

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos nos ensaios de treze vigas de concreto submetidas à solicitação de torção pura, sendo quatro vigas de referência, sem reforço, e as demais reforçadas com CFC conforme descrito no Capítulo 4.

Os resultados experimentais foram comparados com resultados teóricos obtidos por meio do modelo apresentado no Capítulo 3.

Os valores das resistências do concreto e do CFC utilizados nas vigas foram apresentados e analisados no Capítulo 4.

### 5.2. Deformações Específicas

#### 5.2.1. Deformações Específicas nas Vigas de Referência

As Figuras 5.1 a 5.4 mostram a seção transversal  $S$  das vigas de referência. O eixo horizontal representa os valores das deformações específicas  $\epsilon_y$  lidas nos extensômetros elétricos de resistência colados nas faces laterais de maior dimensão da seção central das vigas ensaiadas, de acordo com as posições citadas no capítulo 4.

Observa-se nas faces superior e inferior de todas as vigas uma variação crescente das deformações específicas das bordas com relação ao seu centro. Na Figura 5.1 é possível constatar uma diminuição abrupta das medições dos EER na face superior da viga VR1.

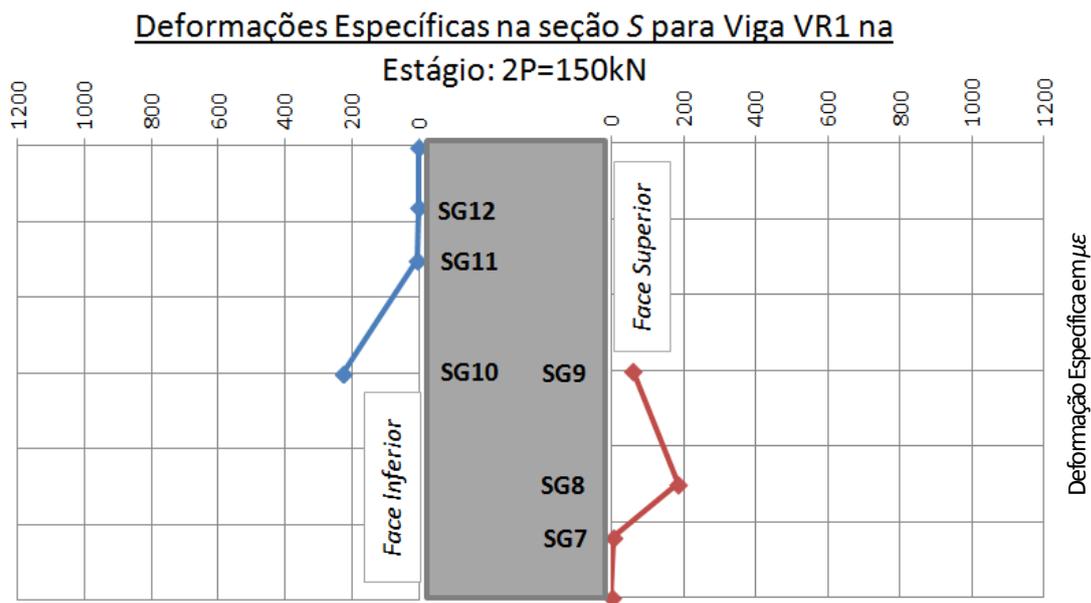


Figura 5.1 – Posições dos EER nas faces principais da viga VR1.

De modo análogo às medições da viga VR1 (Figura 5.1), verifica-se o mesmo comportamento das deformações específicas na face superior para a viga VR2 (Figura 5.2).

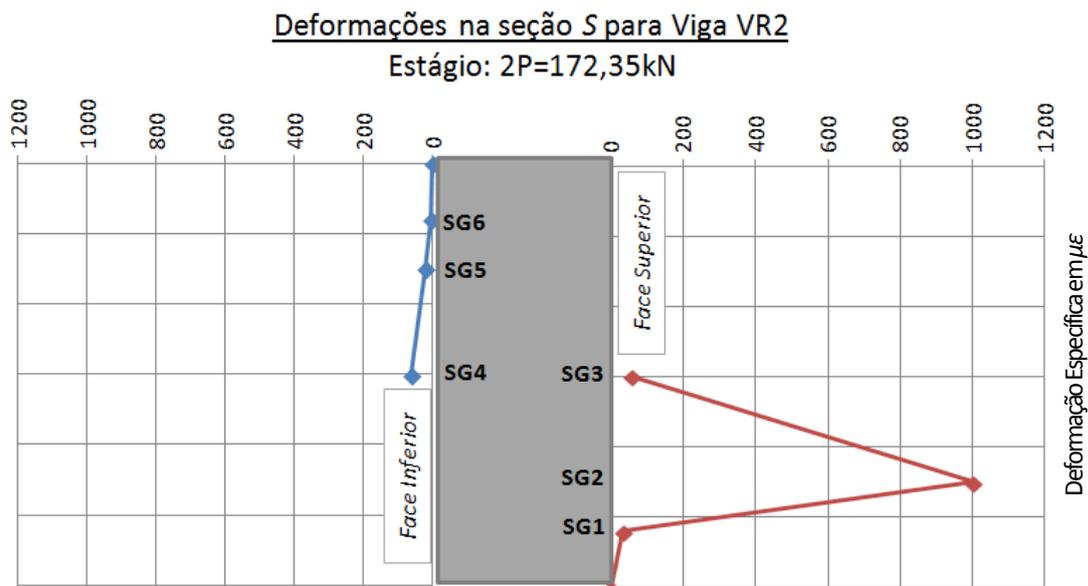


Figura 5.2 – Posições dos EER nas faces principais da viga VR2.

A Figura 5.3 mostra a variação das deformações específicas nas faces superior e inferior da viga VR3. Observa-se um crescimento com relação às bordas e uma diminuição na magnitude da deformação específica na seção central da face inferior, análogo ao comportamento das deformações específicas nas faces superiores das vigas VR1 e VR2.

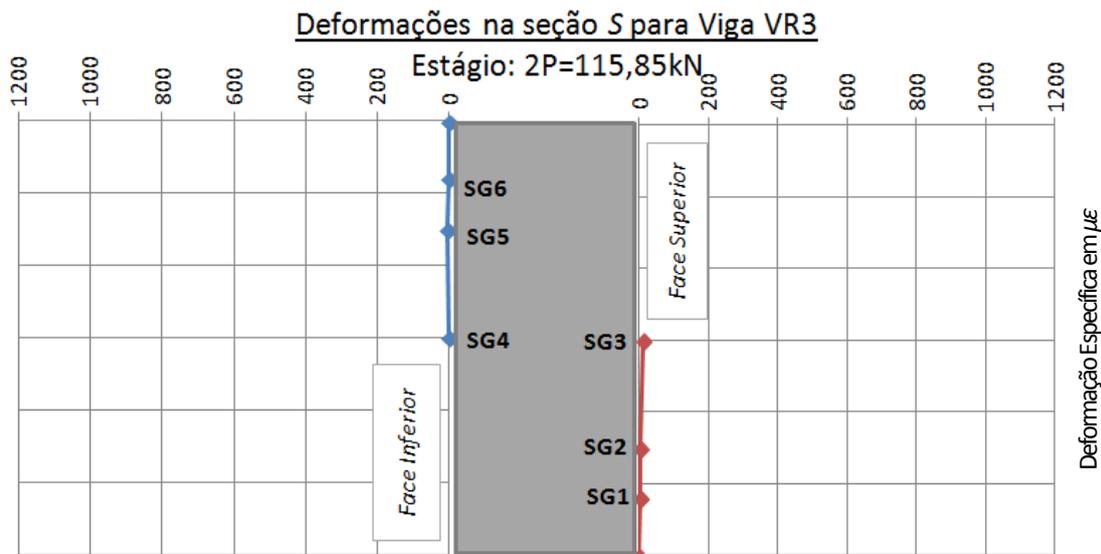


Figura 5.3 – Posições dos EER nas faces principais da viga VR3.

Observa-se na Figura 5.4 uma variação crescente das deformações específicas na superfície do concreto com relação à borda e o centro da viga VR4.

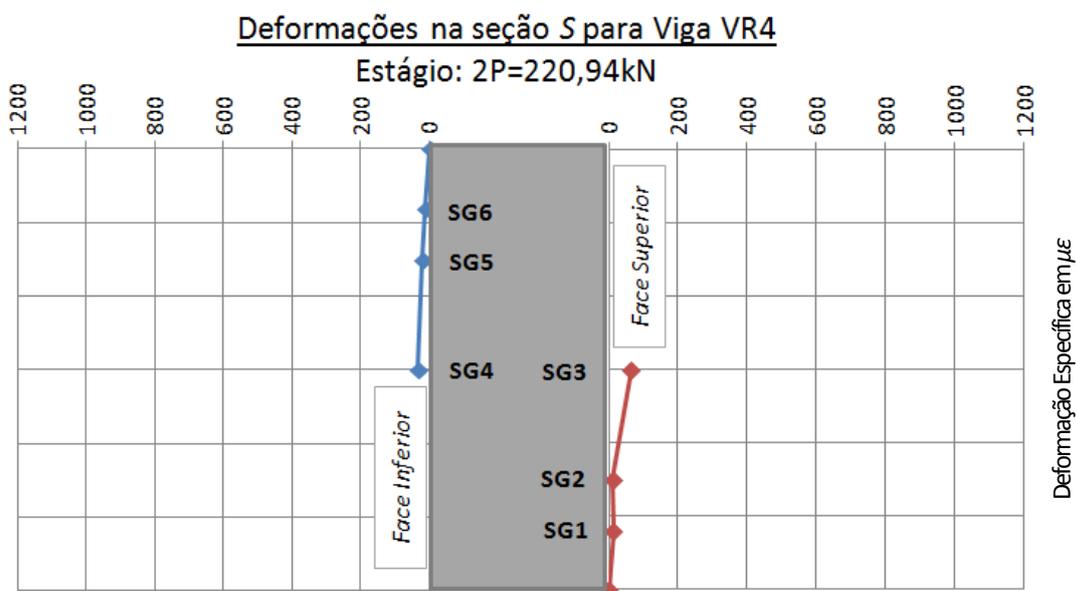


Figura 5.4 – Posições dos EER nas faces principais da viga VR4.

A Tabela 5.1 apresenta os valores das deformações específicas máximas observadas na ruptura das vigas de referência. Considerando-se que a região de observação era de concreto, a tensão cisalhante máxima na ruptura foi calculada pela lei de Hooke, considerando-se o módulo de elasticidade obtido experimentalmente como descrito no Capítulo 4.

Tabela 5.1 – Deformações específicas nas faces das vigas de referência.

SÉRIE DE REFERÊNCIA	VIGA	DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS MÁXIMAS NA RUPTURA	TENSÃO CISALHANTE MÁXIMA NA RUPTURA
		$\varepsilon_{m\acute{a}x}$ ( $\mu\varepsilon$ )	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)
	VR1	224	5,17
	VR2	1003	23,13
	VR3	10	0,23
	VR4	65	1,52

Verifica-se grande discrepância entre os resultados. A menor resistência da viga VR3 provavelmente foi causada por um problema de instabilidade apresentado durante o ensaio. A viga saiu da posição inicial e o ponto central de aplicação da carga ficou fora do centro do perfil metálico provocando a ruptura prematura.

### 5.2.2. Deformações Específicas nas Vigas Reforçadas

Este item apresenta os resultados dos ensaios das nove vigas reforçadas com CFC constituindo respectivamente as séries A, B e C, com taxa de reforço crescente.

#### 5.2.2.1. Deformações Específicas na Seção de Concreto ( $S_c$ )

As Figuras 5.5 a 5.7 mostram as deformações específicas  $\varepsilon_y$  lidas nos EER colados nas faces laterais de maior dimensão da seção central  $S_c$  das vigas da série reforçada com taxa A.

Observa-se uma variação crescente das deformações específicas das bordas com relação ao centro das vigas, nas faces superior e inferior, de forma semelhante ao comportamento apresentado pela viga VR4. A Figura 5.5 realça um aumento abrupto das medições dos EER na face superior da viga VRA-1.

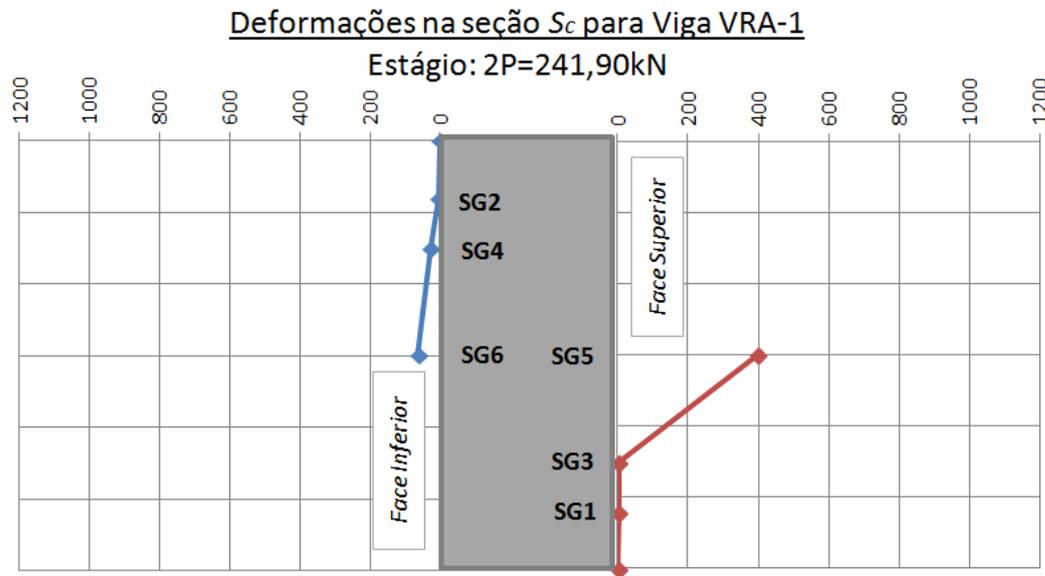


Figura 5.5 – Posições dos EER na seção  $S_c$  da viga VRA-1.

As deformações específicas medidas nas faces superior e inferior da viga VRA-2 (Figura 5.6) apresentam o mesmo comportamento observado na viga VRA-1.

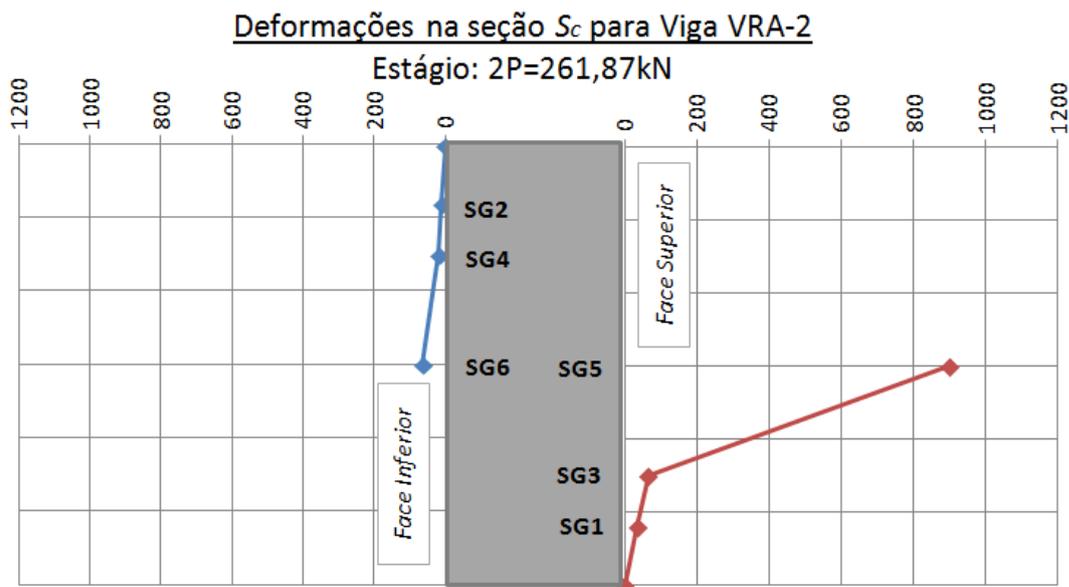


Figura 5.6 – Posições dos EER na seção  $S_c$  da viga VRA-2.

A Figura 5.7 mostra a variação das deformações específicas nas faces superior e inferior da viga VRA-3. Observa-se um acréscimo com relação às bordas, mas uma diminuição na magnitude da deformação específica na seção central da face inferior, análogo ao comportamento das vigas de referência VR1 e VR2 nas faces superiores e da viga VR3 na face inferior.

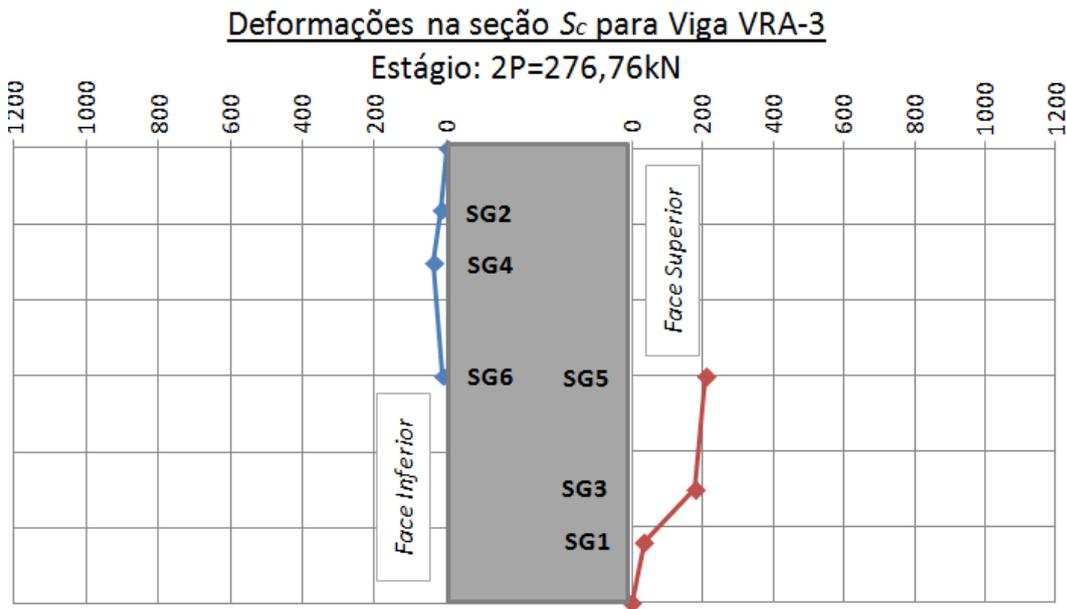


Figura 5.7 – Posições dos EER na seção  $S_c$  da viga VRA-3.

As Figuras 5.8 a 5.10 mostram as deformações específicas lidas nos EER colados nas faces laterais de maior dimensão da seção central  $S_c$  das vigas da série reforçada com taxa B.

De forma semelhante ao comportamento apresentado nas vigas da série RA observa-se uma variação crescente das deformações específicas das bordas com relação ao centro das vigas, nas faces superior e inferior. A Figura 5.10 registra um aumento abrupto das leituras nos EER na face inferior da viga VRB-3.

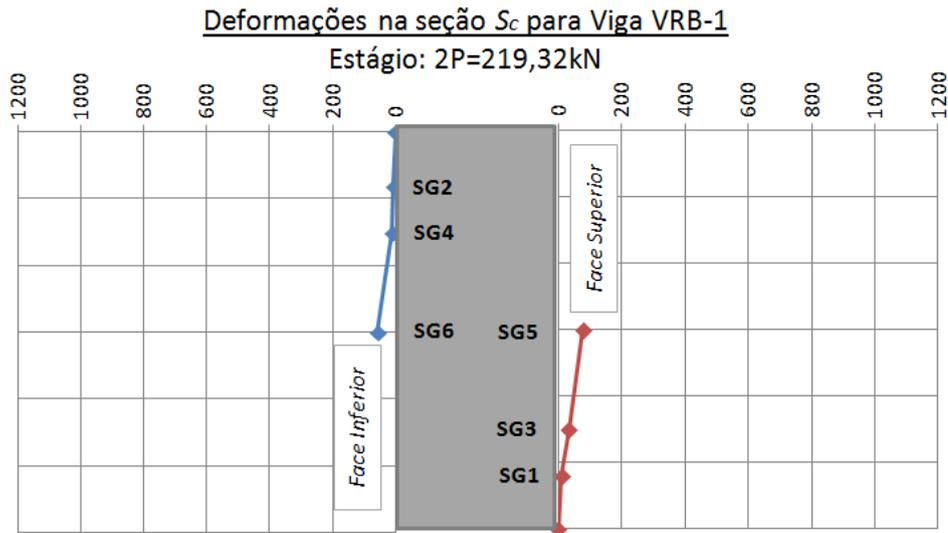


Figura 5.8 – Posições dos EER na seção  $S_c$  da viga VRB-1.

