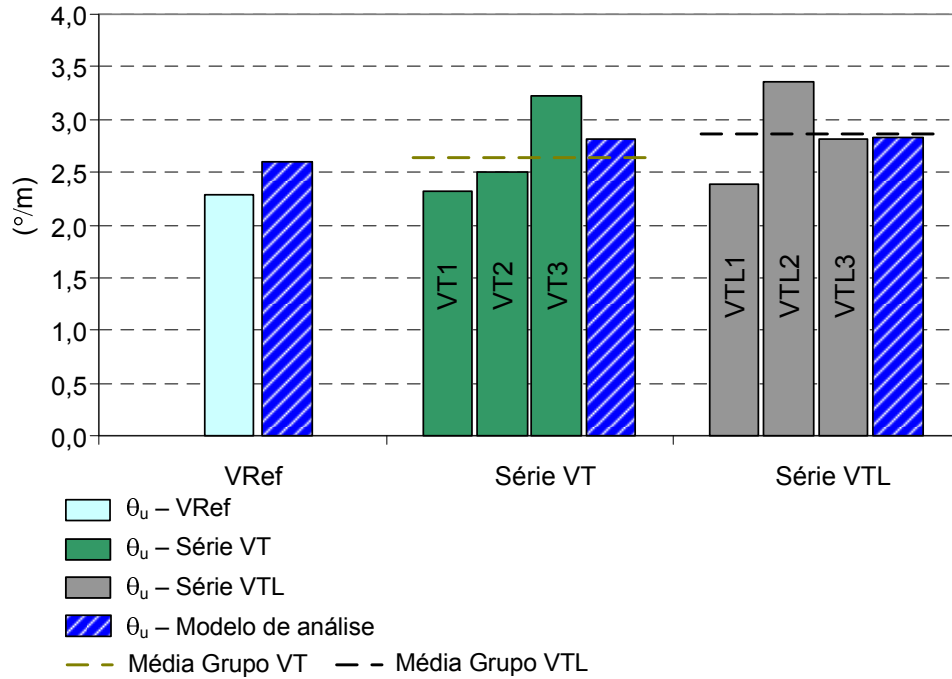


Figura 8.38 – Comparação entre o ângulo θ_u experimental e o valor obtido por meio do modelo TEAT.

8.9.3.

Curvas $T \times \theta$ Fornecidas pelo Modelo da Treliça Espacial com Abrandamento de Tensões

A curva fornecida pelo modelo TEAT para a viga VRef apresentou rigidez superior após a fissuração quando comparada com a curva experimental (Figuras 8.39).

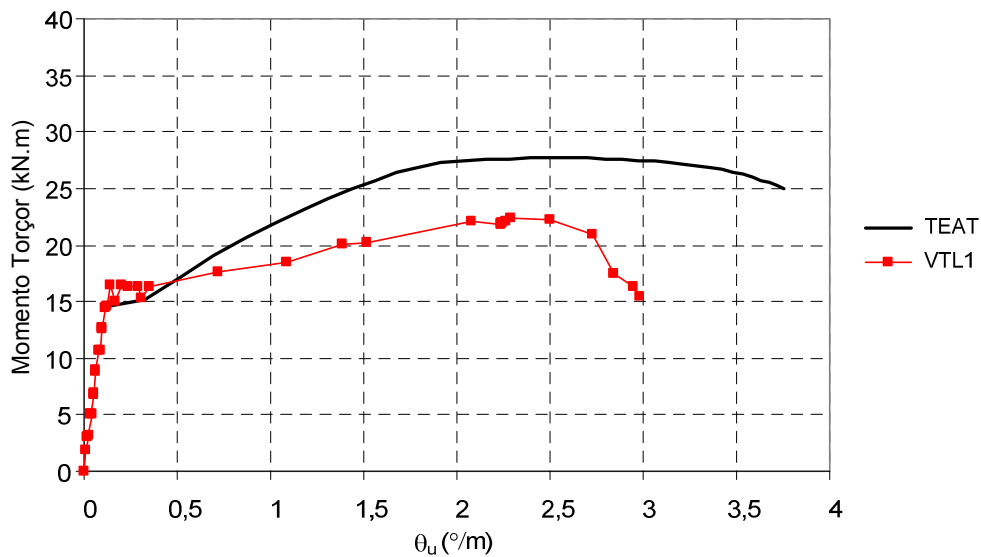


Figura 8.39 – Comparação entre as curvas $T \times \theta$ experimental e teórica da Viga VRef.

