

4. Apresentação e análise dos resultados experimentais

4.1. Introdução

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios realizados nos materiais usados (bambu e concreto), posteriormente mostram-se os resultados dos ensaios realizados nas vigas parede, entre eles, as relações Carga vs. Deslocamento, Carga vs. Deformações, padrão de fissuração, cargas últimas (CAST e experimental) e aderência.

4.2. Propriedades mecânicas do bambu e do concreto

4.2.1. Bambu

4.2.1.1. Resistência à Tração do Bambu.

Os ensaios dividiram-se em dois grupos, o primeiro, corresponde aos testes de cinco corpos de prova sem nó. E o segundo, aos testes de cinco corpos de prova com nó. Abaixo, nas Figuras 4.1 e 4.2 e nas Tabelas 4.1 e 4.2 mostram-se os resultados obtidos.

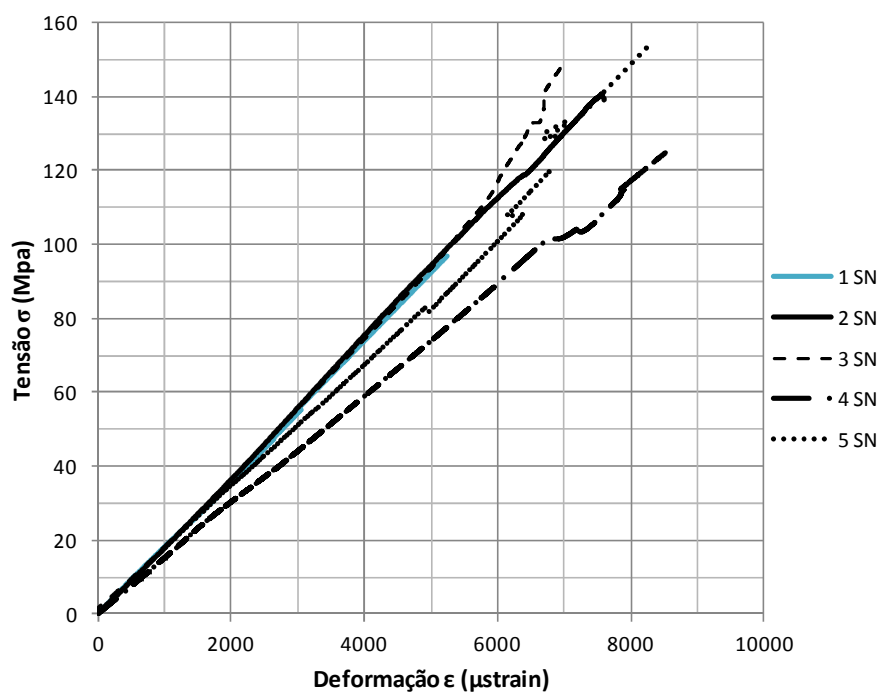


Figura 4.1 – Tensão vs. Deformação. Material Bambu sem nó da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de resistência à tração para bambu sem nó da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

	Corpo de prova	σ máx.	Def. máx.	E
	ID	(Mpa)	(μstrain)	(Gpa)
SEM nó	1 SN	96.89	5227.60	18.64
	2 SN	139.45	7600.00	19.00
	3 SN	148.65	6990.00	20.12
	4 SN	124.64	8510.86	14.92
	5 SN	153.17	8227.00	17.72
	MEDIA	132.56	7311.09	18.08
	padrão estandar	22.73	1304.40	1.96
	Coef. Variação	17.14%	17.84%	10.87%