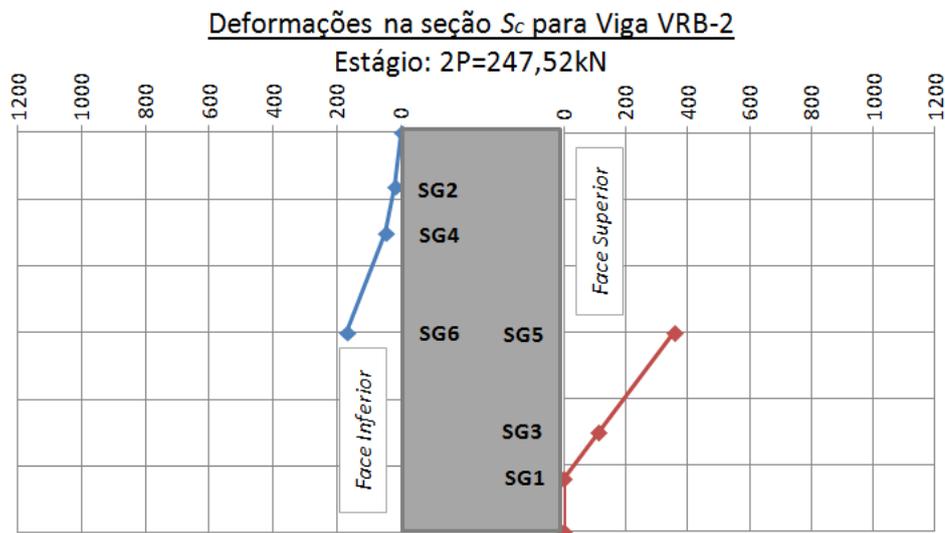


Figura 5.9 – Posições dos EER na seção  $S_c$  da viga VRB-2.

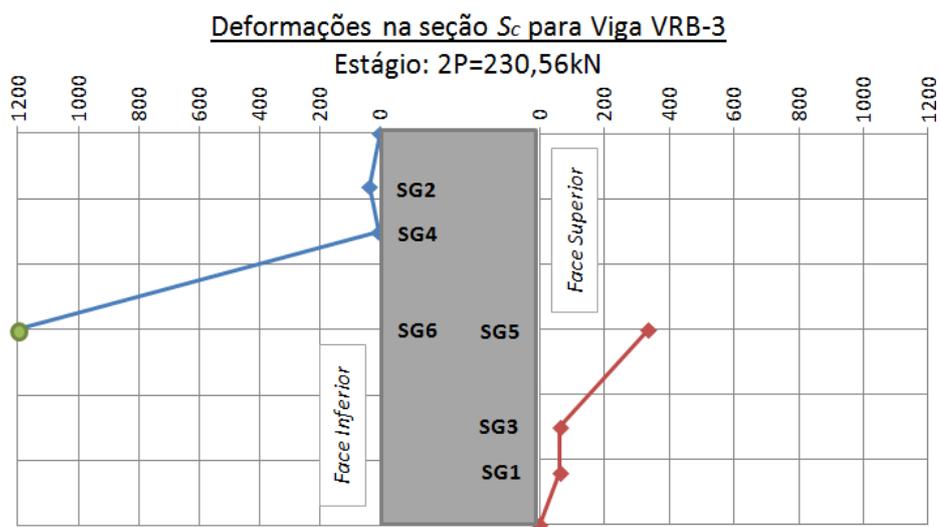


Figura 5.10 – Posições dos EER na seção  $S_c$  da viga VRB-3.

As Figuras 5.11 a 5.13 mostram as deformações específicas lidas nos EER colados nas faces laterais de maior dimensão da seção central de concreto das vigas da série C.

Como nos ensaios anteriores observa-se uma variação crescente das deformações específicas das bordas com relação ao centro das vigas nas faces superior e inferior. A Figura 5.11 realça um aumento abrupto das medições dos EER na face inferior da viga VRC-1.

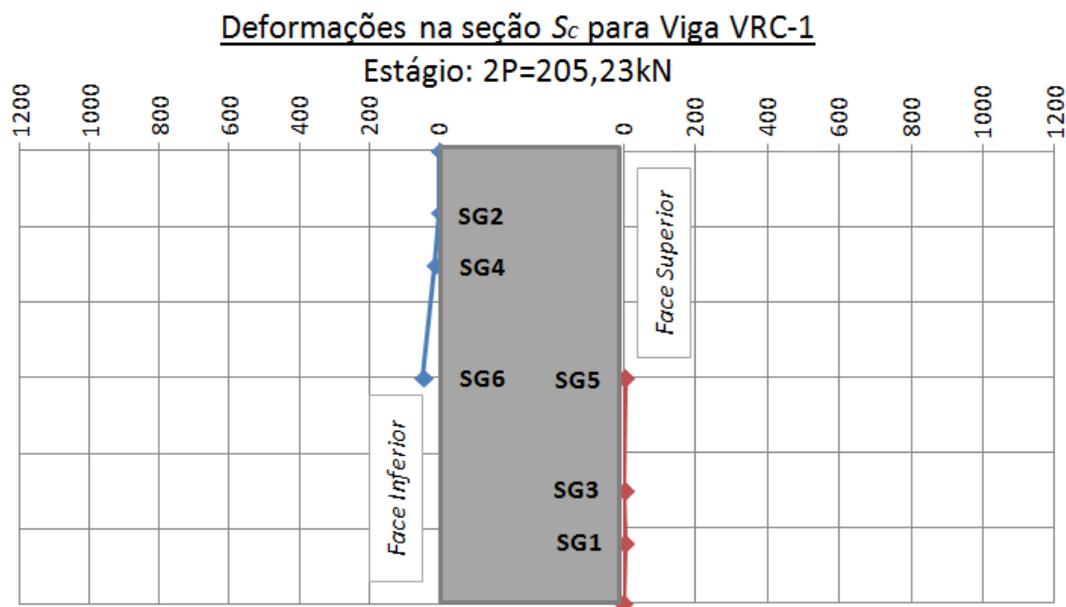


Figura 5.11 – Posições dos EER na seção  $S_c$  da viga VRC-1.

A Figura 5.12 mostra a variação das deformações específicas nas faces superior e inferior da viga VRC-2. Observa-se um crescimento dos valores da seção central com relação às bordas, mas uma diminuição seguida de pequeno crescimento na magnitude das deformações específicas nas faces superior e inferior.

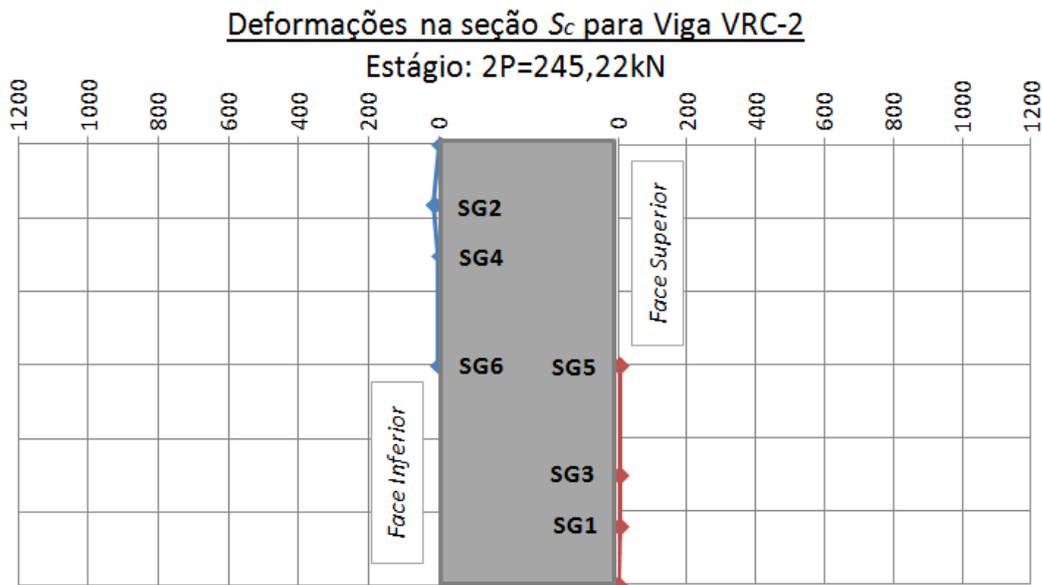


Figura 5.12 – Posições dos EER na seção  $S_c$  da viga VRC-2.

A Figura 5.13 mostra a variação das deformações específicas nas faces superior e inferior da viga VRC-3. Na face inferior observa-se um crescimento dos valores das deformações específicas das bordas com relação à seção central, análogo ao que ocorre em VRC-2. Na face superior observa-se uma diminuição abrupta da deformação específica na seção central com relação à seção intermediária, igualando o valor da deformação específica obtido na borda da viga.

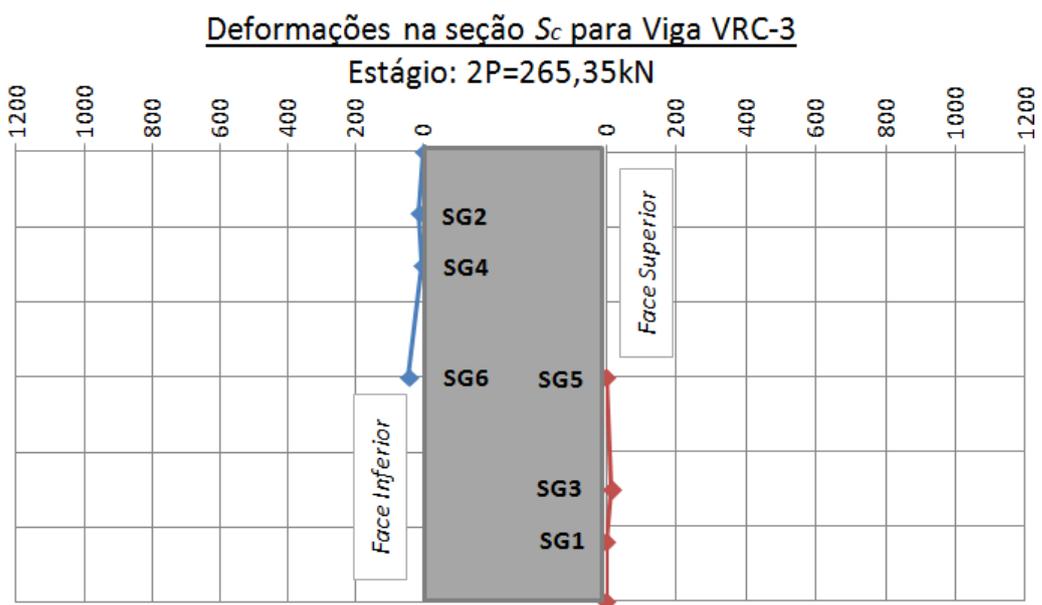


Figura 5.13 – Posições dos EER na seção  $S_c$  da viga VRC-3.

### 5.2.2.2. Deformações Específicas nas Seções com Reforço de CFC (Seções $S_{R1}$ e $S_{R2}$ )

As Figuras 5.14 a 5.31 mostram as leituras das deformações específicas obtidas por meio do EER colados sobre o reforço com CFC nas faces superior e inferior. Na viga VRA-1 foram colados EER nas faces superior, inferior e em uma das faces laterais para avaliação do comportamento das deformações. Nas demais vigas foram colados EER apenas nas faces de maior dimensão.

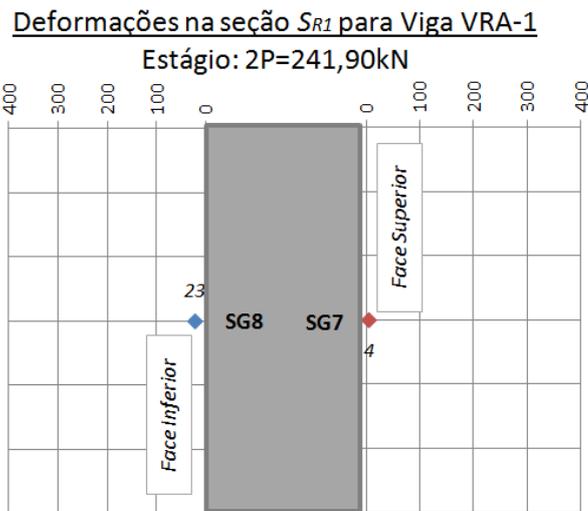


Figura 5.14 – Posições dos EER na seção  $S_{R1}$  da viga VRA-1.

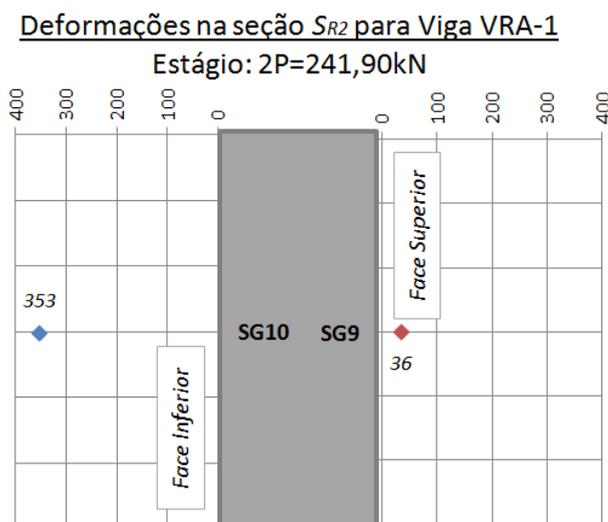


Figura 5.15 – Posições dos EER na seção  $S_{R2}$  da viga VRA-1.

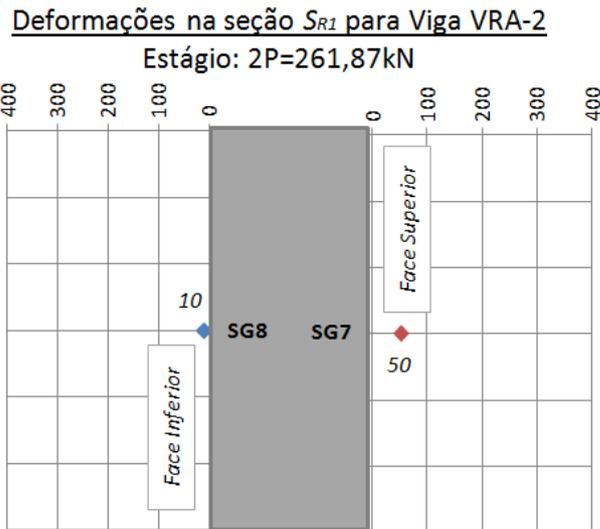


Figura 5.16 – Posições dos EER na seção  $S_{R1}$  da viga VRA-2.

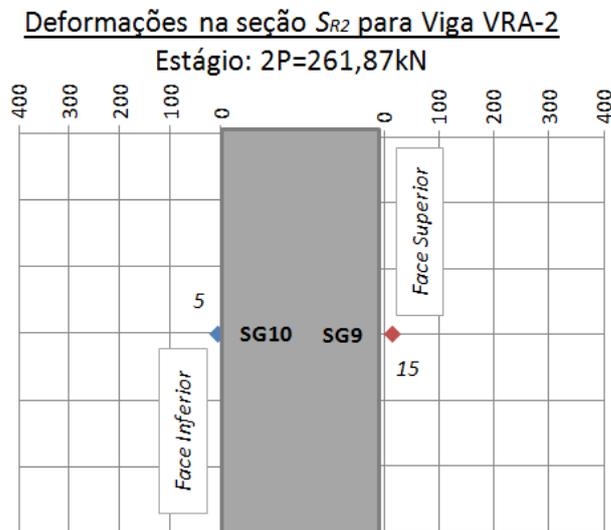


Figura 5.17 – Posições dos EER na seção  $S_{R2}$  da viga VRA-2.

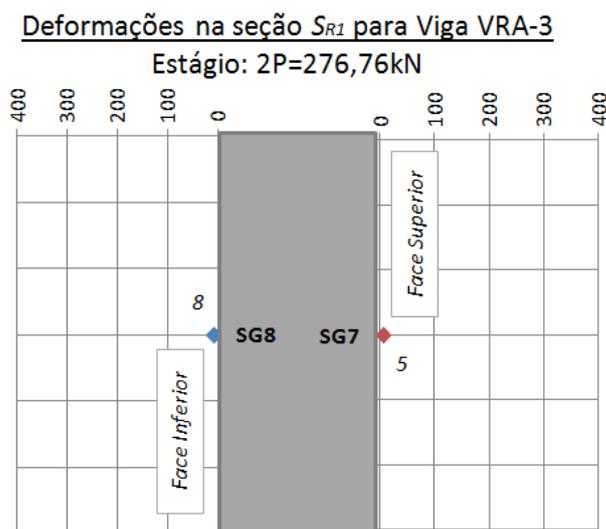


Figura 5.18 – Posições dos EER na seção  $S_{R1}$  da viga VRA-3.

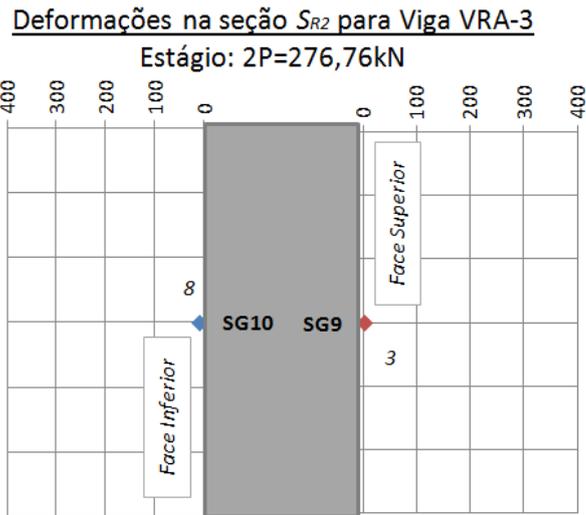


Figura 5.19 – Posições dos EER na seção  $S_{R2}$  da viga VRA-3.

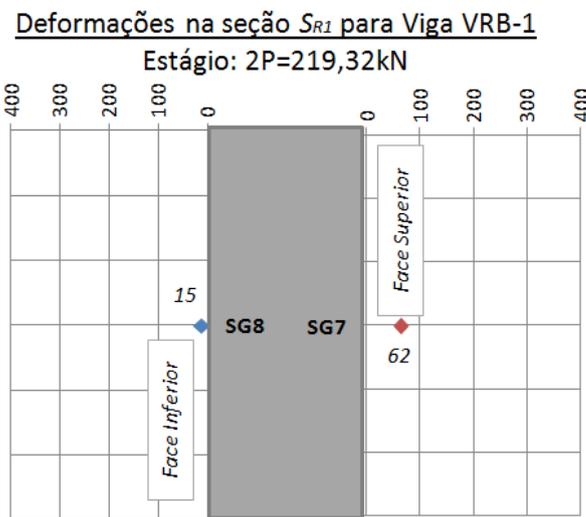


Figura 5.20 – Posições dos EER na seção  $S_{R1}$  da viga VRB-1.

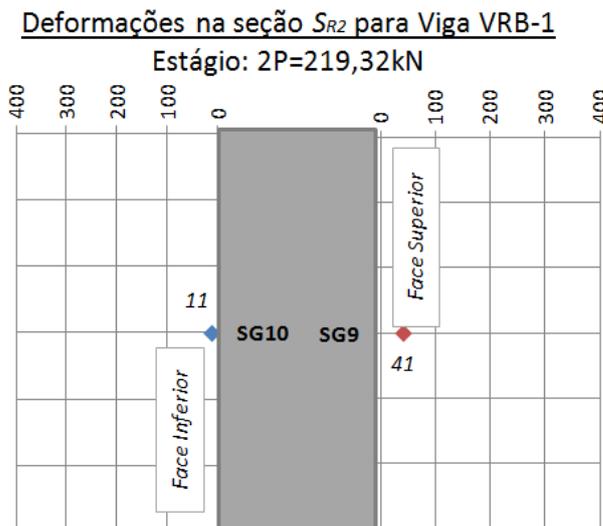


Figura 5.21 – Posições dos EER na seção  $S_{R2}$  da viga VRB-1.

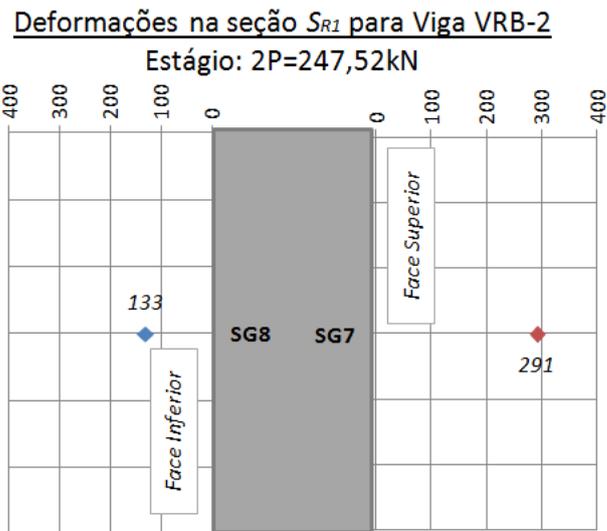


Figura 5.22 – Posições dos EER na seção  $S_{R1}$  da viga VRB-2.