As curvas obtidas usando-se o TEAT baseado no modelo de Hsu (1993), apresentaram boa concordância quando comparadas com as curvas experimentais das vigas das séries VT e VTL (Figuras 8.40 e 8.41).

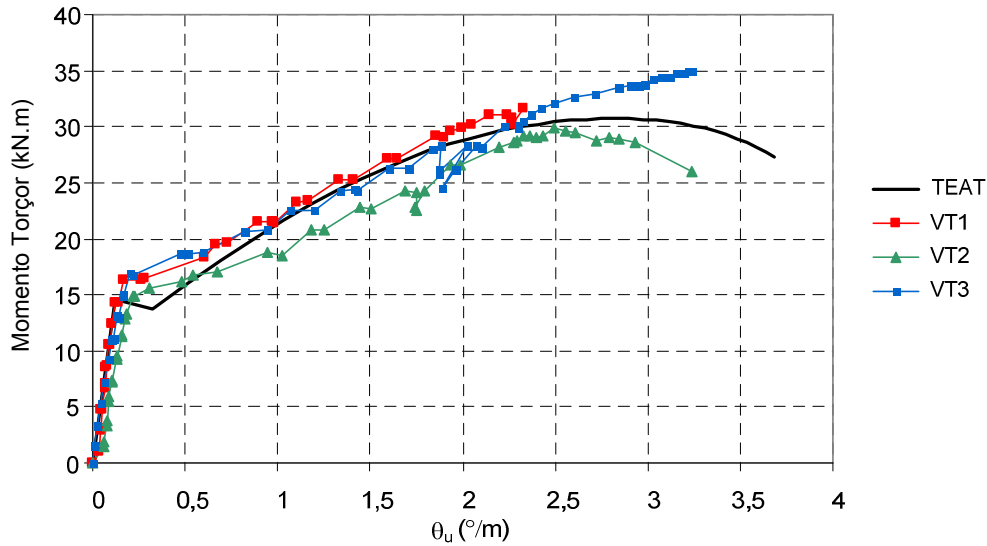


Figura 8.40 – Comparação entre as curvas $T \times \theta$ experimentais e teórica da série VT.

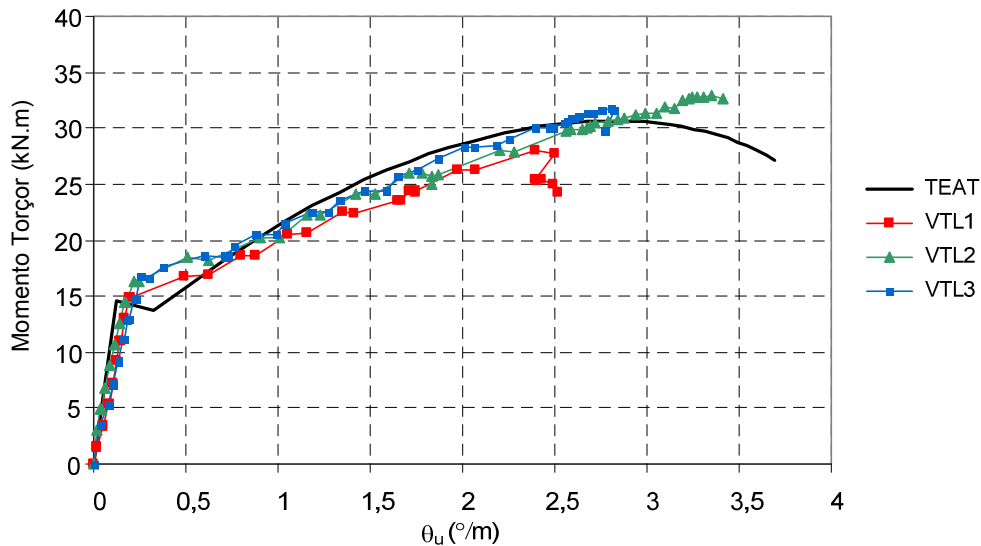


Figura 8.41 – Comparação entre as curvas $T \times \theta$ experimentais e teórica da série VTL.

A vinculação entre o TEAT e o modelo de aderência de Chen e Teng (2003) no processo iterativo indica que um aprimoramento dos dados de entrada no programa podem fornecer resultados mais precisos.