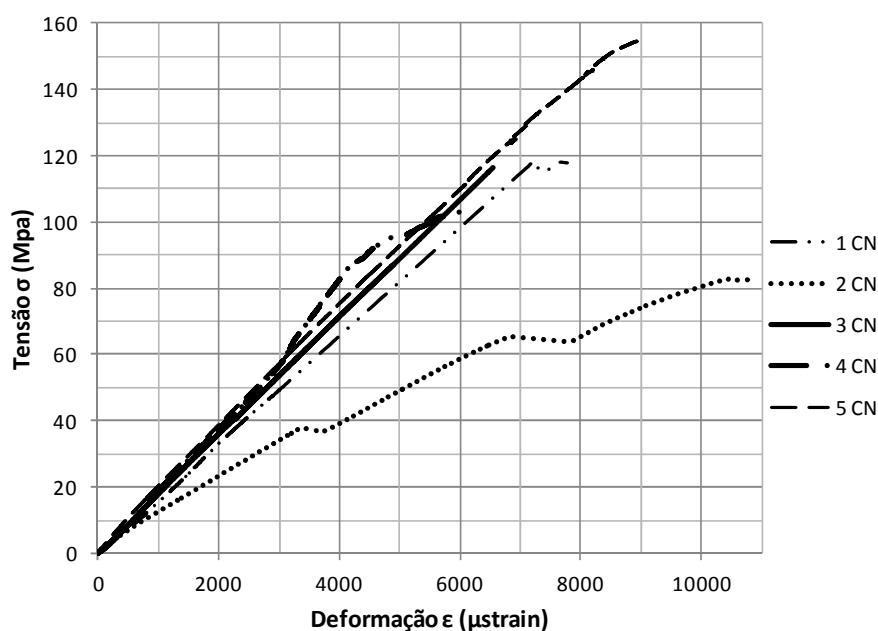


Figura 4.2 – Tensão vs. Deformação. Material Bambu com nó da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de resistência à tração para bambu com nó da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

	Corpo de prova	σ máx.	Def. máx.	E
	ID	(Mpa)	(μ strain)	(Gpa)
COM nó	1 CN	118.54	7231.69	16.30
	2 CN	82.95	10810.00	8.30
	3 CN	116.28	6546.19	17.67
	4 CN	105.11	6210.00	19.44
	5 CN	154.89	9080.00	17.64
	MEDIA	105.72	7975.58	17.76
	Padrão estandar	16.27	2116.82	1.29
	Coef. Variação	15.39%	26.54%	7.25%

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 se indica a média do módulo de elasticidade correspondendo a 18.08 GPa para os corpos de prova sem nó e 17.76 GPa para os corpos de prova com nó. O coeficiente de variação encontrado para os dois grupos ensaiados foi de 10.87% e 7.25%, o que indica boa confiabilidade nos dados obtidos. É importante esclarecer que o valor do módulo de elasticidade do corpo de prova 02D não foi levado em conta para o cálculo da média, pois é um valor que sai da tendência geral dos demais resultados. Pelo mesmo motivo, o valor da resistência máxima à tensão do corpo de prova 05D também não foi considerado.

As formas típicas de ruptura nos corpos de prova ensaiados se podem observar nas Figuras 4.3d, 4.3e e 4.3f, que correspondem, respectivamente à fratura no nó, a falhas por cisalhamento nos extremos, e desprendimento interfacial entre a fibra e a matriz.



(a) Vista geral do ensaio de tração na máquina universal INSTRON No.6233.



(b) Vista aproximada do corpo de prova para o ensaio de tração.



(c) Nó



(d) Falha no nó



(e) Falha por cisalhante



(f) Falha por desprendimento interfacial fibra-matriz

Figura 4.3 – Ensaio de tração do bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* na máquina universal INSTRON No.6233.

4.2.2. Concreto

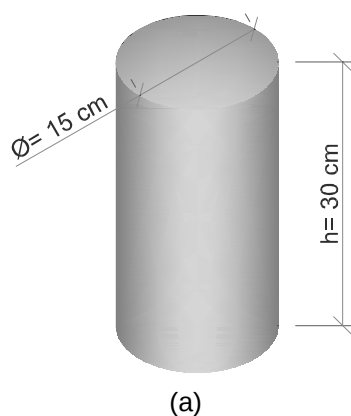
O concreto usado foi fabricado *in loco*, cujas características foram: resistência característica à compressão, (f_{ck}), de 30 MPa, relação água-cimento (A/C), de 0.45 e abatimento de 8 cm. O traço foi de 1:1.8:2.4, calculado seguindo o método do ACI.