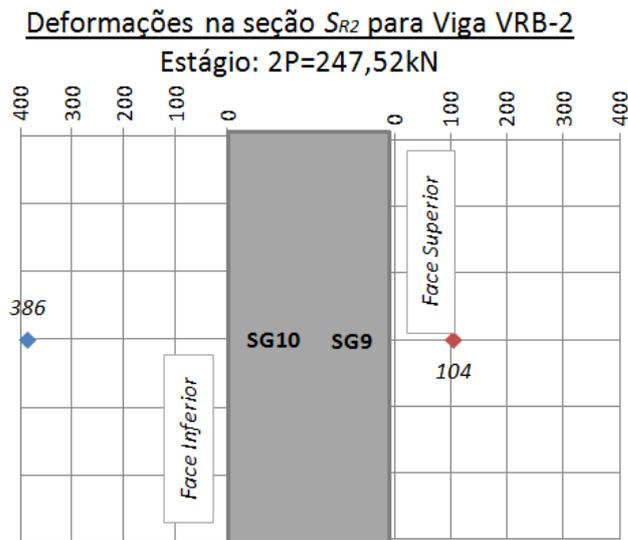


Figura 5.23 – Posições dos EER na seção  $S_{R2}$  da viga VRB-2.

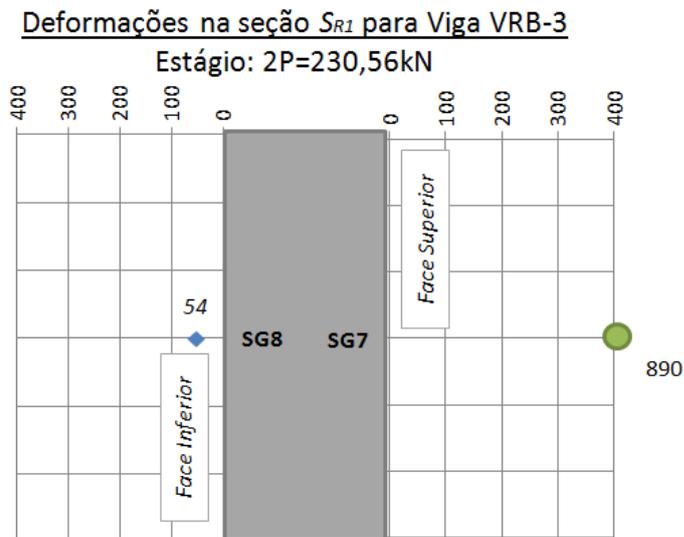


Figura 5.24 – Posições dos EER na seção  $S_{R1}$  da viga VRB-3.

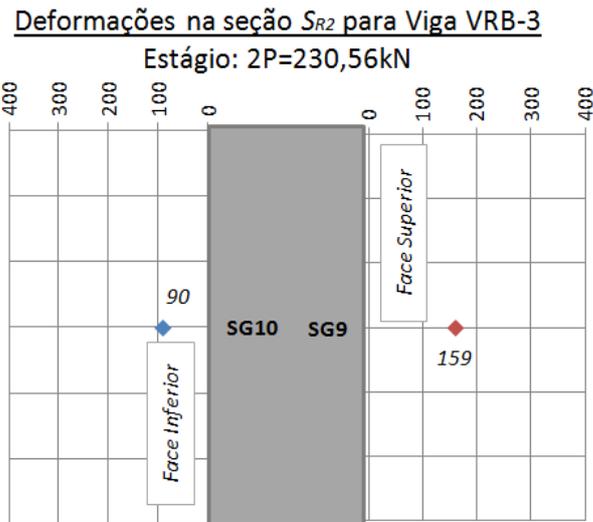


Figura 5.25 – Posições dos EER na seção  $S_{R2}$  da viga VRB-3.

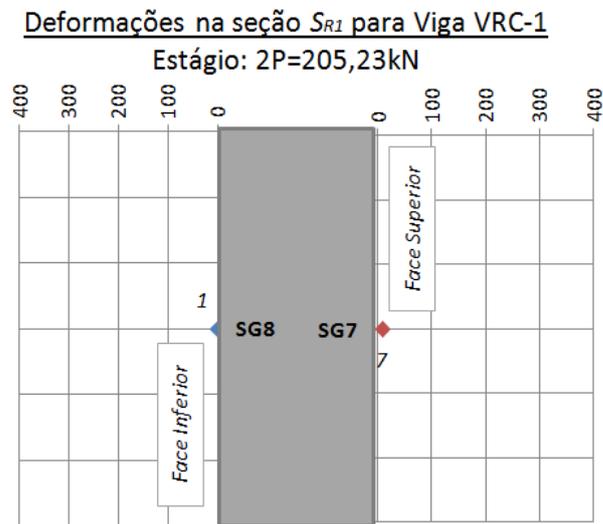


Figura 5.26 – Posições dos EER na seção  $S_{R1}$  da viga VRC-1.

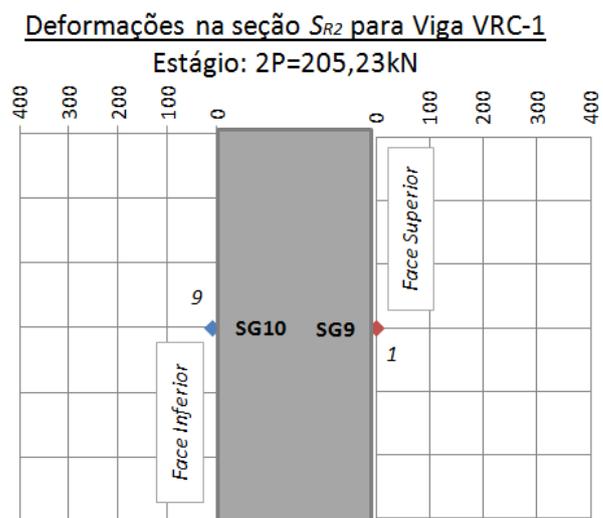


Figura 5.27 – Posições dos EER na seção  $S_{R2}$  da viga VRC-1.

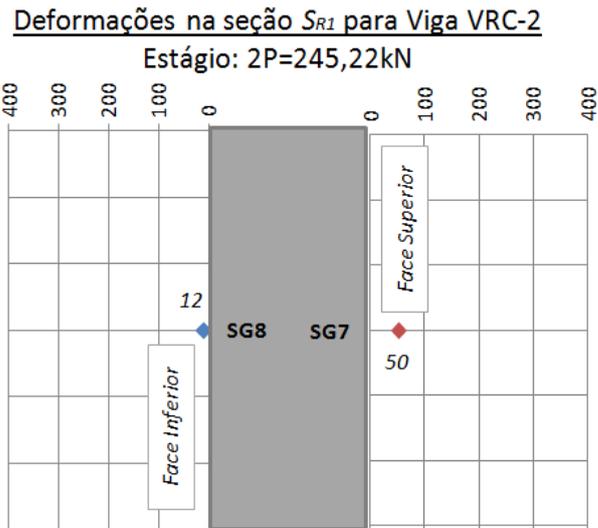


Figura 5.28 – Posições dos EER na seção  $S_{R1}$  da viga VRC-2.

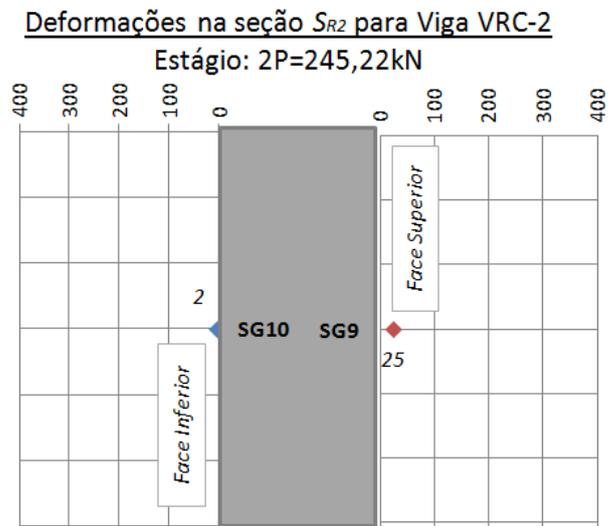


Figura 5.29 – Posições dos EER na seção  $S_{R2}$  da viga VRC-2.

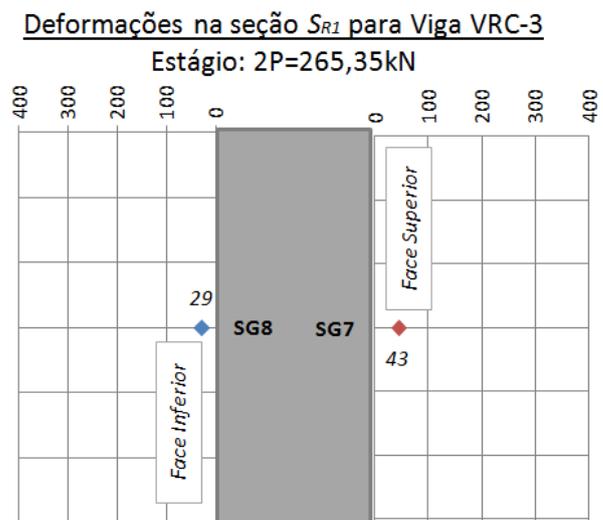


Figura 5.30 – Posições dos EER na seção  $S_{R1}$  da viga VRC-3.

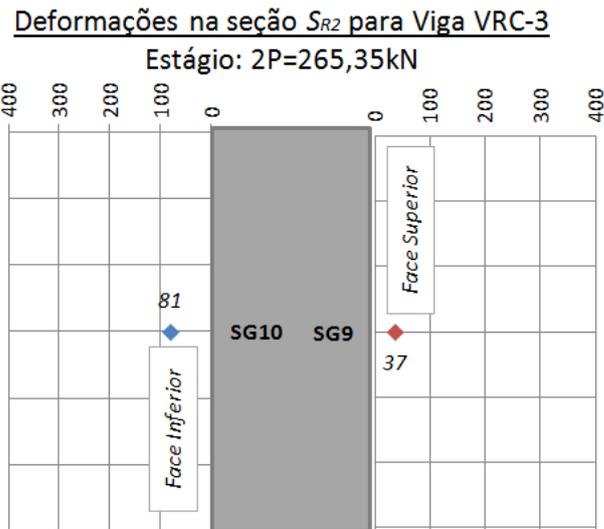


Figura 5.31 – Posições dos EER na seção **S<sub>R2</sub>** da viga VRC-3.

A Tabela 5.2 registra as deformações específicas máximas observadas no momento da ruptura das vigas reforçadas. A tensão máxima na ruptura, no trecho em estudo, foi calculada pela lei de Hooke, considerando-se os módulos de elasticidade obtidos experimentalmente como descrito no Capítulo 4. Os valores obtidos para as vigas VRA-2 e VRB-3 foram abandonados devido ao controle estatístico.

Tabela 5.2 – Deformações específicas nas faces das vigas reforçadas.

VIGA	DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS MÁXIMAS NA RUPTURA ( $\mu\epsilon$ )		TENSÃO DE TRAÇÃO MÁXIMA NA RUPTURA (MPa)		
	CONCRETO	CFC	CONCRETO	CFC	
TAXA A	MATERIAL	CONCRETO	CFC	CONCRETO	CFC
	VRA-1	396	353	9,13	97,88
	VRA-2				
	VRA-3	210	210	4,84	58,23
TAXA B	MATERIAL	CONCRETO	CFC	CONCRETO	CFC
	VRB-1	78	62	1,80	17,19
	VRB-2	357	386	8,23	107,03
	VRB-3				
TAXA C	MATERIAL	CONCRETO	CFC	CONCRETO	CFC
	VRC-1	46	28	1,06	7,76
	VRC-2	17	50	0,39	13,86
	VRC-3	44	81	1,01	22,46

### 5.3. Comportamento das Curvas $T \times \theta$

O comportamento das curvas de momento de torção *versus* ângulo de torção por unidade de comprimento para vigas de concreto é caracterizado por dois trechos:

1. um trecho elástico-linear, compreendido entre o início de carregamento e o início da fissuração, instante associado ao momento de torção de fissuração  $T_{CR}$  e o ângulo de torção por unidade de comprimento na fissuração  $\theta_{CR}$ ;
2. um trecho de menor rigidez, compreendido entre o início da fissuração e a ruptura do elemento estrutural, instante associado ao momento de torção de ruptura  $T_U$  e o ângulo de torção por unidade de comprimento na ruptura  $\theta_U$ .

A obtenção do ângulo de torção por unidade de comprimento baseou-se no conjunto de expressões desenvolvido por Silva Filho (2007) utilizando semelhança de triângulos. Como descrito no Capítulo 4, os transdutores foram colocados na face inferior das vigas, gerando a necessidade de corrigir a rotação devido à translação do ponto localizado no vão central (Figura 5.32).

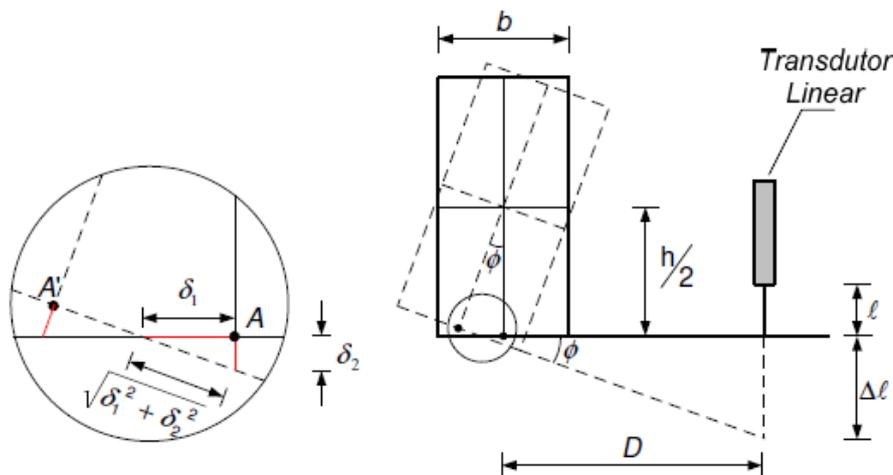


Figura 5.32 – Desenho esquemático da medição do transdutor linear durante a rotação (Holtz, 2007).

De Holtz (2007) tem-se:

$$\delta_1 = \frac{h}{2(4\Delta\ell + 4h)} \left[ -4D + 4(D^2 + \Delta\ell^2 + h\Delta\ell)^{1/2} \right] \quad (5.1)$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta\ell \delta_1}{D + \delta_1} \quad (5.2)$$

Por trigonometria:

$$\tan\phi = \frac{\delta_2}{\delta_1} \quad (5.3)$$

O ângulo de rotação por unidade de comprimento correspondente ao deslocamento  $\Delta\ell$  é:

$$\phi = \arctan\left(\frac{\delta_2}{\delta_1}\right) \quad (5.4)$$

Conforme esquema de ensaio, o ângulo de torção por unidade de comprimento é:

$$\theta_{x,y} = \frac{\phi_x + \phi_y}{L_{x,y}} \quad (5.5)$$

onde

$\theta_{x,y}$  – ângulo de torção por unidade de comprimento relativo aos transdutores

lineares  $x$  e  $y$ ;

$\phi_x / \phi_y$  – ângulos de rotação medidos pelos transdutores lineares  $x$  e  $y$

respectivamente;

$L_{x,y}$  – distância entre os transdutores lineares  $x$  e  $y$ .

As Figuras 5.33 a 5.47 mostram as curvas  $T \times \theta$  para as vigas de referência. Observa-se que todos os transdutores lineares apresentaram leituras próximas. Na Figura 5.33 observa-se que até se atingir o momento de torção de fissuração a viga praticamente não gira; após esse momento tem-se um comportamento quase linear até a ruptura. Observa-se essa tendência de comportamento em quase todas as vigas de referência, independente do par de transdutores utilizado, de modo que é possível identificar quatro estágios que serão destacados nos gráficos:

- 1) viga não fissurada;
- 2) fissuração;
- 3) trecho linear;
- 4) ruptura.

Nos gráficos observa-se uma consistência nos valores obtidos para os momentos de torção na fissuração e na ruptura. Os ângulos de torção por unidade de comprimento tanto na fissuração quanto na ruptura apresentam grande variabilidade.

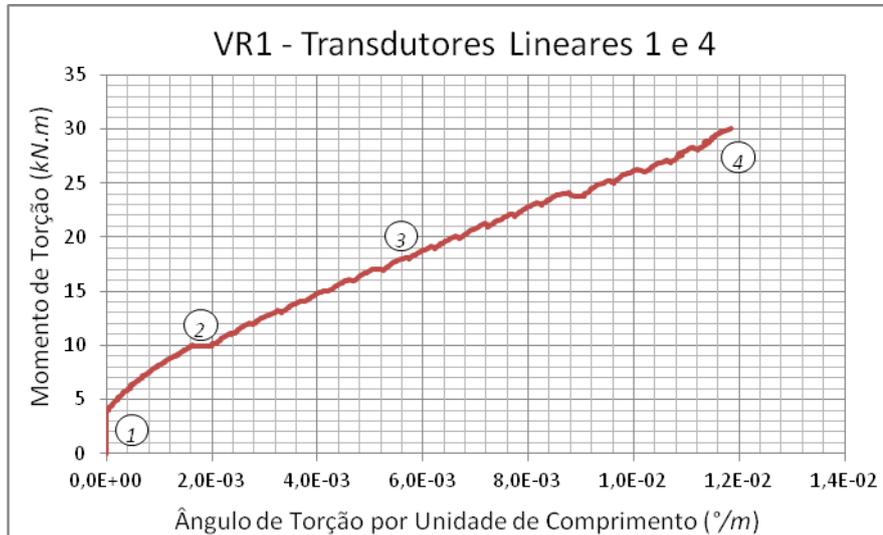


Figura 5.33 – Curva  $T \times \theta$  da Viga VR1 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.

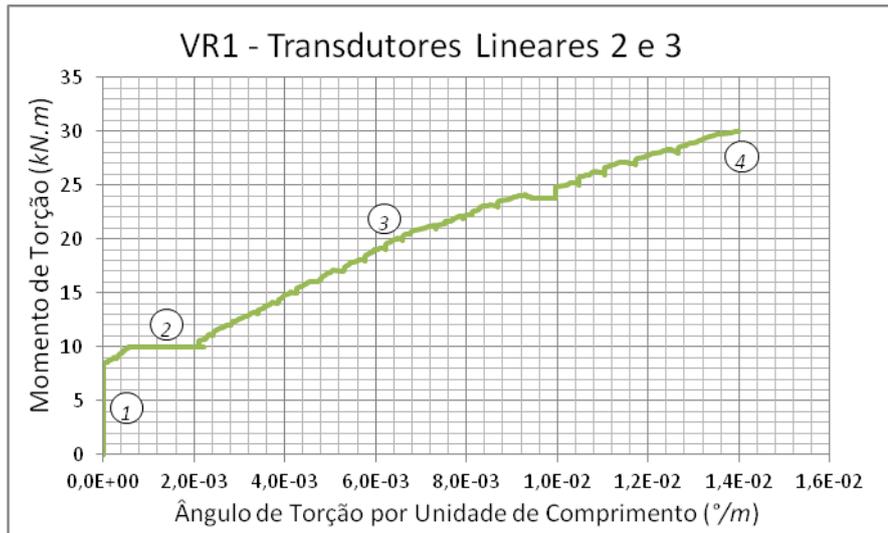


Figura 5.34 – Curva  $T \times \theta$  da Viga VR1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.

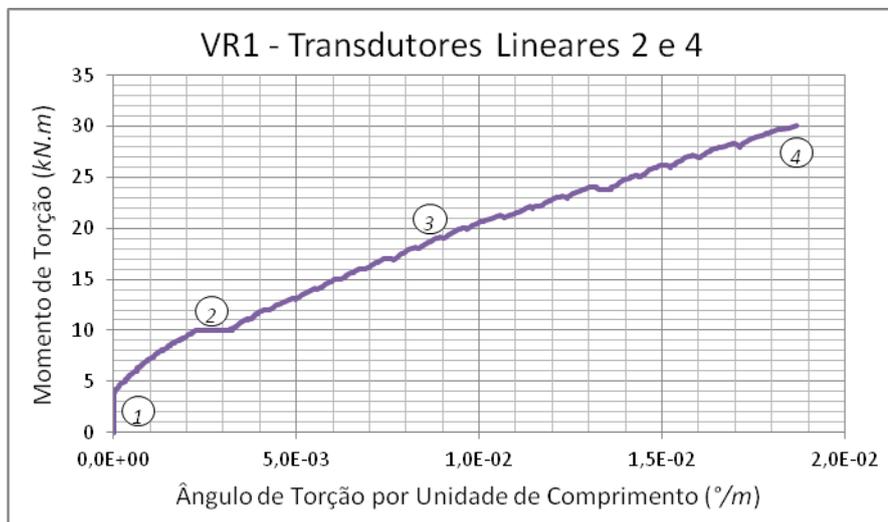


Figura 5.35 – Curva  $T \times \theta$  da Viga VR1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.

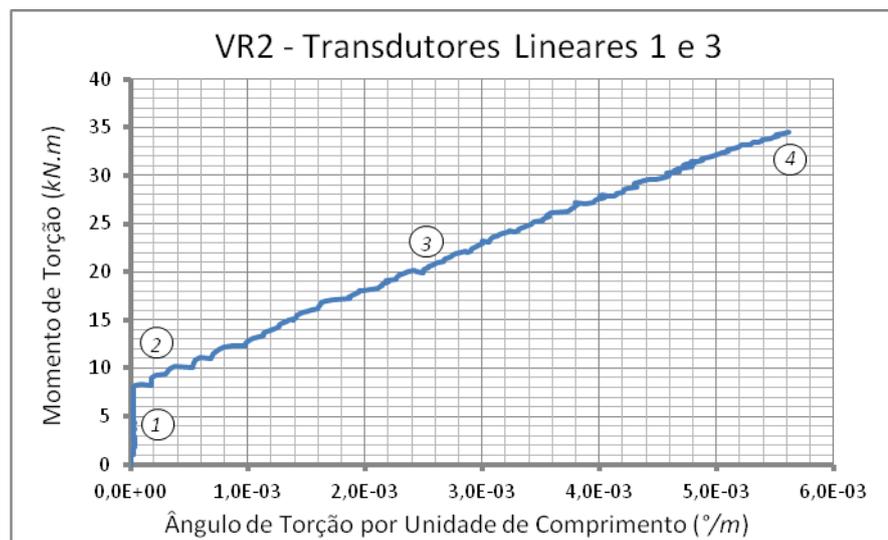


Figura 5.36 – Curva  $T \times \theta$  da Viga VR2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.

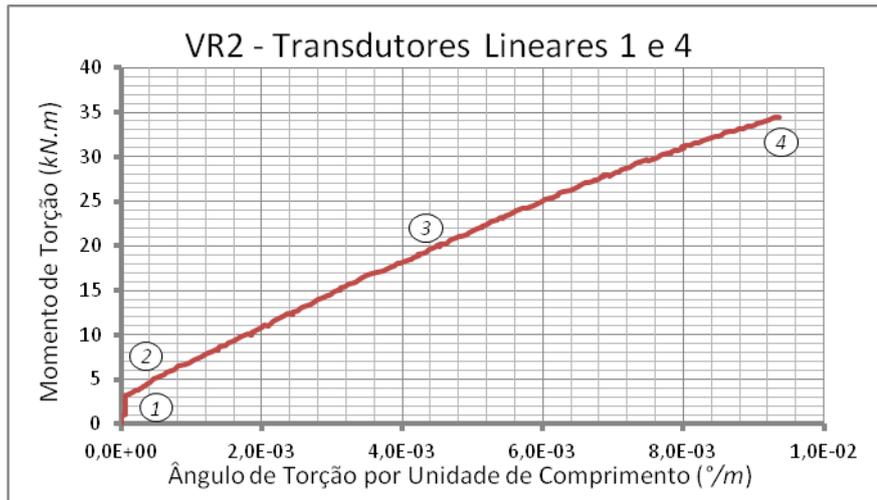


Figura 5.37 – Curva  $T \times \theta$  da Viga VR2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.

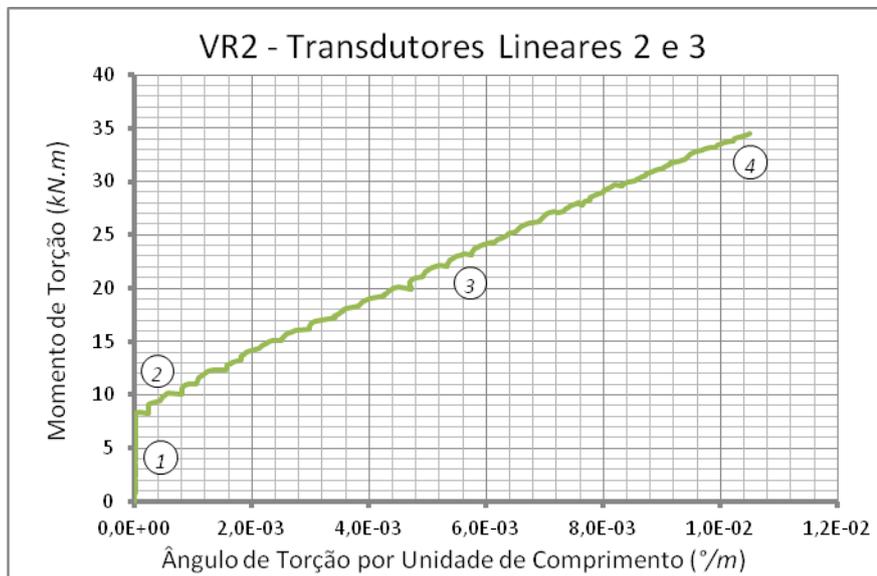


Figura 5.38 – Curva  $T \times \theta$  da Viga VR2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.

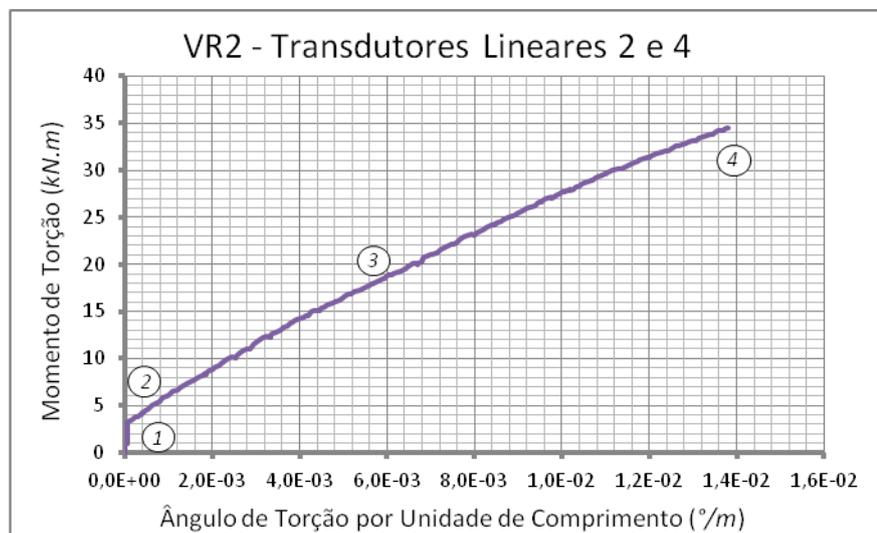


Figura 5.39 – Curva  $T \times \theta$  da Viga VR2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.

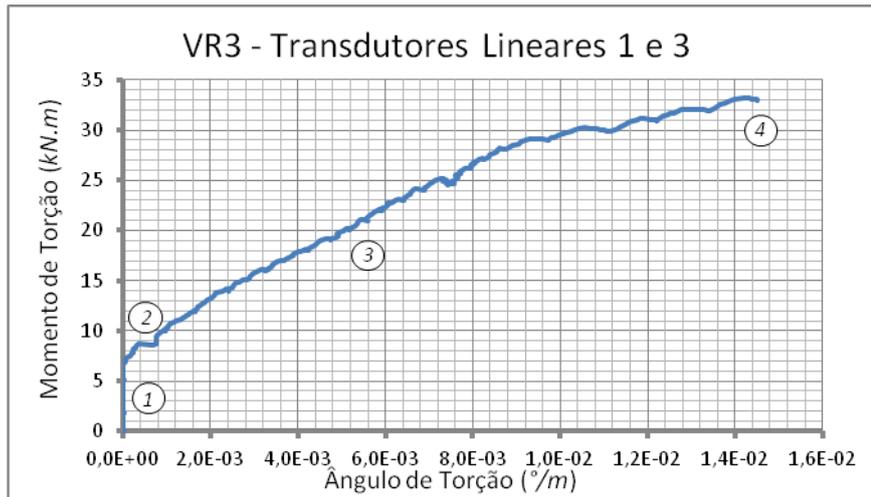


Figura 5.40 – Curva  $T \times \theta$  da Viga VR3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.

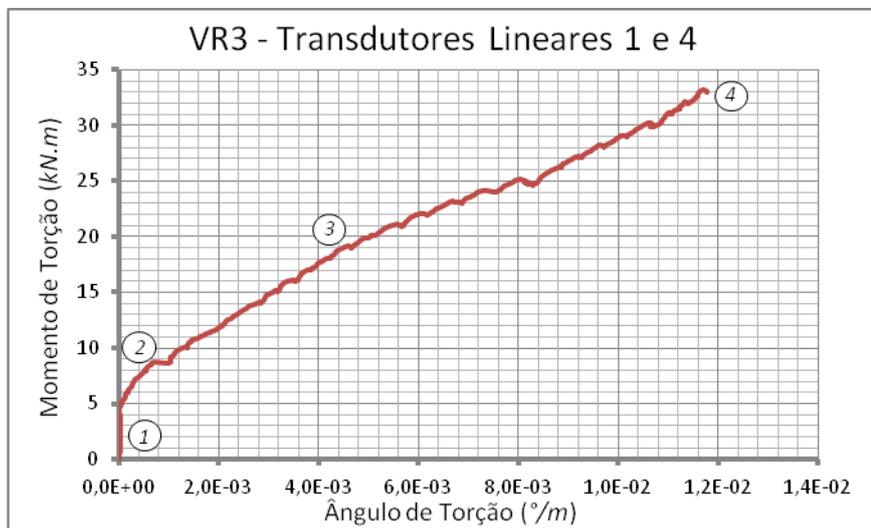


Figura 5.41 – Curva  $T \times \theta$  da Viga VR3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.

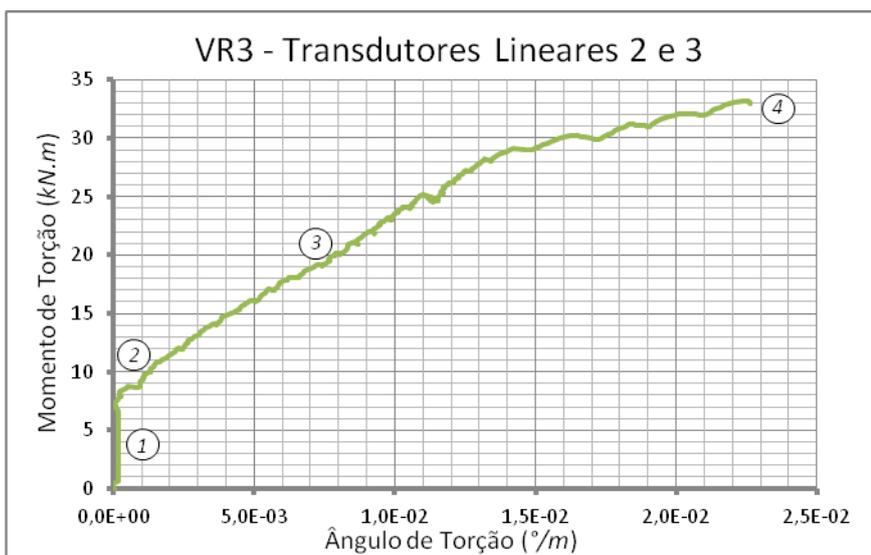


Figura 5.42 – Curva  $T \times \theta$  da Viga VR3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.

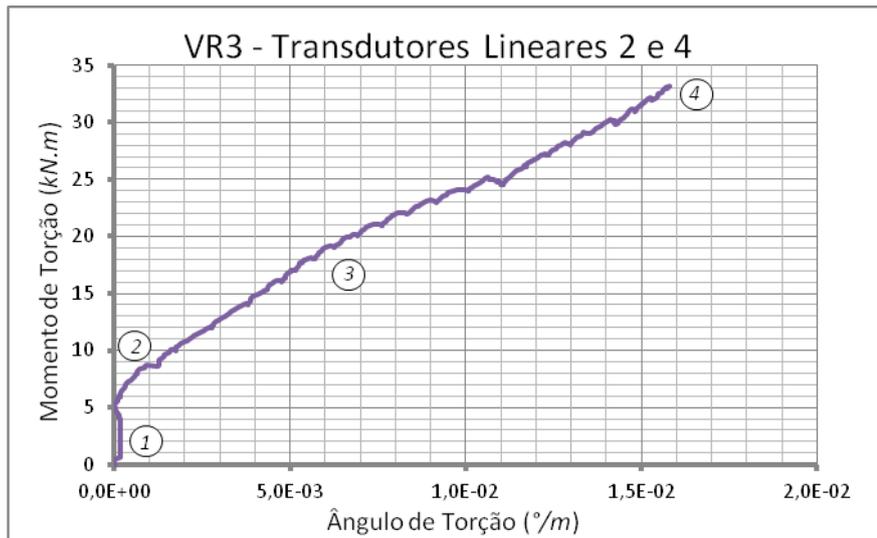


Figura 5.43 – Curva  $T \times \theta$  da Viga VR3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.

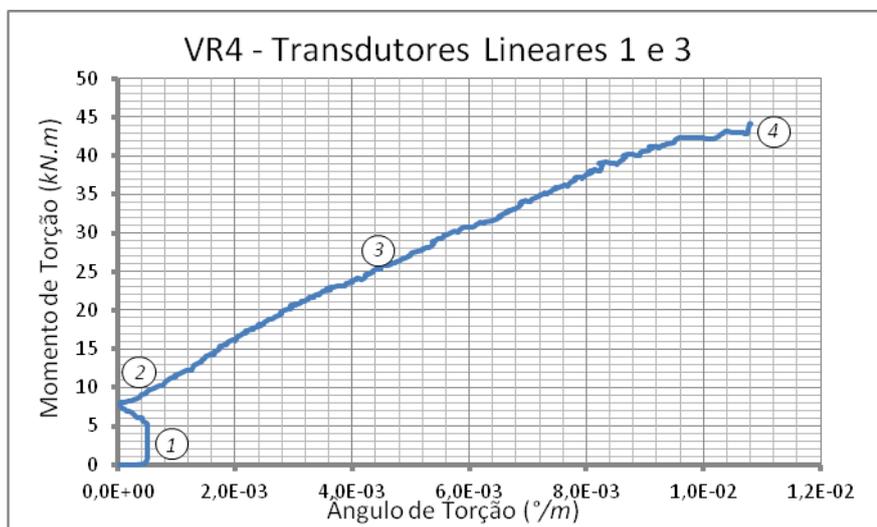


Figura 5.44 – Curva  $T \times \theta$  da Viga VR4 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.

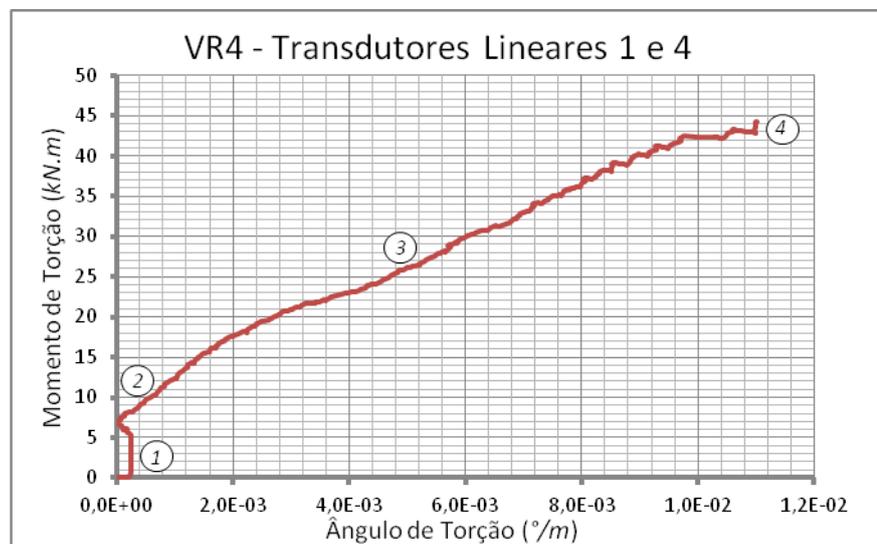


Figura 5.45 – Curva  $T \times \theta$  da Viga VR4 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.

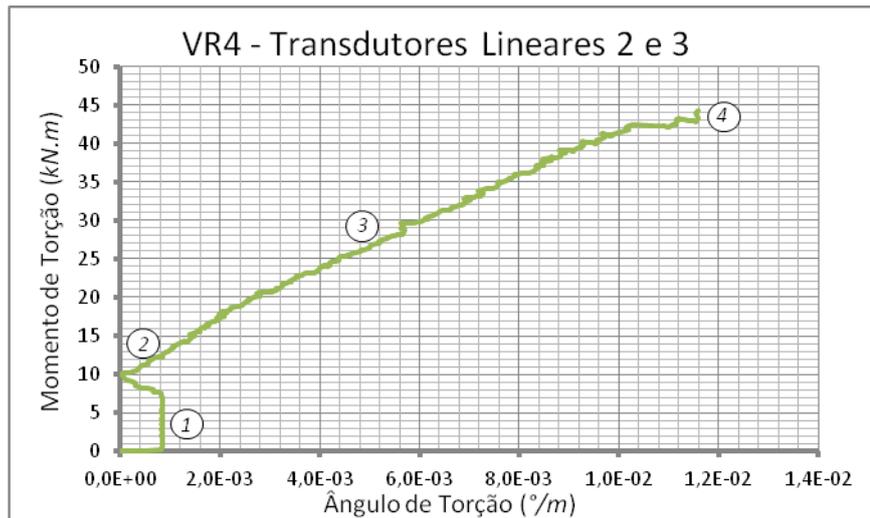


Figura 5.46 – Curva  $T \times \theta$  da Viga VR4 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.

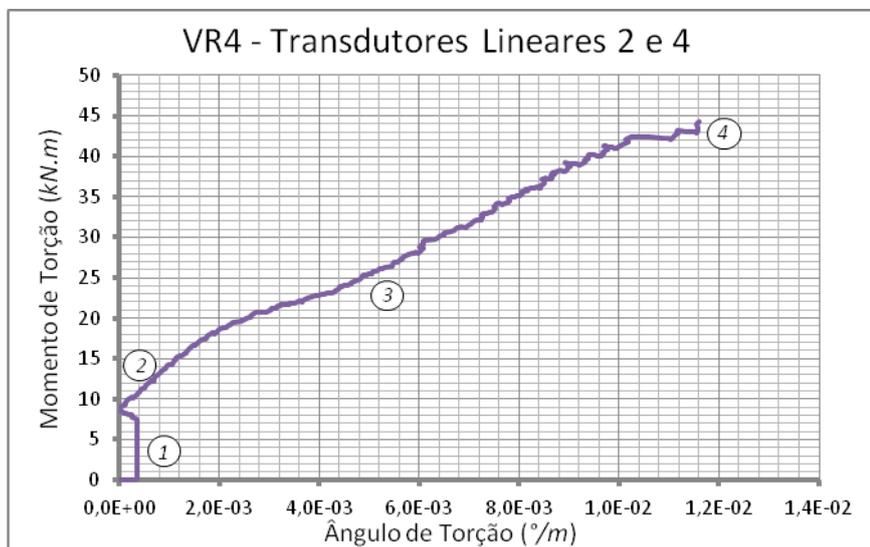


Figura 5.47 – Curva  $T \times \theta$  da Viga VR4 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.

As Tabelas 5.3 a 5.6 apresentam os valores obtidos das curvas  $T \times \theta$  das vigas de referência. Observa-se que os resultados relativos aos momentos de torção são mais consistentes, isto é, o coeficiente de variação é menor, somente a viga VR2 apresentou resultados inconsistentes para o momento de torção na fissuração. O mesmo não ocorre com o ângulo de torção por unidade de comprimento na fissuração e na ruptura, que apresentaram resultados consistentes apenas na ruptura da viga VR4.

Tabela 5.3 – Resumo dos valores de momento de torção para as vigas de referência na fissuração

VIGA	TCR (kN.m)						
	TRANSDUTORES				MÉDIA	D.P.	COV.
	1 e 3	1 e 4	2 e 3	2 e 4			
VR1	10,0	10,0	9,9	10,0	10,0	0,0	0,5%
VR2	8,0	3,1	8,1	3,1	5,6	2,9	51,5%
VR3	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	0,0	0,0%
VR4	7,6	8,7	9,8	9,1	8,9	0,9	10,3%
<i>Resumo da Série</i>					8,8	1,9	21,7%

Tabela 5.4 – Resumo dos valores ângulo de torção por unidade de comprimento para as vigas de referência na fissuração.

VIGA	$\theta_{CR}$ ( $^{\circ}/m$ )						
	TRANSDUTORES				MÉDIA	D.P.	COV.
	1 e 3	1 e 4	2 e 3	2 e 4			
VR1	3,6E-04	1,6E-03	6,5E-04	2,3E-03	1,1E-03	8,8E-04	78,0%
VR2	3,0E-05	6,4E-05	3,4E-06	5,2E-05	4,1E-05	2,7E-05	64,8%
VR3	3,5E-04	6,7E-04	4,8E-04	8,7E-04	5,7E-04	2,3E-04	39,6%
VR4	3,9E-05	5,9E-05	3,3E-05	1,3E-05	3,6E-05	1,9E-05	52,2%
<i>Resumo da Série</i>					3,1E-04	5,2E-04	169,5%

Tabela 5.5 – Resumo dos valores de momento de torção para as vigas de referência na ruptura.

VIGA	TU (kN.m)						
	TRANSDUTORES				MÉDIA	D.P.	COV.
	1 e 3	1 e 4	2 e 3	2 e 4			
VR1	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	0,0	0,0%
VR2	34,4	34,5	34,5	34,5	34,5	0,0	0,1%
VR3	33,2	33,2	33,2	33,2	33,2	0,0	0,0%
VR4	44,2	44,2	44,2	44,2	44,2	0,0	0,0%
<i>Resumo da Série</i>					33,8	6,1	18,0%

Tabela 5.6 – Resumo dos valores de ângulo de torção por unidade de comprimento para as vigas de referência na ruptura.