4.2.2.1. Resistência à compressão do concreto

A resistência à compressão do concreto, (f_c), das vigas testes obteve-se seguindo as indicações da norma NBR-5739 “Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos”. Confeccionaram-se por cada uma das vigas teste três corpos de prova cilíndricos, cuja geometria foi de 15 cm e 30 cm de diâmetro e altura, respectivamente (Figura 4.4a). A média das resistências dos três cilindros de cada viga ensaiada é mostrada em unidades de MPa na Tabela 4.3.

4.2.2.2. Resistência à tração

A resistência à tração do concreto (f_{ct}) foi determinada achando o valor médio dos resultados de três ensaios de tração por compressão diametral, a geometria dos corpos de prova é mostrada na Figura 4.4a. Na Tabela 4.3 apresentam-se a média dos resultados obtidos, e na Figura 3.5 mostra-se a montagem geral do ensaio.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.4 – Ensaio a compressão simples. (a) Geometria de corpo de prova, (b) corpo de prova ensaiado à compressão simples, (c) Montagem geral de ensaio de compressão simples do concreto.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de compressão simples e compressão diametral do concreto.

Viga	Idade (dias)	f_c (N/mm ²)	f_{ct} (N/mm ²)
V1-1	120	37.3	3.13
V1-2	120	37.51	3.08
V1-3	145	39.25	3.22
V2-1	125	36.21	3.25
V2-2	120	34.01	3.03
V2-3	120	32.13	2.92
V3-1	120	37.2	3.40
V3-2	120	39.24	3.59
V3-3	120	36.19	3.31

Nota: A nomenclatura usada é explicada na seção 3.3.2.

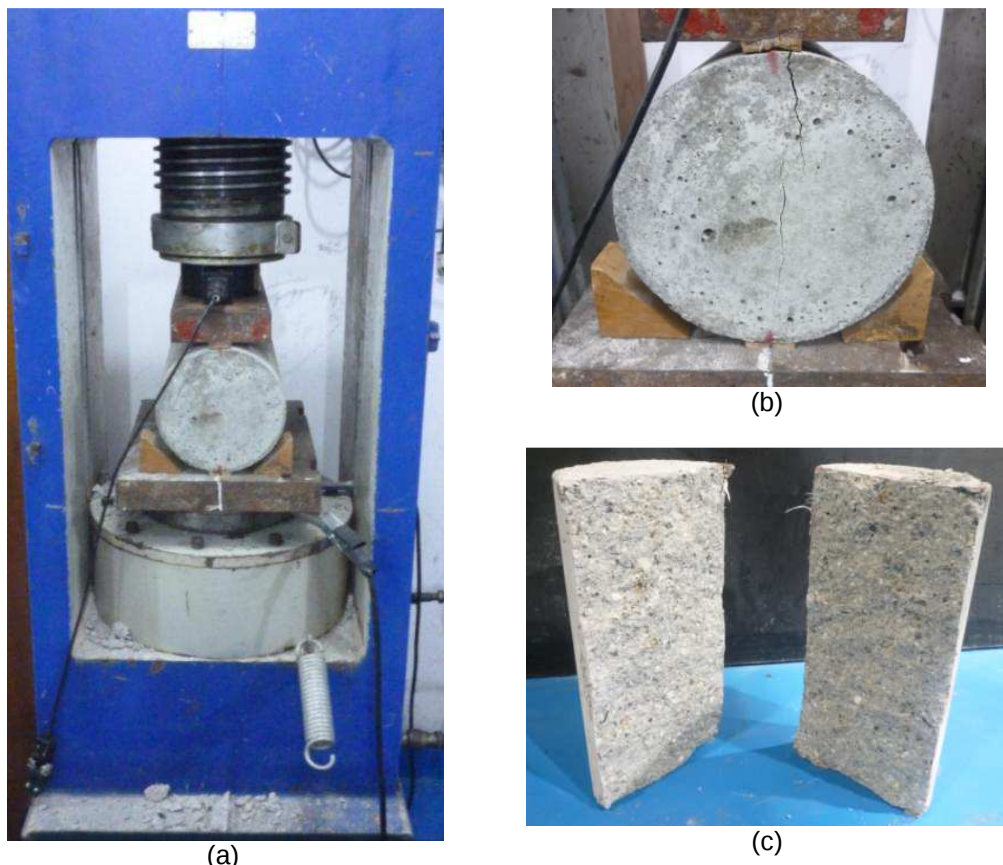


Figura 4.5 – Ensaio de compressão diametral do concreto (a) Montagem geral do ensaio, (b) Fendilhamento do corpo de prova, (c) Corpo de prova ensaiado.