VIGA	$\theta_U$ ( $^{\circ}/m$ )						
	TRANSDUTORES				MÉDIA	D.P.	COV.
	1 e 3	1 e 4	2 e 3	2 e 4			
VR1	6,4E-03	1,2E-02	1,4E-02	1,9E-02	1,3E-02	5,1E-03	39,6%
VR2	5,6E-03	9,3E-03	1,0E-02	1,4E-02	9,9E-03	3,4E-03	34,1%
VR3	1,4E-02	1,2E-02	2,3E-02	1,6E-02	1,5E-02	4,6E-03	31,0%
VR4	1,1E-02	1,1E-02	1,2E-02	1,2E-02	1,1E-02	3,9E-04	3,5%
<i>Resumo da Série</i>					1,2E-02	2,2E-03	18,0%

As Figuras 5.48 a 5.59 mostram as curvas  $T \times \theta$  para as vigas reforçadas com taxa A. Análogo ao comportamento das vigas de referência, pode-se observar

que todos os pares de transdutores lineares apresentaram leituras próximas entre si para cada viga da série. Os valores dos momentos de torção na fissuração e na ruptura apresentaram-se igualmente consistentes, e os do ângulo de torção por unidade de comprimento apresentaram menor variabilidade.

A viga VRA-1 apresentou estágios de comportamento muito semelhantes aos das vigas de referência. Antes de fissurar ela praticamente não girou e após a fissuração a rigidez permaneceu quase constante até a ruptura com trecho aproximadamente linear. A viga VRA-2 apresentou perturbações mesmo antes da fissuração, o instante de fissuração não ficou bem definido, e existem múltiplos trechos aproximadamente lineares, que experimentalmente seriam justificados pelo aparecimento de pequenas fissuras que reduzem progressivamente a rigidez até a ruptura da viga. A viga VRA-3 apresenta o gráfico semelhante ao da VRA-2, mas com menos perturbações. Visando melhor identificação desses estágios, a nomenclatura utilizada para as vigas de referência é extrapolada para as vigas da série RA, quando possível.

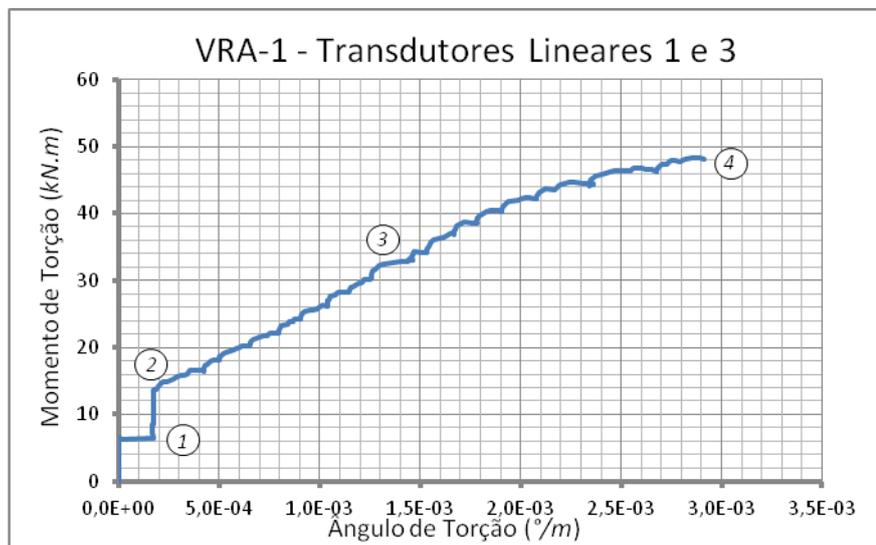


Figura 5.48 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRA-1 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.

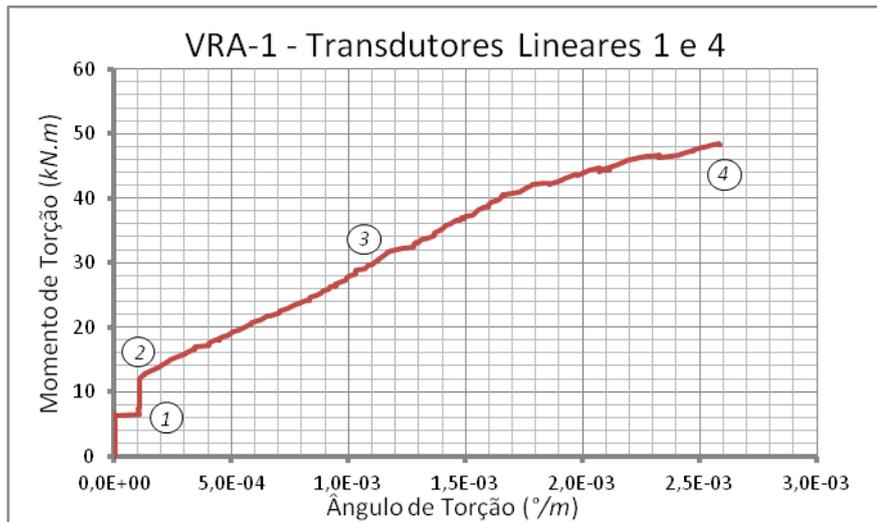


Figura 5.49 – Curva T x θ da Viga VRA-1 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.

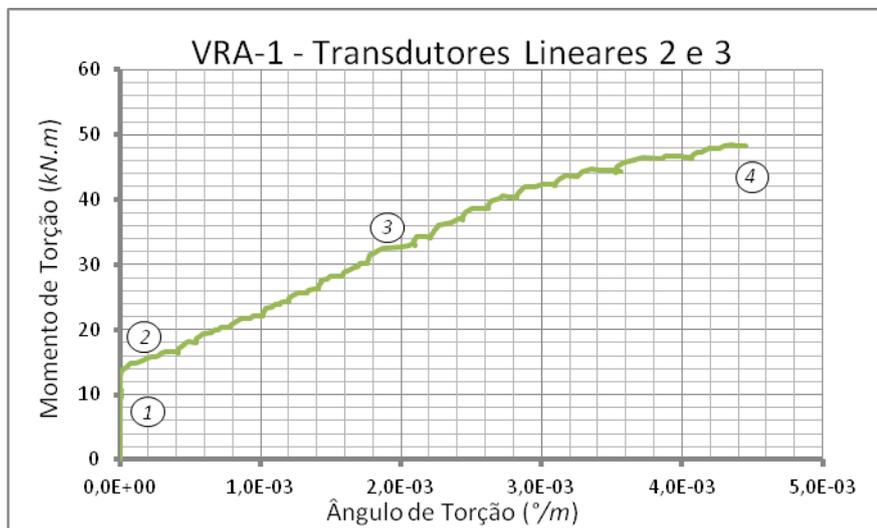


Figura 5.50 – Curva T x θ da Viga VRA-1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.

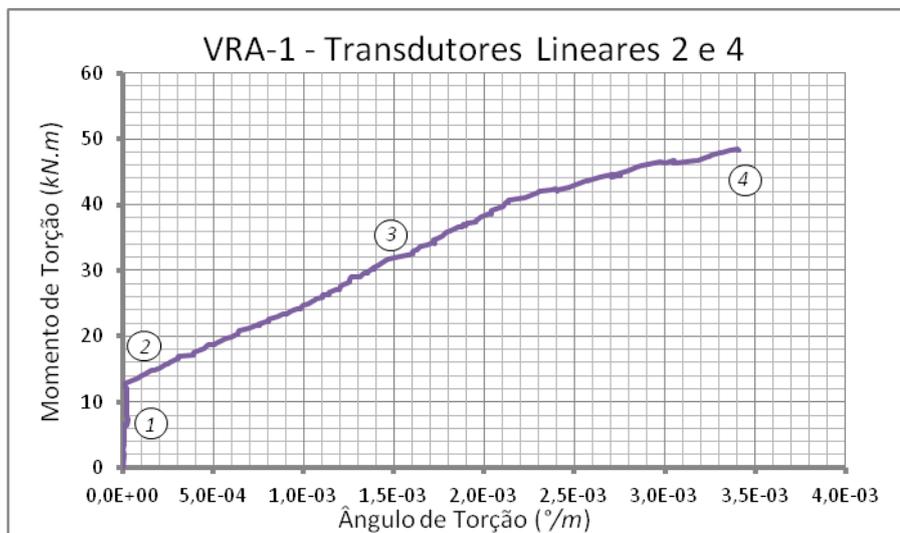


Figura 5.51 – Curva T x θ da Viga VRA-1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.

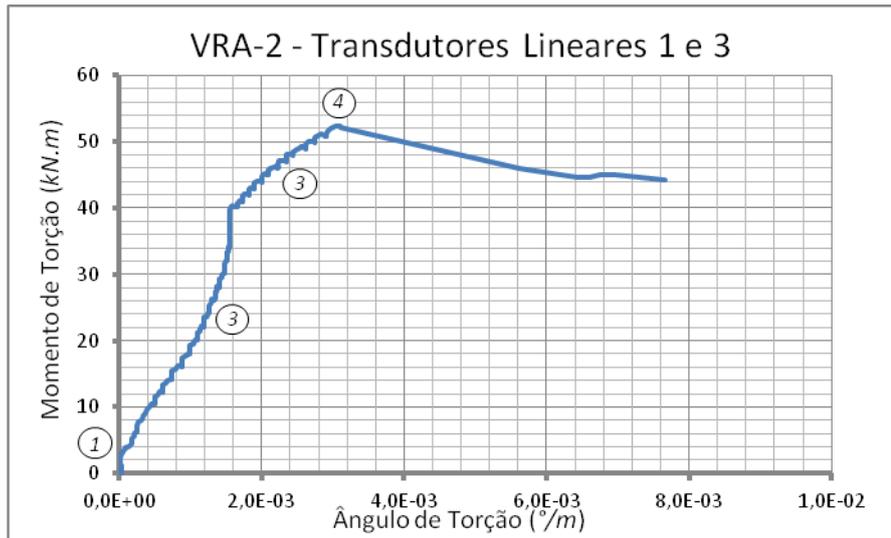


Figura 5.52 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRA-2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.

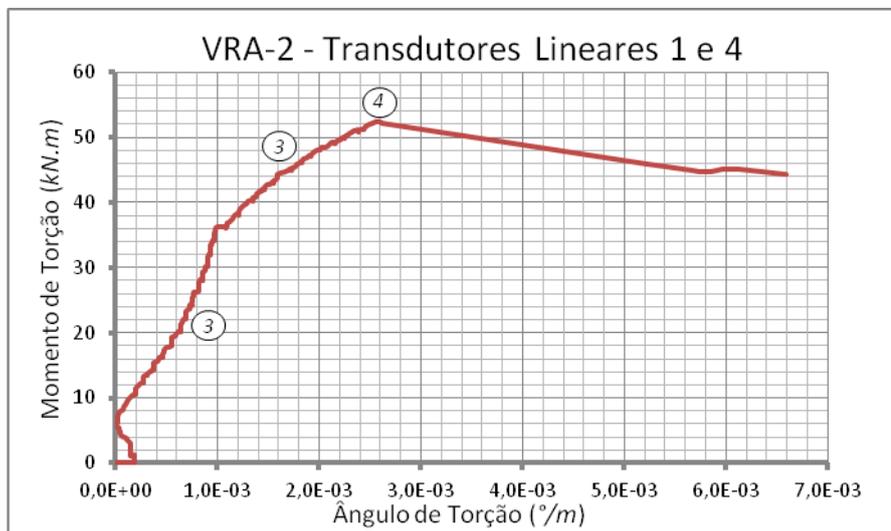


Figura 5.53 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRA-2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.

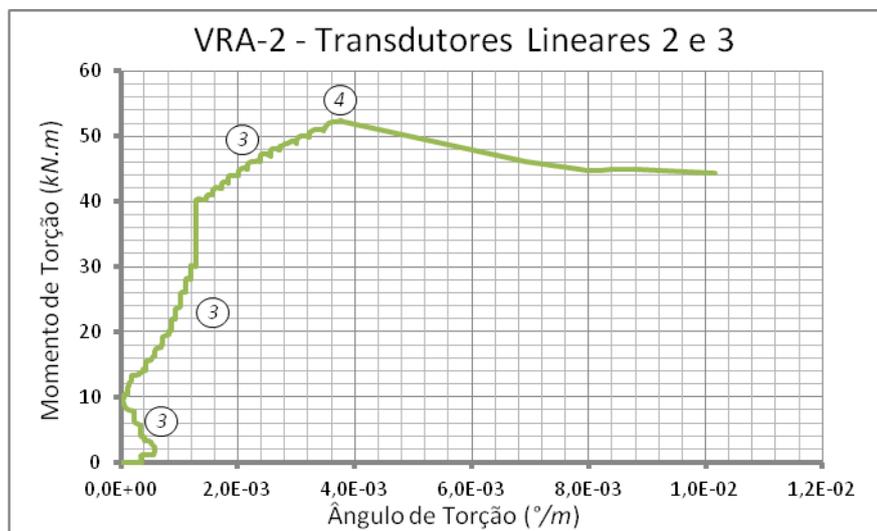


Figura 5.54 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRA-2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.

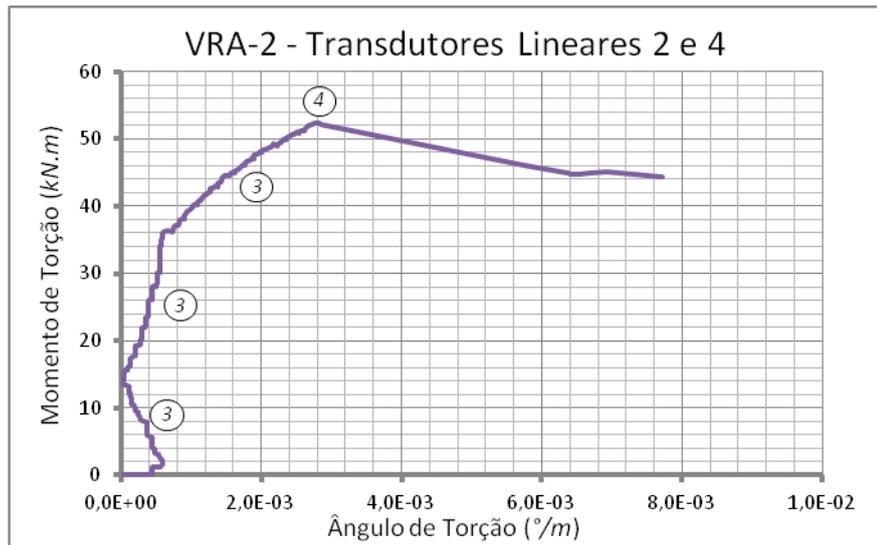


Figura 5.55 – Curva T x θ da Viga VRA-2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.

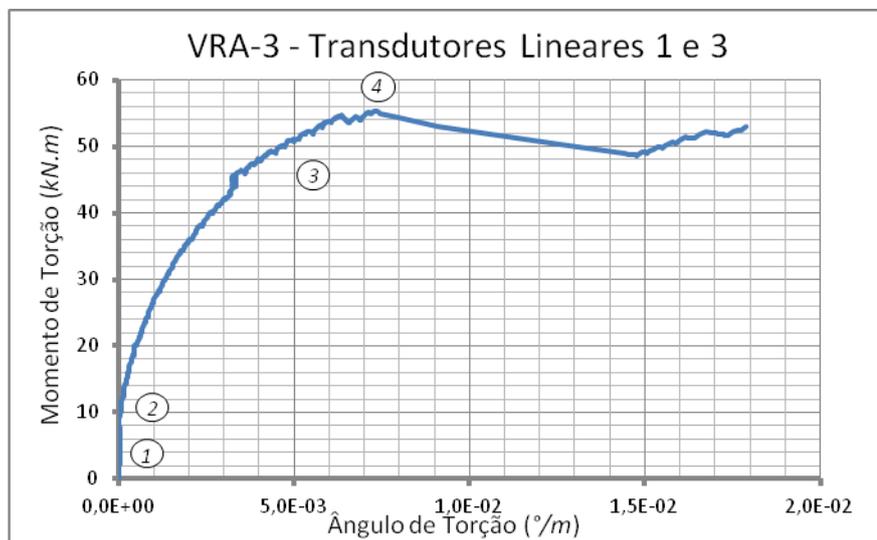


Figura 5.56 – Curva T x θ da Viga VRA-3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.

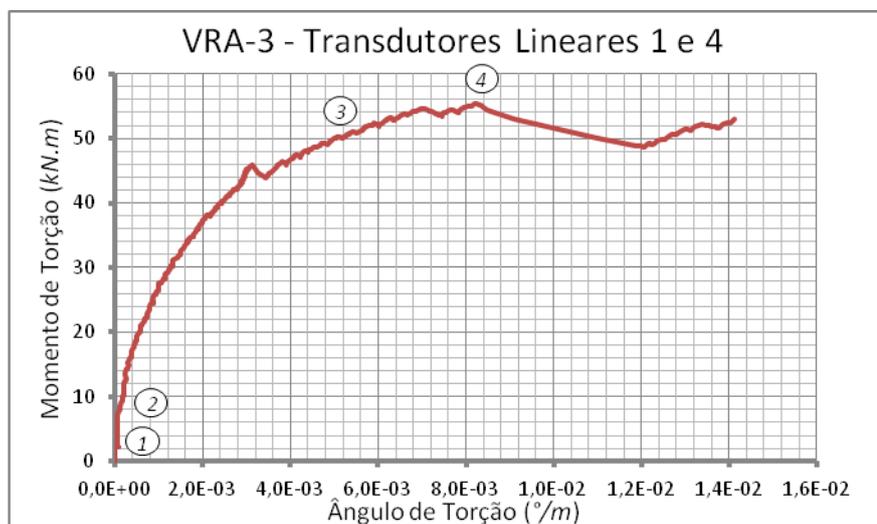


Figura 5.57 – Curva T x θ da Viga VRA-3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.

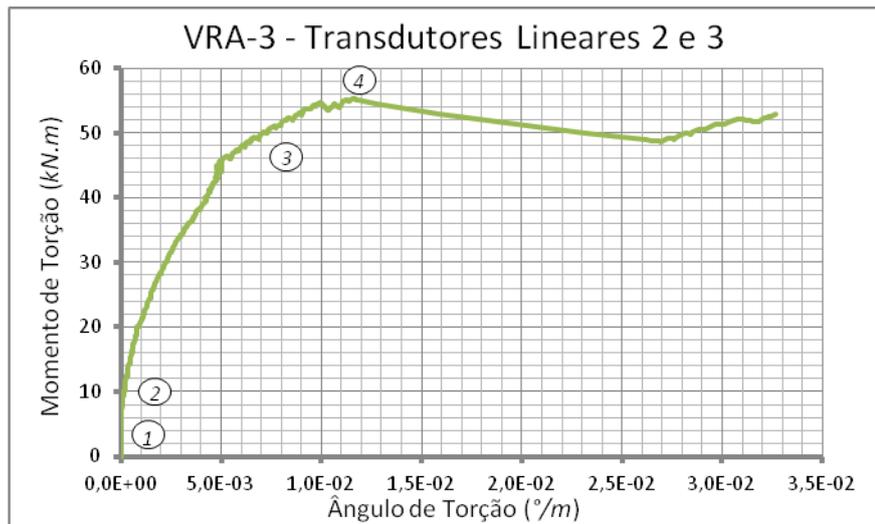


Figura 5.58 – Curva T x θ da Viga VRA-3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.

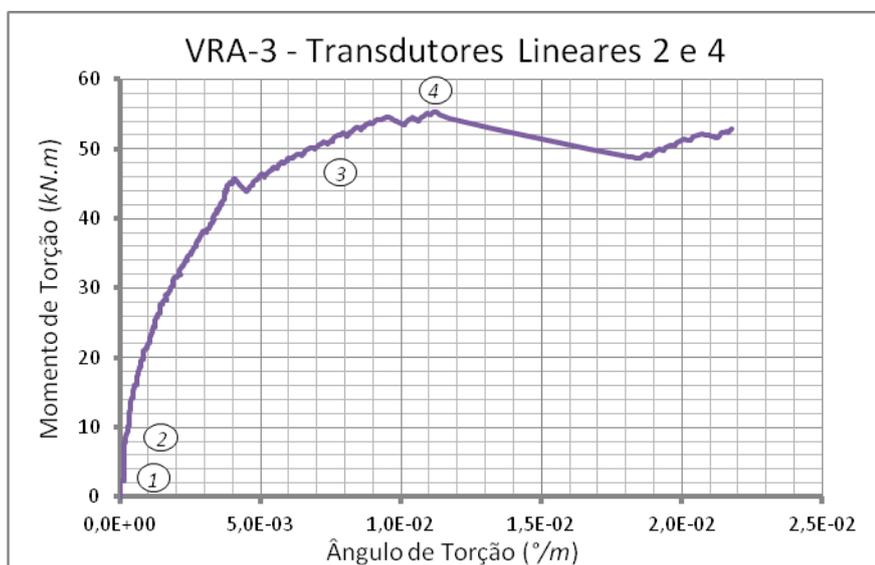


Figura 5.59 – Curva T x θ da Viga VRA-3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.

As Figuras 5.60 a 5.71 mostram as curvas T x θ para as vigas reforçadas com taxa B. Análogo ao comportamento das vigas de referência e das vigas da série RA pode-se observar que todos os pares de transdutores lineares apresentaram leituras próximas entre si para cada viga da série. Os valores dos momentos de torção na fissuração e na ruptura apresentaram-se igualmente consistentes, e os do ângulo de torção por unidade de comprimento apresentaram menor variabilidade que os das vigas de referência, análogo ao que ocorre com as vigas reforçadas com taxa A.

Em todas as vigas foi possível identificar os quatro estágios destacados durante observação das vigas de referência. Observou-se um acréscimo no valor do momento de torção de fissuração com relação às séries VR e VRA. Os momentos de torção na ruptura, ao contrário do esperado, apresentaram valores menores que os obtidos para as vigas reforçadas com taxa inferior de CFC. Após a ruptura foi dado um acréscimo de carga para levar as vigas à ruína. Esse comportamento não ocorreu nas vigas da série RA, que tiveram uma perda de resistência abrupta após a ruptura. A diferença poderia ser justificada pelo reforço nos extremos das vigas, que só ocorreu nas vigas com maior taxa.

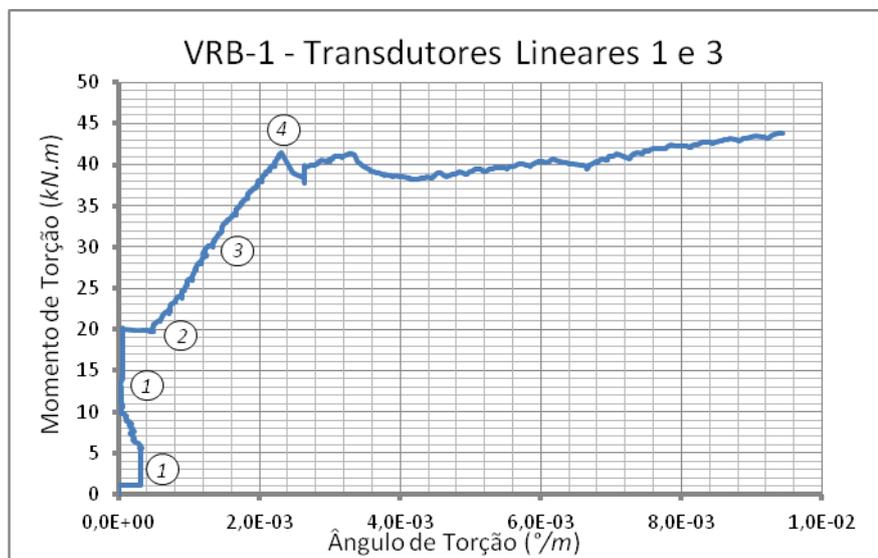


Figura 5.60 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRB-1 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.

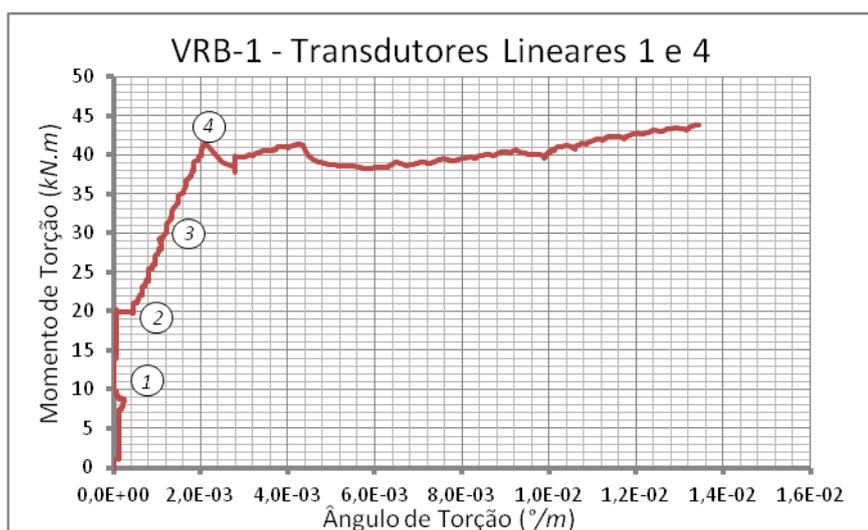


Figura 5.61 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRB-1 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.

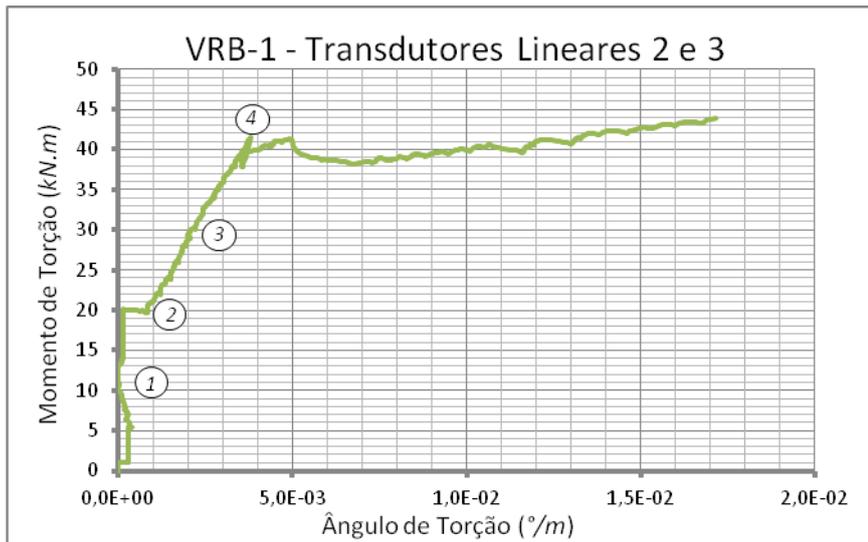


Figura 5.62 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRB-1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.

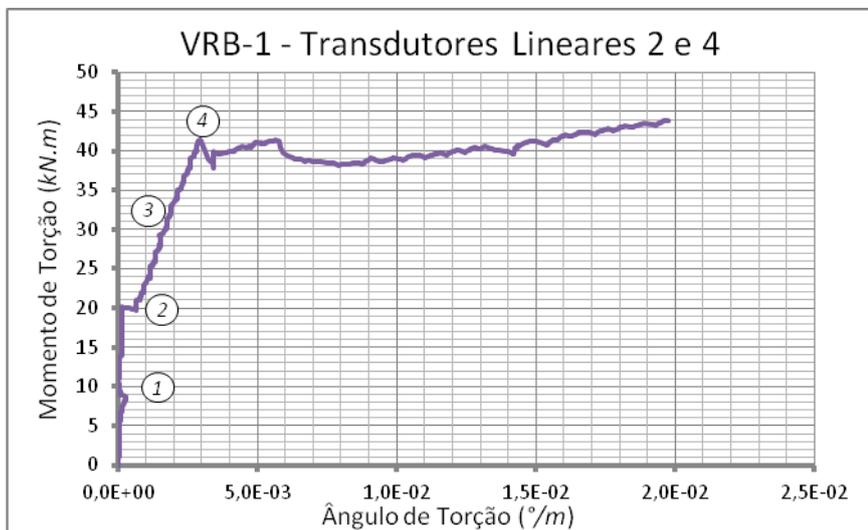


Figura 5.63 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRB-1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.

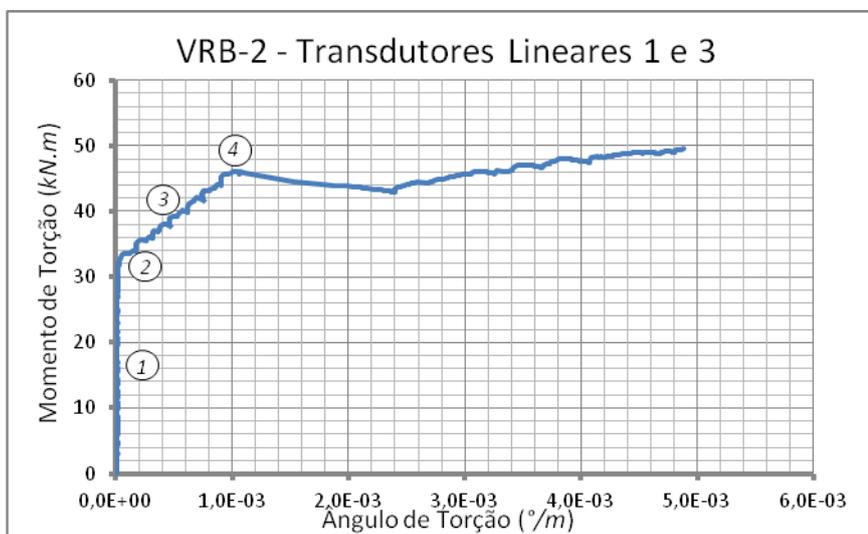


Figura 5.64 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRB-2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.

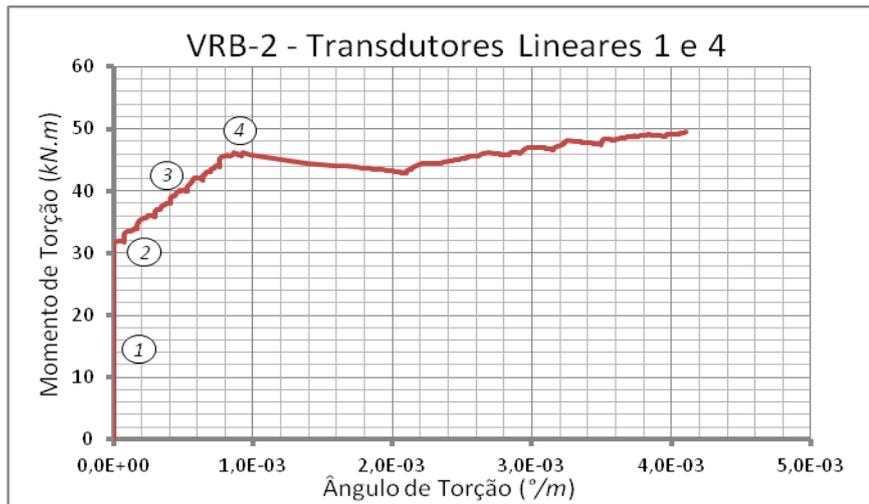


Figura 5.65 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRB-2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.

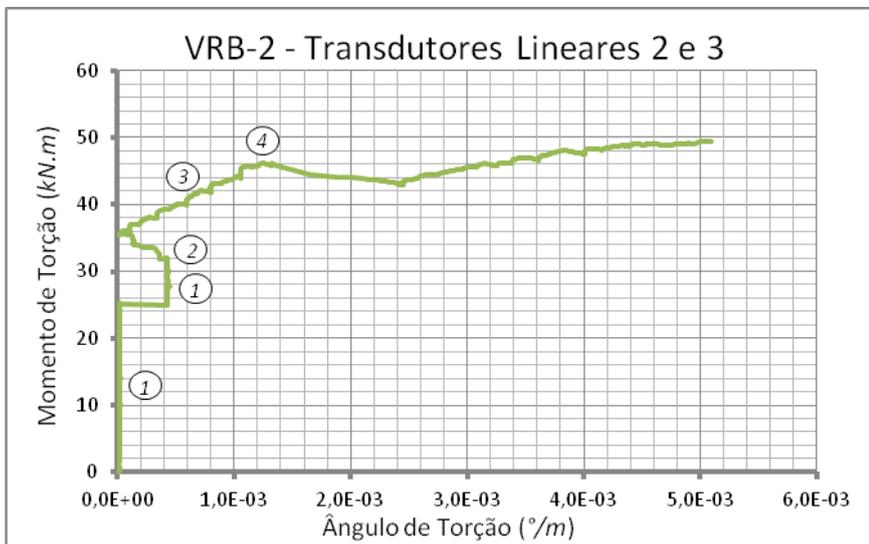


Figura 5.66 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRB-2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.

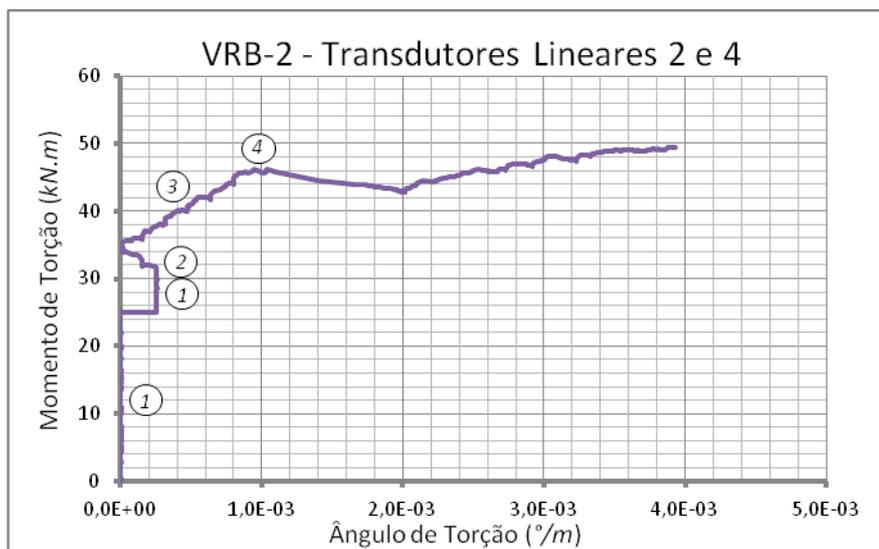


Figura 5.67 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRB-2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.

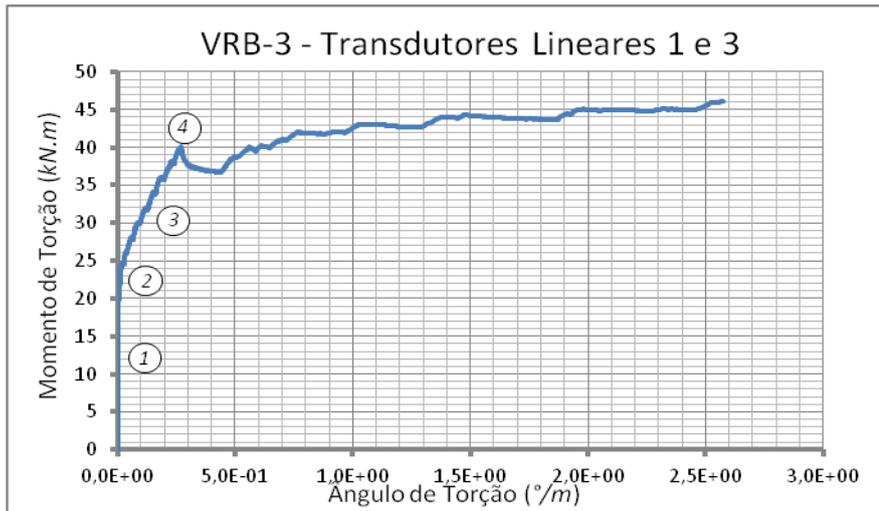


Figura 5.68 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRB-3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.

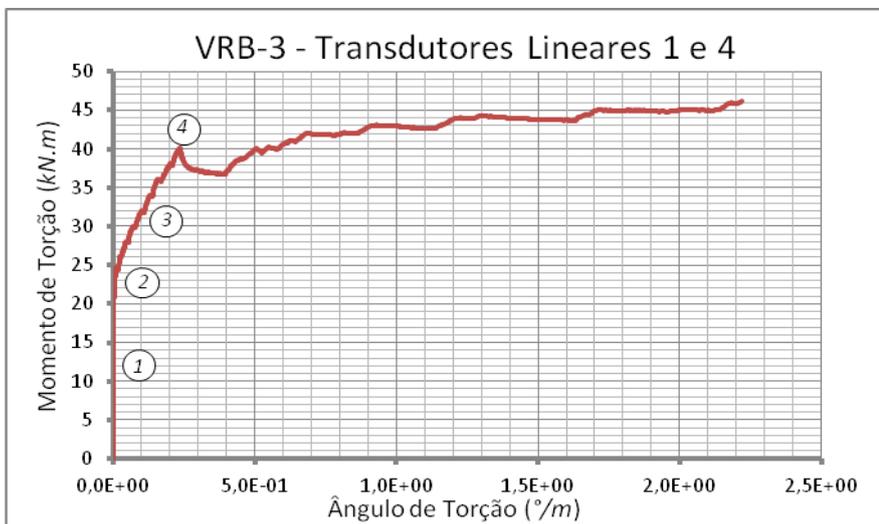


Figura 5.69 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRB-3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.

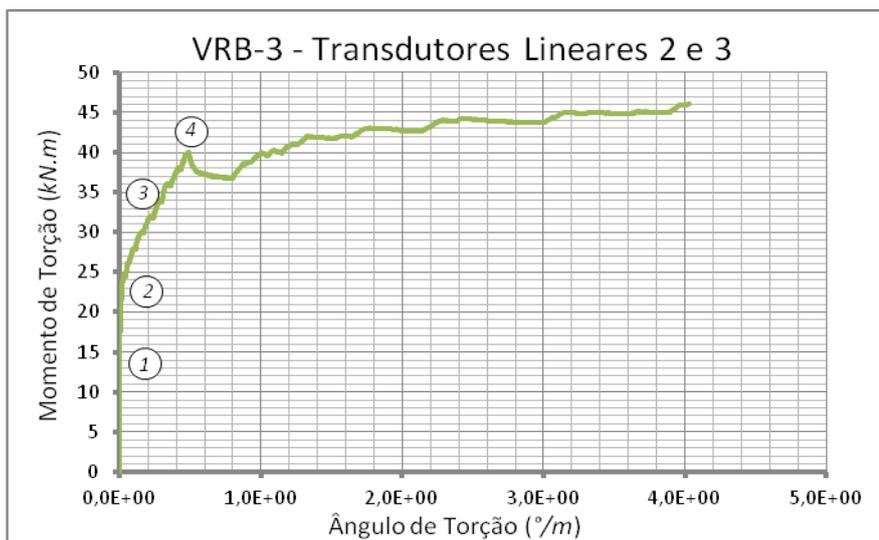


Figura 5.70 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRB-3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.

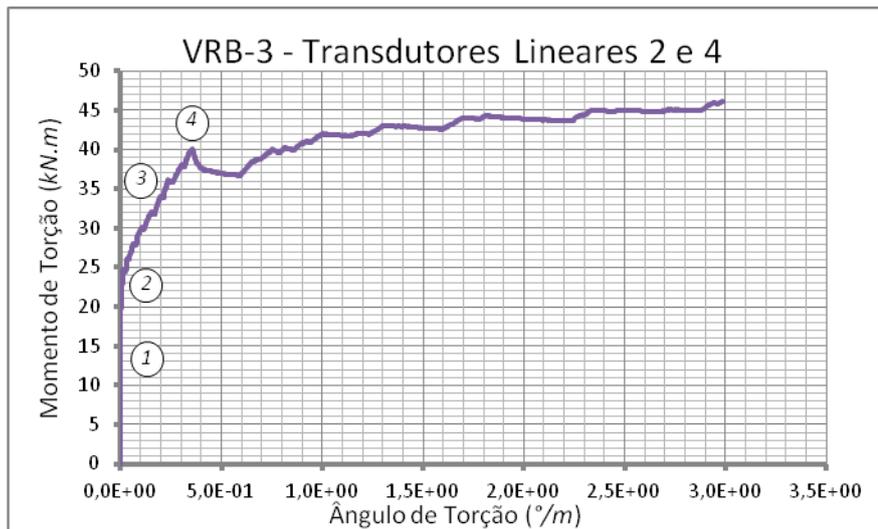


Figura 5.71 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRB-3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.

As Figuras 5.72 a 5.83 mostram as curvas T x  $\theta$  para as vigas reforçadas com taxa C. Diferente do comportamento das séries anteriores, pode-se observar diferenças nas formas gráficas obtidos com diferentes pares de transdutores lineares para cada viga. Apesar da ruptura prematura da viga VRC-1 ter ocorrido fora da região de observação, seus gráficos aproximam-se dos obtidos para a VRC-3, que não apresentou problemas no experimento. Os valores dos momentos e ângulos de torção apresentaram-se muito próximos. No entanto, os diagramas obtidos para viga VRC-2 foram inconsistentes e os resultados provenientes dessa viga foram descartados.

É possível identificar os quatro estágios destacados anteriormente nas vigas VRC-1 e VRC-3. Apesar das perturbações e variações abruptas de algumas leituras, todos os gráficos apresentaram forma consistente. Ao contrário do esperado não houve um acréscimo nos momentos de torção de fissuração, que foram próximos dos obtidos para série RA (menor taxa). Foi observado um acréscimo no momento de torção na ruptura com relação aos obtidos para série RB, mas não excedendo os valores encontrados para série RA. Identificou-se o mesmo comportamento das séries anteriores no que refere-se à resistência do sistema após a ruptura proveniente do carregamento aplicado para levar as vigas à ruína. A viga VRC-3, que recebeu reforço nos extremos, apresenta aproximadamente um patamar de escoamento, enquanto na viga VRC-1 o carregamento cai rapidamente.