4.3. Vigas Parede Ensaeadas

4.3.1. Carga vs. Deslocamento

A informação registrada pelos transdutores de deslocamento com respeito à carga aplicada nas vigas teste é mostrada nas Figuras 4.6 a 4.14.

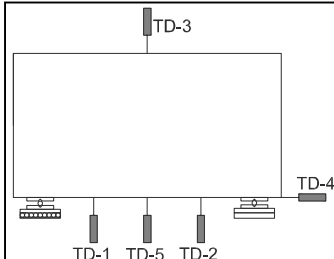
Nota-se de maneira geral que existe um comportamento padrão no deslocamento das vigas dos grupos V1, V2 e V3, pois aparecem dois estágios elásticos definidos pela primeira fissura nas vigas, que é facilmente detectada no primeiro ponto de inflexão da curva de deslocamento do transdutor localizado na face lateral (*TD 4*). Nota-se que o primeiro estágio corresponde à viga sem fissurar, apresentando uma taxa de variação do deslocamento com respeito à carga aplicada menor que a taxa de variação do segundo trecho da curva que obedece ao estágio fissurado. Esclarece-se que as diferentes perturbações presentes no segundo estágio são devidas ao progressivo rompimento das fibras do bambu e da posterior acomodação da estrutura. Na Figura 4.14 se vê a curva carga vs.

deslocamentos da viga V4 (reforçada com aço). Nesta, da mesma forma que no trabalho de Guimarães (1982), evidenciam-se três estágios relacionados estreitamente com a ductilidade do aço, isso será mais bem explicado na seção 4.3.2.

Quanto aos valores de deslocamentos obtidos, tomou-se como referência as leituras do transdutor de deslocamento cinco (TD 5), ver a Tabela 4.4, localizado na face inferior, no centro do vão das vigas. Pode-se observar que para a carga de 20 Ton. (Viga sem fissuração) as leituras nas vigas testadas são similares, pois, varia entre 0.8 mm e 1.3mm. Os deslocamentos quando a carga é de 40 Ton., que não é muito maior com respeito à carga de aparição da primeira fissura, variam pouco entre as vigas do ensaio, porém, começa a se identificar nas leituras algumas diferenças entre os grupos de vigas, como a influência da armadura de alma sobre os deslocamentos das vigas dos grupos V1, V3 e V4 que variam entre 1.8 mm e 2.2 mm com respeito aos deslocamentos das vigas do grupo V2 que variam entre 2.6 mm e 3.3 mm. Para a carga de 60 Ton., observa-se que as vigas do grupo V3, que apresentam armadura de alma e maior taxa de reforço principal em bambu, mostram valores de deslocamentos menores com relação aos valores das vigas do grupo V1, que apresentam a mesma taxa de armadura de alma, entretanto, menor taxa de reforço principal. Observa-se que entre as cargas de 80 Ton. e 100 Ton. a variação dos deslocamentos da viga V4, de 7.5mm, é muito superior com respeito à variação dos deslocamentos das vigas do grupo V3, de 3.4 mm e de 1.6 mm. Indicando então, que antes da ruptura da viga V4 se geraram grandes deformações do reforço e consequentemente maiores deslocamentos, caso que não acontece com as vigas reforçadas com bambu.

Tabela 4.4 - Registros do transdutor de deslocamento cinco (TD 5).

Carga (Ton)	Vigas								
	V1-2 (mm)	V1-3 (mm)	V2-1 (mm)	V2-2 (mm)	V2-3 (mm)	V3-1 (mm)	V3-2 (mm)	V3-3 (mm)	V4 (mm)
20	0.9	1.2	1.1	1.3	0.8	1.1	1.1	0.9	1.1
40	2.1	2.2	2.6	3.3	2.6	2.1	1.9	2.1	1.8
60	4.2	4.8	4.5	-	-	3.3	3.4	3.8	3.1
80	-	-	-	-	-	5.3	4.8	-	4.8
100	-	-	-	-	-	8.7	6.4	-	12.3



As leituras dos transdutores de deslocamento TD-3 e TD-5, nas Figuras 4.6 a 4.14, teoricamente devem ser iguais, contudo, o uso de resina plástica para

nivelar o sistema de chapas para a aplicação de carga no bordo superior da viga parede influencia nas leituras de deslocamento do transdutor TD-3, pois, durante o ensaio existe um processo inicial de acomodação da estrutura que é afetado pelas propriedades mecânicas da resina plástica usada. Nota-se nas Figuras 4.6 a 4.14, que a máxima diferença entre as leituras do transdutor de deslocamento TD-3 e o transdutor de deslocamento TD-5 é de 1.4mm que corresponde à viga parede V1-3.

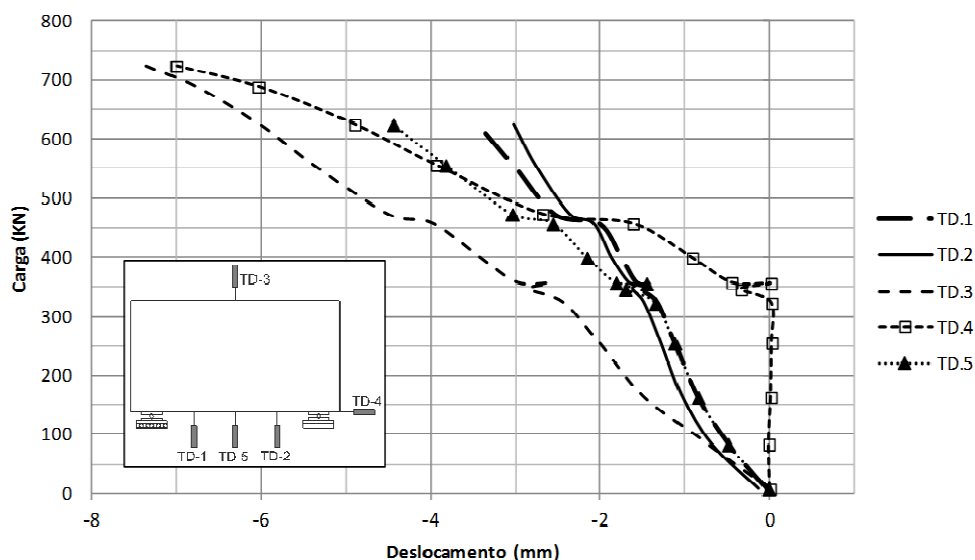


Figura 4.6 - Carga vs. Deslocamento – Viga V1-2.

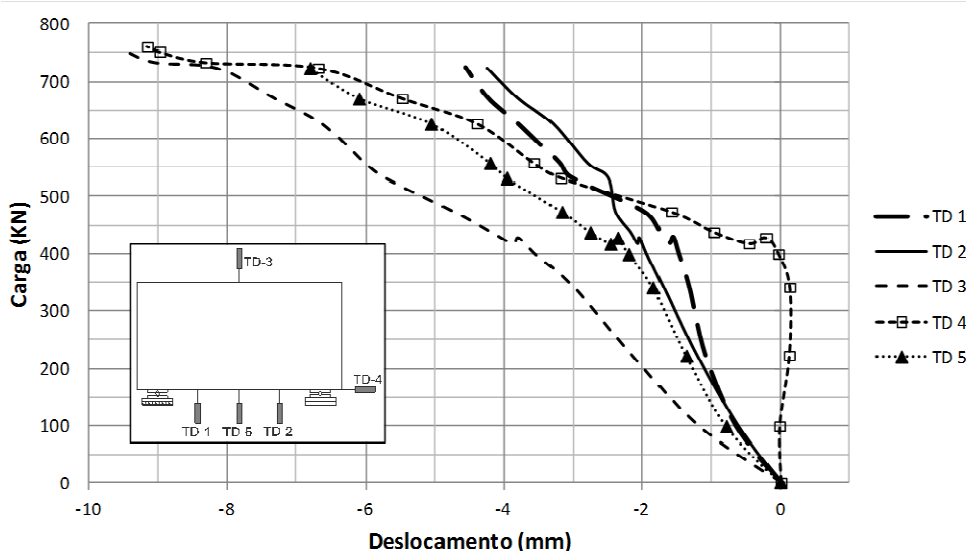


Figura 4.7 - Carga vs. Deslocamento – Viga V1-3.