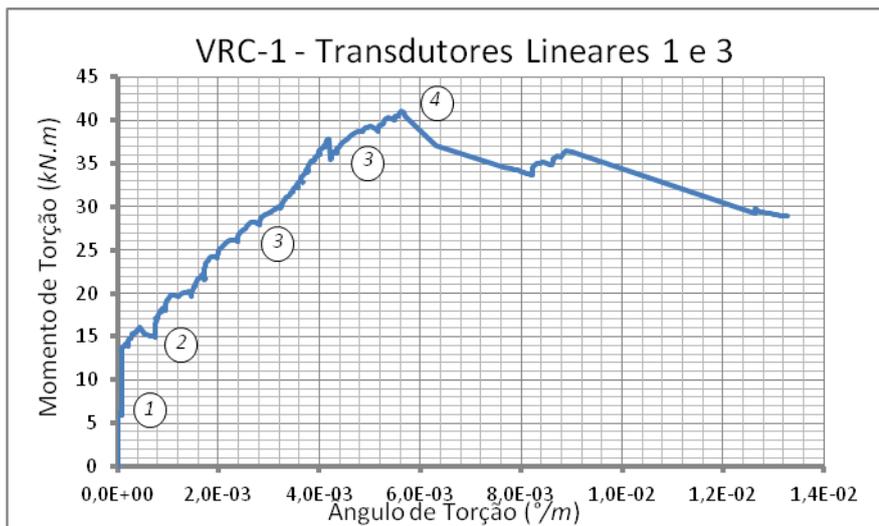


Figura 5.72 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRC-1 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.

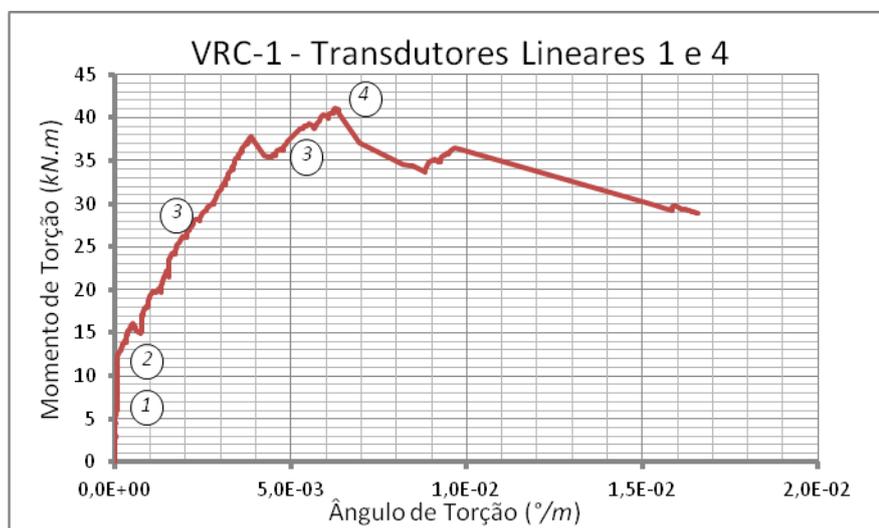


Figura 5.73 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRC-1 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.

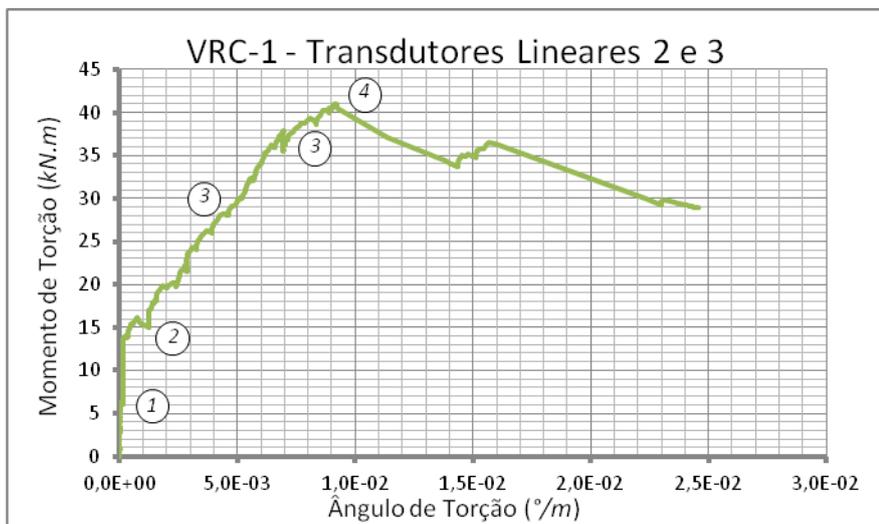


Figura 5.74 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRC-1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.

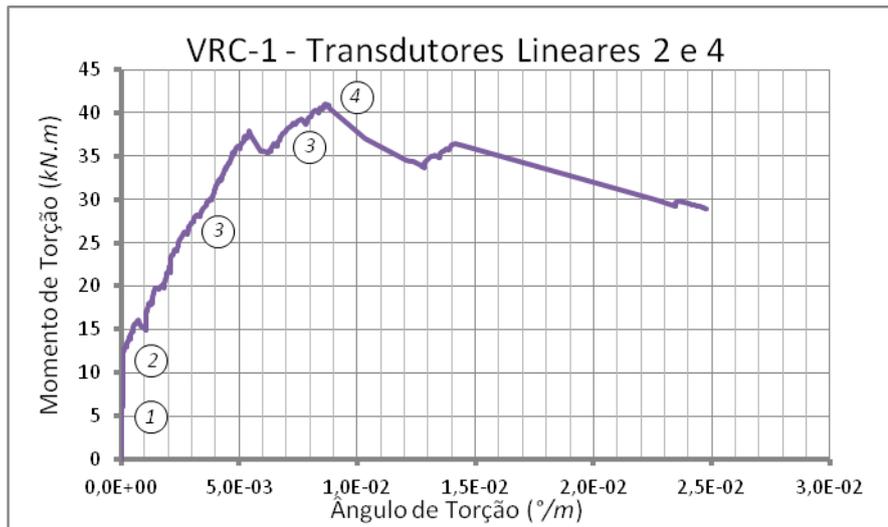


Figura 5.75 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRC-1 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.

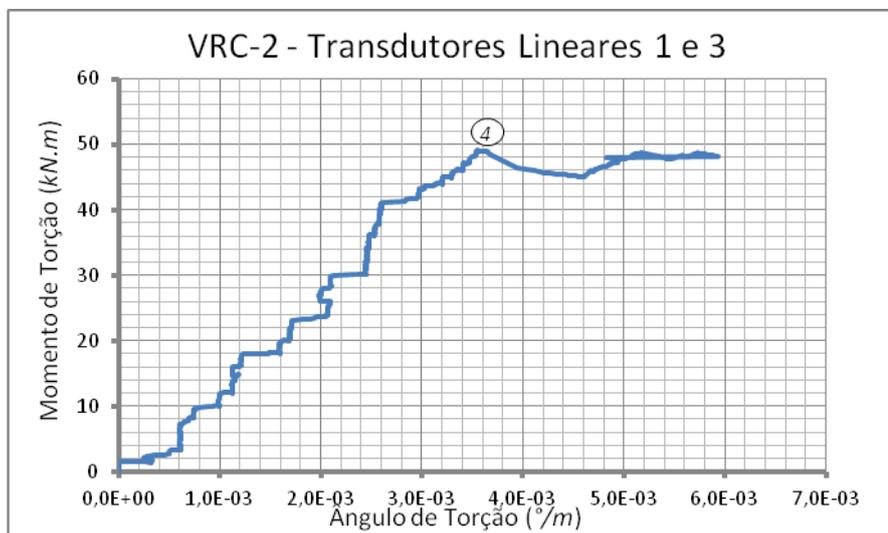


Figura 5.76 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRC-2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.

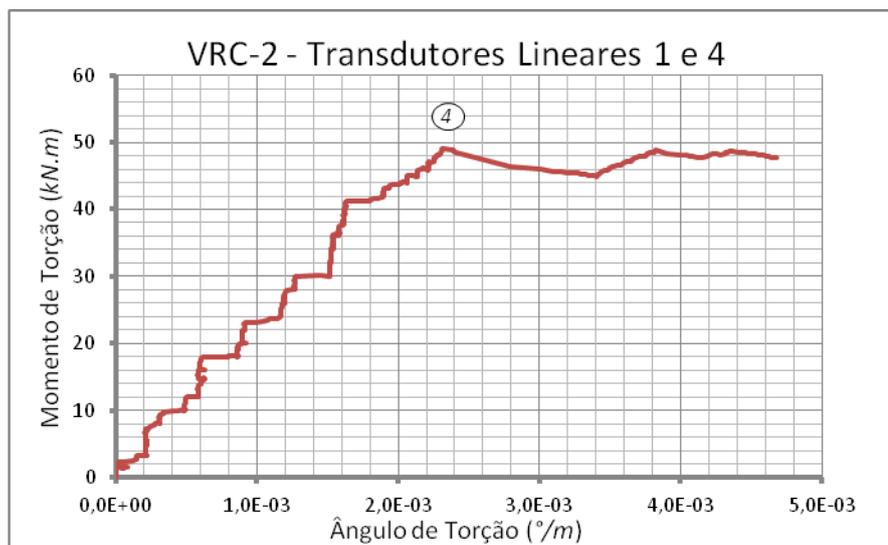


Figura 5.77 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRC-2 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.

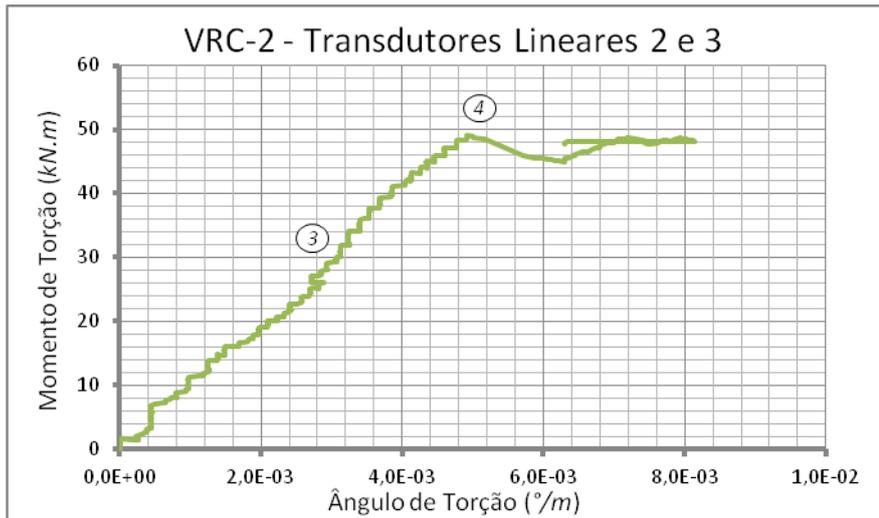


Figura 5.78 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRC-2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.

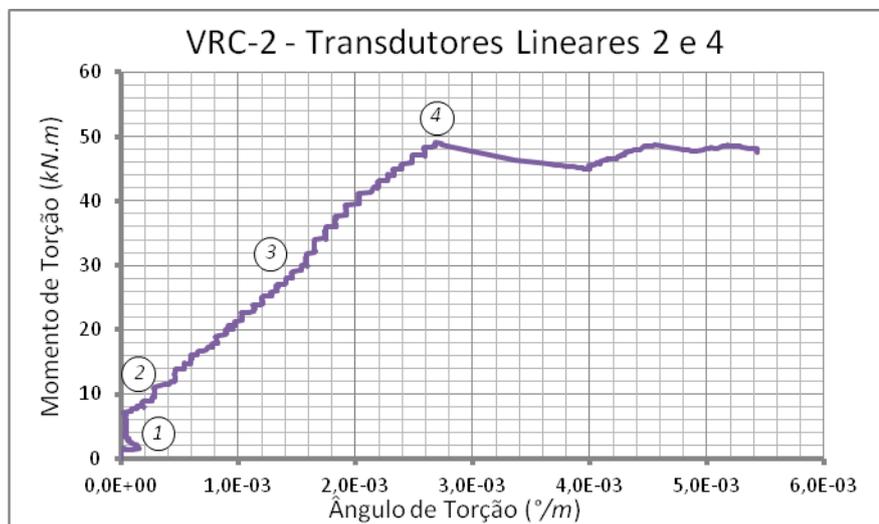


Figura 5.79 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRC-2 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.

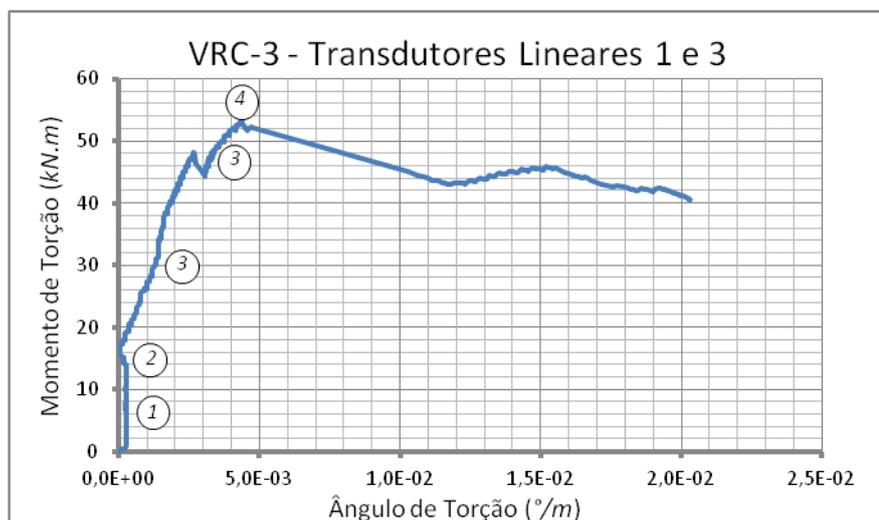


Figura 5.80 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRC-3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL3.

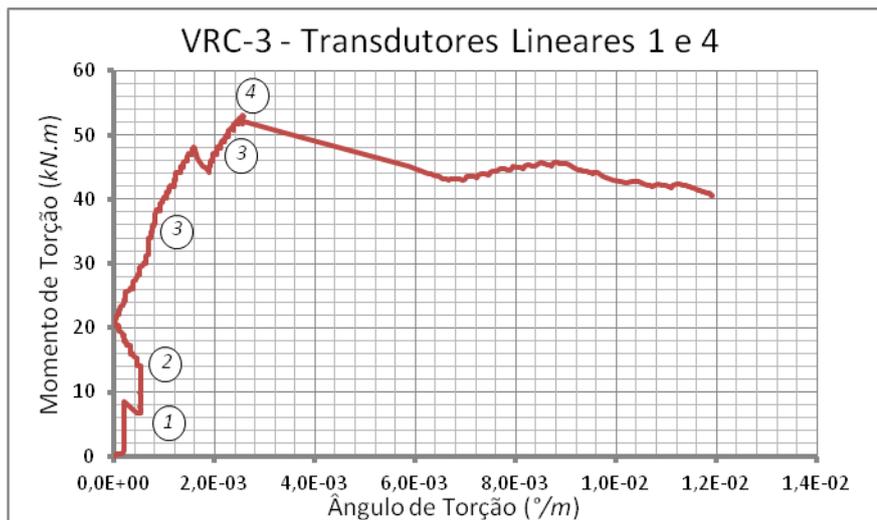


Figura 5.81 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRC-3 obtida com os transdutores lineares TL1 e TL4.

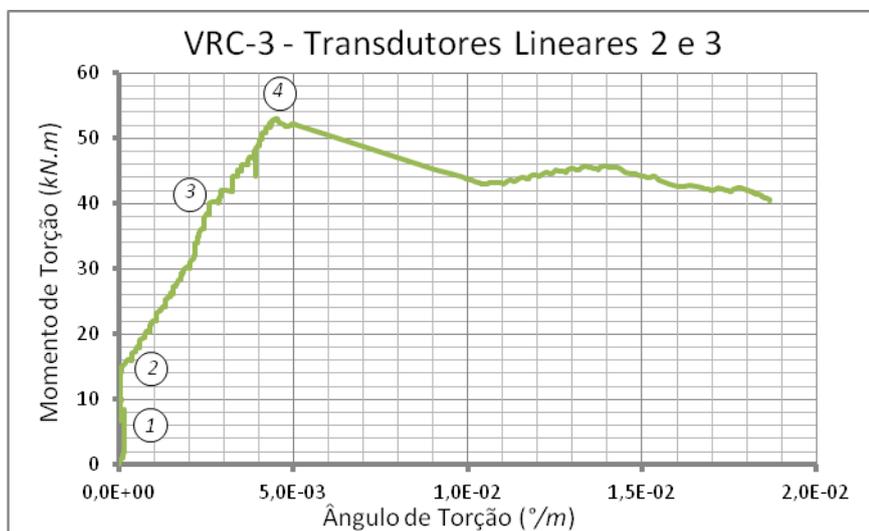


Figura 5.82 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRC-3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL3.

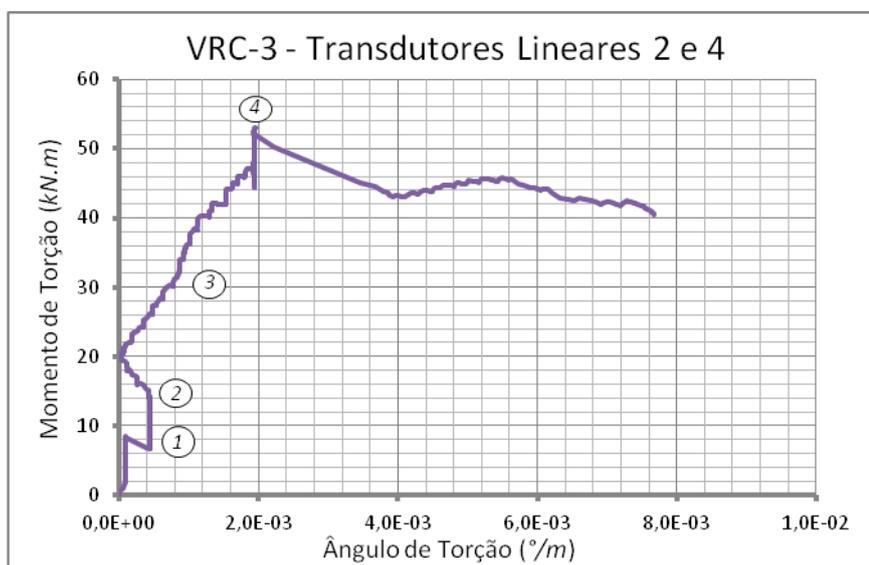


Figura 5.83 – Curva T x  $\theta$  da Viga VRC-3 obtida com os transdutores lineares TL2 e TL4.

As Tabelas 5.7 a 5.10 apresentam os valores obtidos para as curvas  $T \times \theta$  as vigas reforçadas. Análogo ao que ocorreu com as vigas de referência observa-se que os resultados relativos aos momentos de torção apresentam-se mais consistentes. O mesmo não ocorre com o ângulo de torção por unidade de comprimento na fissuração e na ruptura, que embora tenham apresentado coeficientes de variação menor para os valores obtidos para cada viga com os diferentes pares de transdutores lineares, apresentaram grande variação entre os resultados das diferentes vigas de cada série.

Os momentos de torção de fissuração das vigas reforçadas apresentaram maior variabilidade que das vigas de referência. Em alguns casos, como os das vigas VRA-2 e VRC-2, foi impossível determinar o resultado por observação das curvas  $T \times \theta$ . Esperava-se obter um acréscimo no valor do momento de torção proporcional ao aumento da taxa de reforço, mas isso não ocorreu. Os maiores valores foram obtidos nas vigas da série RB, reforçada com taxa intermediária. Excetuando-se a viga VRA-3, em todos os outros casos houve um aumento no valor do momento de torção de fissuração, se comparado com os valores obtidos para as vigas de referência, validando o reforço com CFC.

Tabela 5.7 – Resumo dos valores de momento de torção para as vigas reforçadas quando da fissuração.

VIGA		TCR (kN.m)						
		TRANSDUTORES				MÉDIA	D.P.	COV.
		1 e 3	1 e 4	2 e 3	2 e 4			
TAXA A	VRA-1	13,7	12,1	13,7	12,9	13,3	0,8	5,7%
	VRA-2	—	—	—	—	—	—	—
	VRA-3	9,5	7,2	8,0	7,2	7,6	1,1	14,1%
RESUMO DA SÉRIE						10,4	4,0	38,4%
TAXA B	VRB-1	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	0,0	0,2%
	VRB-2	32,0	31,3	31,8	31,3	31,5	0,4	1,2%
	VRB-3	21,8	22,4	21,8	22,5	22,1	0,4	1,7%
RESUMO DA SÉRIE						22,1	6,2	27,9%
TAXA C	VRC-1	13,8	12,4	13,8	12,1	13,1	0,9	6,9%
	VRC-2	—	—	—	—	—	—	—
	VRC-3	13,7	13,5	13,7	13,9	13,7	0,2	1,1%
RESUMO DA SÉRIE						13,4	0,4	3,3%

Os dados da Tabela 5.8 destacam a grande variabilidade dos valores obtidos para o ângulo de torção por unidade de comprimento quando do momento da fissuração.

Os momentos de torção na ruptura (Tabela 5.9) obtidos para as vigas reforçadas foram maiores que a média obtida para as vigas de referência. Desconsiderando o resultado obtido para a viga VRC-1 que teve o ensaio interrompido por uma ruptura fora da região de observação, as séries VRA e VRC apresentaram valores semelhantes para o momento de torção na ruptura. Os menores valores foram obtidos nas vigas da série RB, que forneceu os maiores valores para o momento de torção de fissuração.

Tabela 5.8 – Resumo dos valores ângulo de torção por unidade de comprimento para as vigas reforçadas quando da fissuração.

VIGA		$\theta_{CR} (\text{°/m}) \cdot 10^{-5}$						
		TRANSDUTORES				MÉDIA	D.P.	COV.
		1 e 3	1 e 4	2 e 3	2 e 4			
TAXA A	VRA-1	17,0	11,0	0,7	0,1	5,9	8,1	137,7%
	VRA-2	—	—	—	—	—	—	—
	VRA-3	3,6	5,4	9,4	13,0	7,4	4,1	55,0%
RESUMO DA SÉRIE						6,6	1,1	16,5%
TAXA B	VRB-1	41,0	34,0	71,0	50,0	45,0	16,0	35,6%
	VRB-2	1,2	0,0	43,0	25,0	13,0	20,0	154,4%
	VRB-3	900,0	620,0	1200,0	740,0	820,0	260,0	31,5%
RESUMO DA SÉRIE						45,0	460,0	1004,1%
TAXA C	VRC-1	9,8	7,4	15,0	8,8	9,3	3,5	37,2%
	VRC-2	—	—	—	—	—	—	—
	VRC-3	24,0	52,0	4,0	45,0	34,0	22,0	62,5%
RESUMO DA SÉRIE						22,0	18,0	81,1%

A Tabela 5.10 destaca uma maior consistência nos valores obtidos para o ângulo de torção por unidade de comprimento para cada viga a partir dos diferentes pares de transdutores lineares. No entanto, de forma análoga ao comportamento de  $\theta$  na fissuração para as vigas reforçadas, observa-se grande variabilidade dos valores obtidos dentro de cada série.

Tabela 5.9 – Resumo dos valores de momento de torção para as vigas reforçadas quando da ruptura.

VIGA		Tu (kN.m)						
		TRANSDUTORES				MÉDIA	D.P.	COV.
		1 e 3	1 e 4	2 e 3	2 e 4			
TAXA A	VRA-1	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	0,0	0,0%
	VRA-2	52,3	52,3	52,4	52,3	52,3	0,0	0,1%
	VRA-3	55,4	55,3	55,3	55,3	55,3	0,0	0,0%
RESUMO DA SÉRIE						52,3	3,5	6,7%
TAXA B	VRB-1	41,1	41,3	41,4	41,0	41,2	0,2	0,5%
	VRB-2	46,1	45,8	46,0	45,7	45,9	0,2	0,4%
	VRB-3	39,8	39,7	39,7	40,0	39,7	0,2	0,5%
RESUMO DA SÉRIE						41,2	3,2	7,8%
TAXA C	VRC-1	41,0	41,0	41,0	41,0	41,0	0,0	0,0%
	VRC-2	—	—	—	—	—	—	—
	VRC-3	52,5	52,5	52,8	52,9	52,7	0,2	0,4%
RESUMO DA SÉRIE						46,9	8,2	17,5%

Tabela 5.10 – Resumo dos valores de ângulo de torção por unidade de comprimento para as vigas reforçadas quando da ruptura.

VIGA		$\theta_u$ (°/m) . 10 <sup>-3</sup>						
		TRANSDUTORES				MÉDIA	D.P.	COV.
		1 e 3	1 e 4	2 e 3	2 e 4			
TAXA A	VRA-1	2,9	2,6	4,4	3,4	3,1	0,8	25,1%
	VRA-2	3,0	2,5	3,7	2,8	2,9	0,5	18,0%
	VRA-3	7,4	8,2	12,0	11,0	9,7	2,1	21,5%
RESUMO DA SÉRIE						3,1	3,8	123,1%
TAXA B	VRB-1	2,3	2,1	3,8	2,9	2,6	77,0	30,1%
	VRB-2	1,0	0,9	1,3	1,0	1,0	18,0	17,9%
	VRB-3	270,0	230,0	470,0	350,0	310,0	110,0	33,7%
RESUMO DA SÉRIE						2,6	180,0	7005,4%
TAXA C	VRC-1	5,6	6,3	9,1	8,7	7,5	1,7	23,1%
	VRC-2	—	—	—	—	—	—	—
	VRC-3	4,2	2,5	4,5	1,9	3,4	1,3	37,1%
RESUMO DA SÉRIE						5,4	2,9	53,4%

Aplicou-se a expressão (3.1) na média corrigida dos momentos de torção obtidos no instante de fissuração e de ruptura das vigas de referência. A aplicação da fórmula para cada taxa visou a verificação da expressão proposta, visto que nos ensaios realizados por Hsu (1982) os momentos de fissuração e ruptura das vigas de concreto simples eram muito próximos, o que não ocorreu nos ensaios realizados. Os valores teóricos obtidos para o momento de fissuração das vigas

reforçada são apresentados na Tabela 5.11. Observou-se que os resultados determinados a partir do momento de torção na fissuração das vigas de referência foram mais próximos que os obtidos a partir dos momentos de torção na ruptura. Os resultados teóricos foram sempre inferiores aos resultados obtidos experimentalmente.

A Figura 5.84 representa os momentos de fissuração obtidos experimentalmente para as vigas reforçadas, e os valores dos momentos de torção quando da fissuração obtidos analiticamente. Os momentos de torção de fissuração teóricos utilizaram o valor médio das vigas de referência.

Tabela 5.11 – Tabela de verificação da expressão 3.1.

TAXA	VALOR TAXA (%)	TEÓRICO		EXPERIMENTAL	
		BASE: $T_{CR,med}$ Série VR	BASE: $T_{n,med}$ Série VR	VIGA	$T_{CR^*,med}$ ( <i>kN.m</i> )
		$T_{CR^*,teo}$ ( <i>kN.m</i> )	$T_{CR^*,teo}$ ( <i>kN.m</i> )		
A	0,860	9,21	34,34	VRA-1	13,3
				VRA-2	—
				VRA-3	7,6
B	1,032	9,27	34,57	VRB-1	19,9
				VRB-2	31,5
				VRB-3	22,1
C	1,290	9,36	34,91	VRC-1	13,1
				VRC-2	—
				VRC-3	13,7

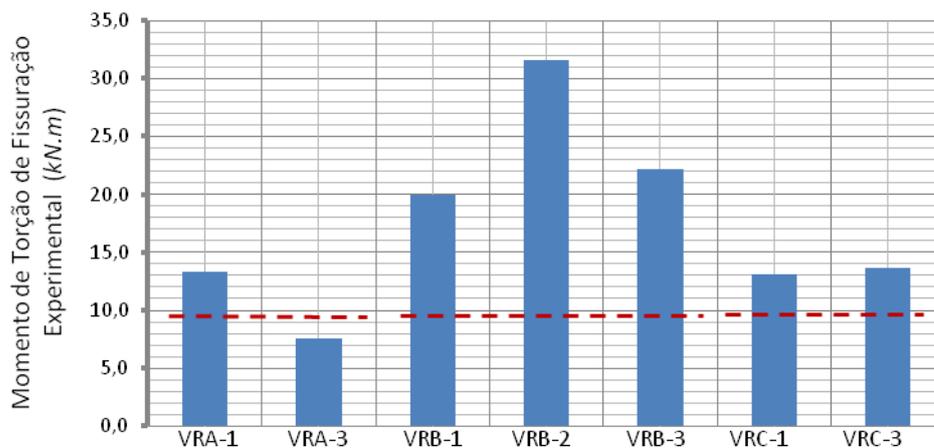


Figura 5.84 – Momentos de torção na fissuração - valores teóricos e experimentais.

As Figuras 5.85 e 5.86 representam graficamente a relação entre os momentos de torção na fissuração e na ruptura com as taxas de reforço utilizadas. Utilizou-se uma linha de tendência de distribuição linear para auxiliar a análise.

Na Figura 5.85 observa-se um aumento no valor do momento de fissuração diretamente proporcional ao aumento da taxa de reforço. Isso é melhor observado na diferença entre as séries RA e RB, pois a série RC apresentou resultados abaixo do esperado.

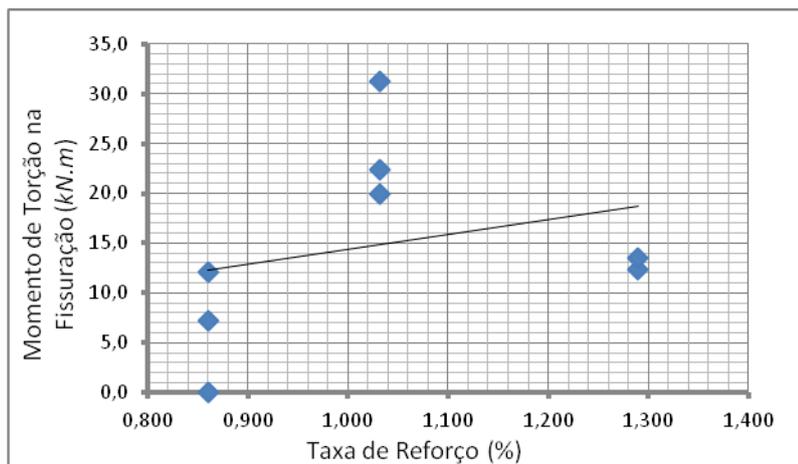


Figura 5.85 – Momento de torção na fissuração *versus* taxa de reforço.

Na Figura 5.86 observa-se uma diminuição do momento de torção na ruptura conforme o aumento da taxa.

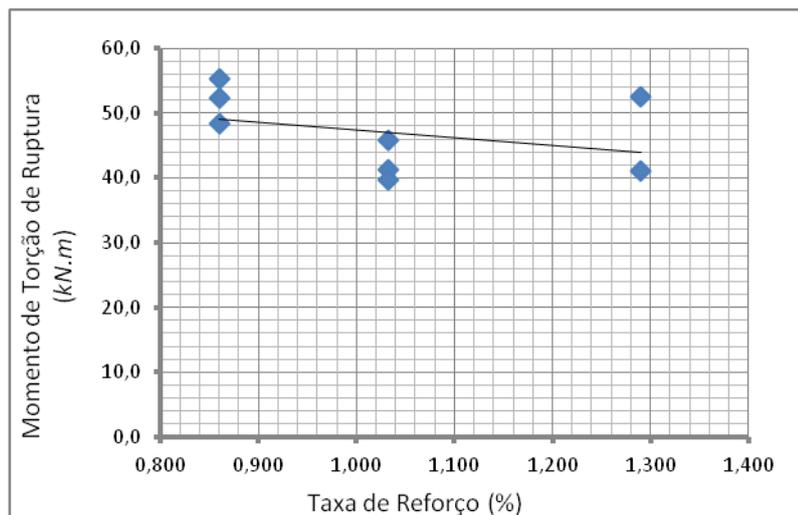


Figura 5.86 – Momento de torção na ruptura *versus* taxa de reforço.

As Figuras 5.85 e 5.86 destacam um comportamento contrário ao descrito por Hsu (1982) na análise de vigas de concreto armado com estribos de aço. Em sua pesquisa Hsu observou uma variação do momento de fissuração desprezível, e uma relação diretamente proporcional do momento de torção de ruptura e a taxa de reforço.

#### 5.4. ANÁLISE DA RIGIDEZES DAS VIGAS

Inicialmente esperava-se que as vigas de referência se comportassem de maneira linear, possibilitando a análise até a fissuração pelo método de Saint-Venant, e que o momento de torção de fissuração seria próximo ao de ruptura. Os ensaios mostraram que as vigas quase não giraram antes de fissurarem, gerando uma rigidez bastante alta, que caiu e permaneceu aproximadamente constante até a ruptura da viga. O colapso em geral ocorreu muito após a fissuração, mostrando a capacidade de readaptação das vigas de concreto.

A Tabela 5.12 apresenta os valores das rigidezes calculadas a partir dos pares  $T \times \theta$  obtidos graficamente. Foram adotados os valores obtidos através das medições dos transdutores lineares 1 e 4 para cada uma das vigas. Não adotou-se os valores médios por conta da grande variação dos ângulos de torção por unidade de comprimento. Apenas os resultados relativos à fissuração da viga VR2 foram ignorados por conta da grande variação observada nos valores do momento de torção para os diferentes pares de transdutores.

Como foi verificado anteriormente, observa-se que os resultados relativos ao momento de torção apresentaram-se mais consistentes. Ao analisar a relação entre o momento de torção na ruptura e na fissuração, observa-se maior consistência que o equivalente para o ângulo de torção por unidade de comprimento, corroborando com o fato que os resultados provenientes do carregamento são menos passíveis de variabilidade do que os obtidos através de deformações.

Tabela 5.12 – Rigidez das vigas de referência.

VIGA	$T_{CR}$ (kN.m)	$\Theta_{CR}$ $\cdot 10^{-3}$ (°/m)	$T_U$ (kN.m)	$\Theta_U$ $\cdot 10^{-3}$ (°/m)	$T_U/T_{CR}$	$\Theta_U/\Theta_{CR}$	RIGIDEZES	
							FISSURAÇÃO ( $R_{CR} = T_{CR}/\Theta_{CR}$ )	RUPTURA ( $R_U = T_U/\Theta_U$ )
VR1	10,0	1,6	30,0	12,0	3,0	7,5	6.250,0	2.500,0
VR2	—	—	34,5	9,3	—	—	—	3.709,7
VR3	8,7	0,7	33,2	12,0	3,8	0,2	12.985,1	2.766,7
VR4	8,7	0,0	44,2	11,0	5,1	0,1	147.457,6	4.018,2
MÉDIA	6,9	0,6	35,5	11,0	3,0	53,0	41673,2	3248,6
D.P.	0,8	0,8	6,1	1,3	1,0	100,4	79653,2	729,7
COV.	11,0%	133,3%	17,2%	11,5%	35,2%	189,6%	191,1%	22,5%

Observa-se boa conformidade nos valores das rigidezes na ruptura, o que não ocorre na fissuração. Analisando as vigas VR1 e VR3, que apresentaram valores de rigidez na fissuração mais próximos dos encontrados na literatura, observa-se uma redução da rigidez de 60,0% e 78,7% respectivamente.

A Tabela 5.13 apresenta o cálculo das rigidezes na fissuração e na ruptura para as vigas reforçadas. Analogamente às vigas de referência, foram utilizados os resultados provenientes das curvas  $T \times \theta$  obtidas com os transdutores lineares 1 e 4.

Conforme verificado para as vigas de referência, os resultados provenientes dos momentos de torção apresentaram-se mais consistentes nas três séries de vigas reforçadas.

Os valores obtidos para as rigidezes das vigas reforçadas estão bastante acima dos encontrados na literatura. Para a rigidez na fissuração isso poderia ser justificado porque as vigas praticamente não giraram antes da abertura de fissuras, gerando ângulos de torção por unidade de comprimento muito pequenos. Mesmo na ruptura ainda pode-se observar valores baixos para  $\theta$ .

Comparativamente, a redução da rigidez do instante de fissuração à ruptura está dentro dos intervalos observados na literatura. Não houve consistência no decréscimo de rigidez em nenhuma das séries. Na série RA as vigas VRA-1 e VRA-3 tiveram um decréscimo de 83,1% e 94,9% respectivamente. Na série RB a viga VRB-1 teve uma queda de 66,4% da rigidez, enquanto as vigas VRB-2 e VRB-3 decresceram em 99,9% e 95,2% respectivamente. Na série RC a viga VRC-1 teve uma redução de 96,1%, em conformidade com a série anterior, e uma redução de 19,1% na viga VRC-3, invalidando uma média entre os valores.

As Figuras 5.87 e 5.88 representam a relação entre as rigidezes de fissuração e ruptura e as taxas de reforço. Foram desprezados os valores obtidos que estão fora dos padrões da literatura.

Na Figura 5.87 observa-se uma diminuição da rigidez na fissuração conforme aumento da taxa de reforço. Isso vai de encontro ao observado por Hsu (1982), que observou um aumento considerável da rigidez.

Tabela 5.13 – Rigidez das vigas reforçadas.

VIGA	$T_{CR}$ (kN.m)	$\Theta_{CR}$ ( $\cdot 10^{-5}$ ) ( $^{\circ}/m$ )	$T_U$ (kN.m)	$\Theta_U$ ( $\cdot 10^{-3}$ ) ( $^{\circ}/m$ )	$T_U/T_{CR}$	$\Theta_U/\Theta_{CR}$	RIGIDEZES		
							FISSURAÇÃO ( $R_{CR} = T_{CR}/\Theta_{CR}$ )	RUPTURA ( $R_U = T_U/\Theta_U$ )	
TAXA A	VRA-1	12,1	11,0	48,4	2,6	4,0	24,0	110.000	18615
	VRA-2	—	—	52,3	2,5	—	—	—	20.920
	VRA-3	7,2	5,4	55,3	8,2	7,7	150,0	133.333	6.744
	MÉDIA	9,7	8,2	52,0	4,4	5,8	88,0	121667	15426
	D.P.	3,5	4,0	3,5	0,0	2,6	91,0	16499	7607
	COV.	35,9%	48,3%	6,7%	73,6%	44,6%	103,3%	13,6%	49,3%
TAXA B	VRB-1	19,9	34,0	41,3	2,1	2,1	6,2	58529	19.667
	VRB-2	31,3	0,0	45,8	0,9	1,5	1800,0	65208333	53.882
	VRB-3	22,4	620,0	39,7	230,0	1,8	37,0	3613	173
	MÉDIA	24,5	220,0	42,3	78,0	1,8	600,0	21756825	24574
	D.P.	6,0	350,0	3,2	130,0	0,3	1000,0	37630120	27189
	COV.	24,4%	159,9%	7,5%	169,9%	17,3%	167,0%	173,0%	110,6%
TAXA C	VRC-1	12,4	7,4	41,0	6,3	3,3	85,0	167568	6.508
	VRC-2	—	—	—	—	—	—	—	—
	VRC-3	13,5	52,0	52,5	2,5	3,9	4,8	25.962	21.000
	MÉDIA	13,0	30,0	46,8	4,4	3,6	45,0	96765	13754
	D.P.	0,8	32,0	8,1	2,7	0,4	57,0	100131	10247
	COV.	6,0%	106,2%	17,4%	61,1%	11,4%	126,3%	103,5%	74,5%

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1212054/CA

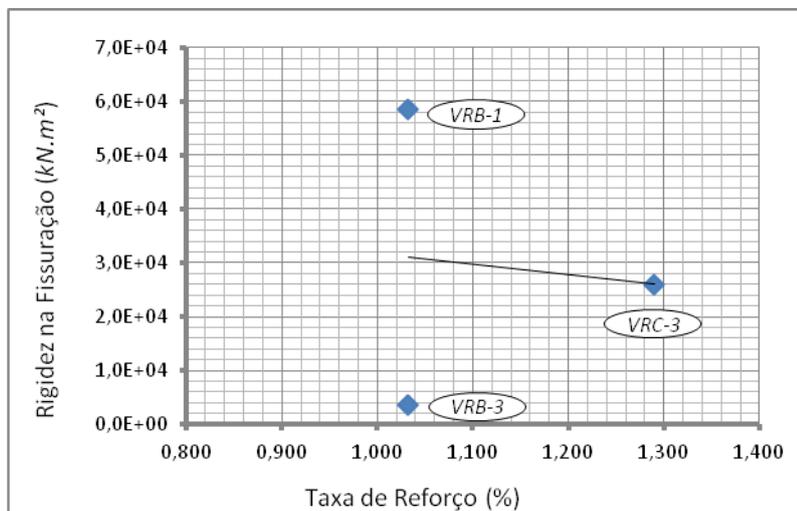


Figura 5.87 – Rigidez na fissuração versus taxa de reforço.

A Figura 5.88 mostra um aumento da rigidez na ruptura proporcional ao aumento da taxa de reforço.

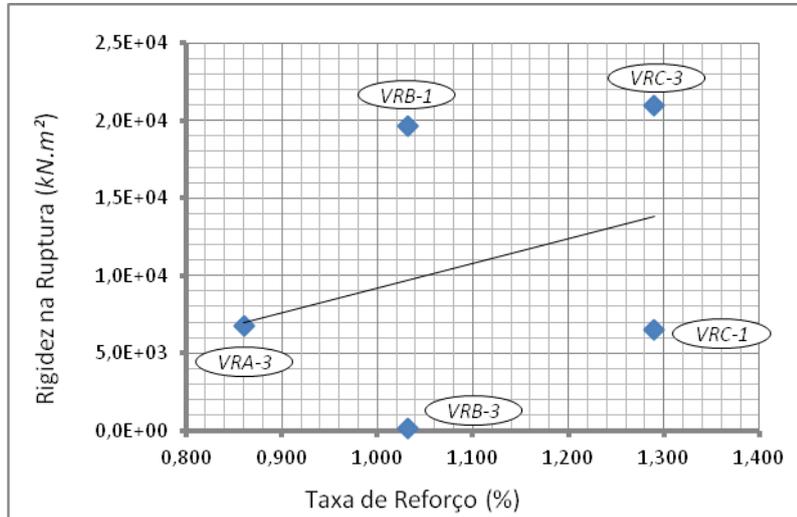


Figura 5.88 – Rigidez na ruptura versus taxa de reforço.