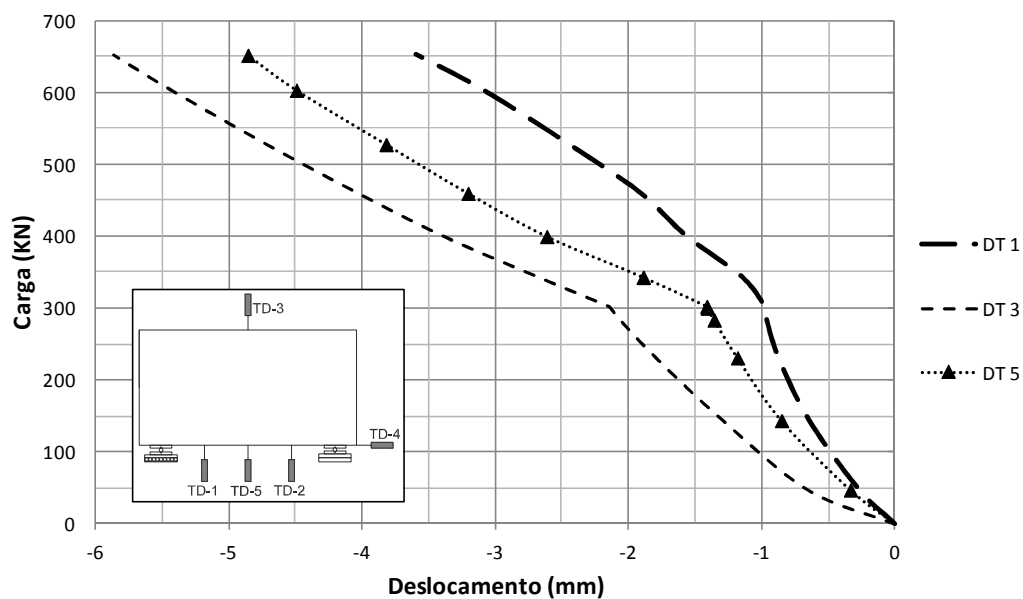


Figura 4.8 - Carga vs. Deslocamento – Viga V2-1.

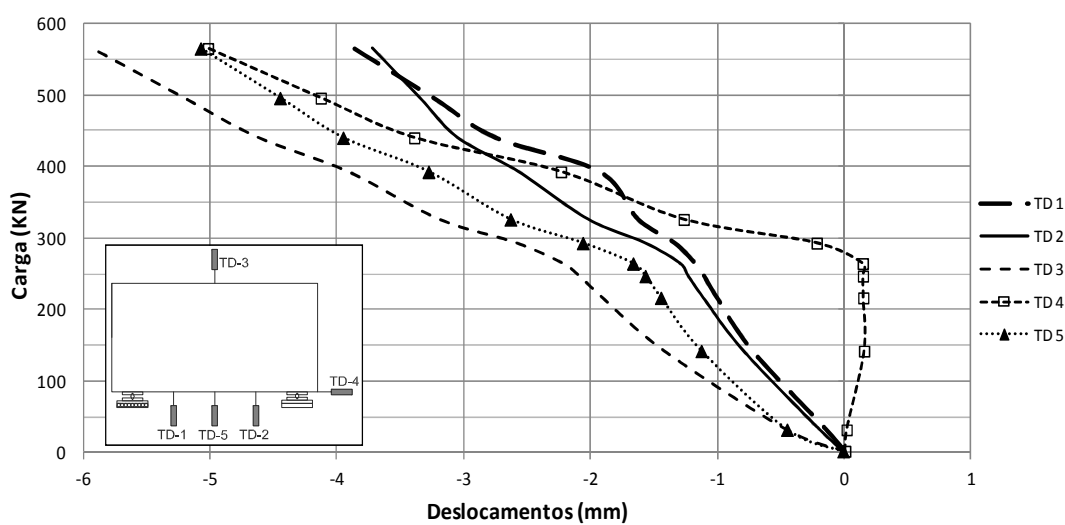


Figura 4.9 - Carga vs. Deslocamento – Viga V2-2.

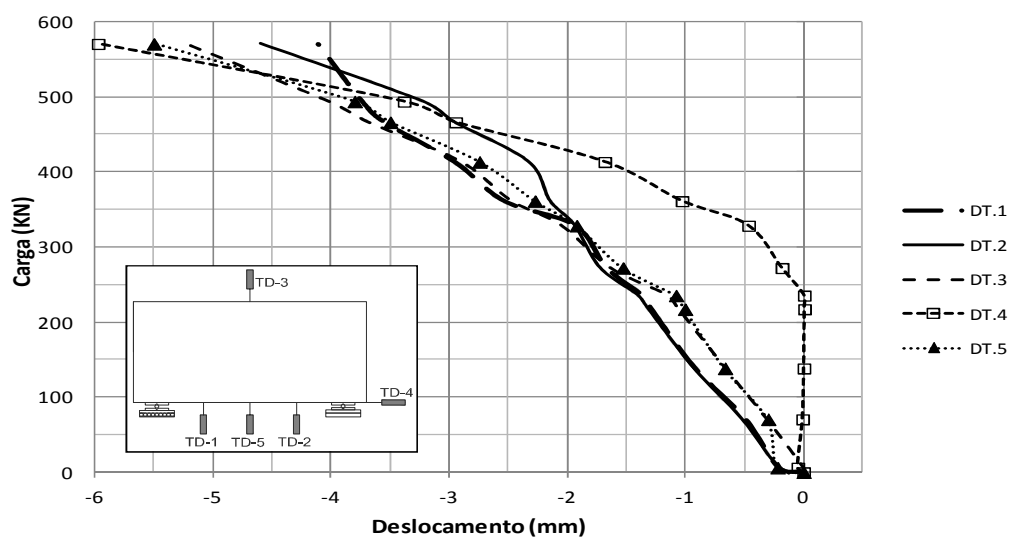


Figura 4.10 - Carga vs. Deslocamento – Viga V2-3.

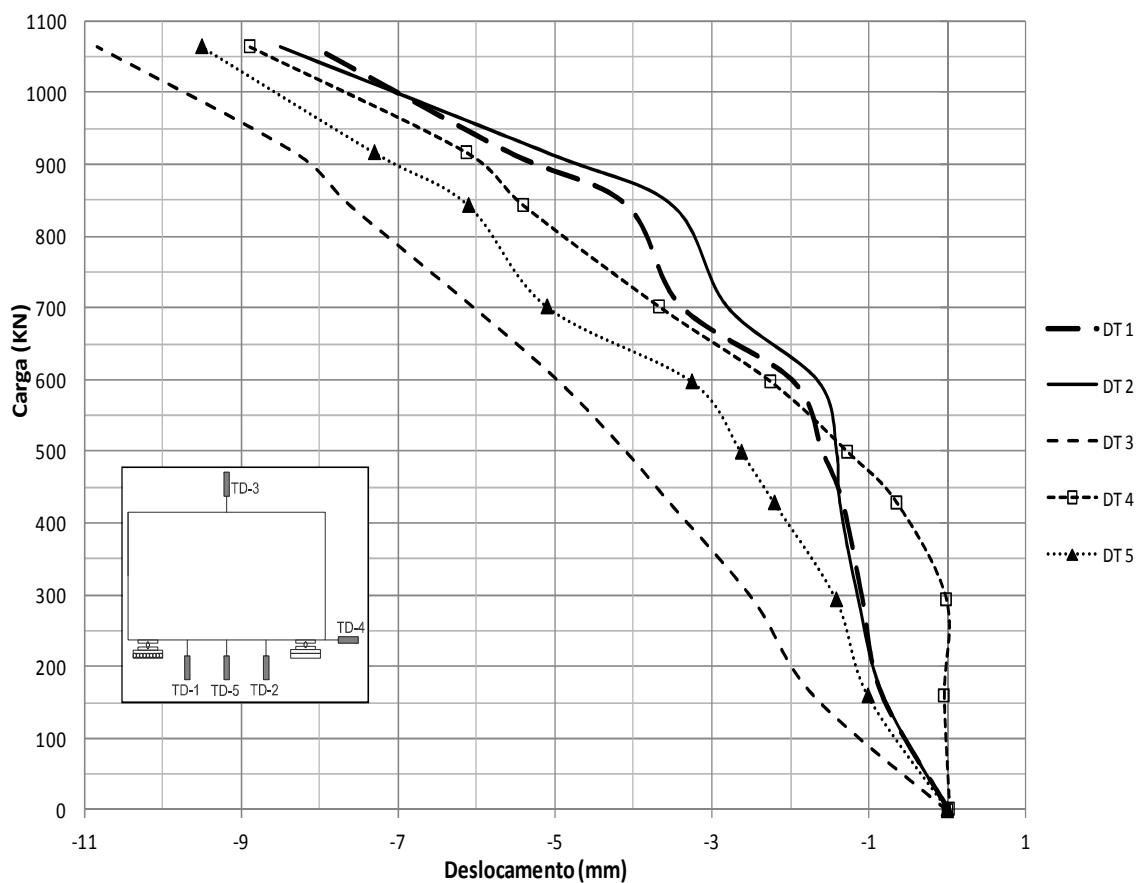


Figura 4.11 - Carga vs. Deslocamento – Viga V3-1.

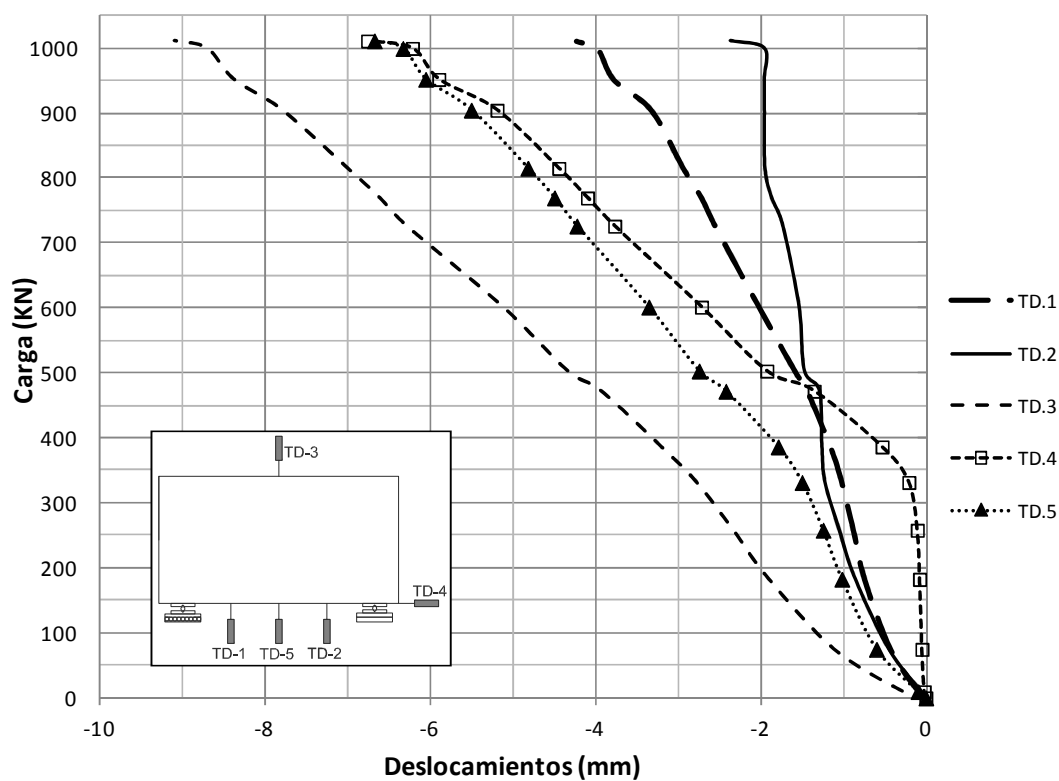


Figura 4.12 - Carga vs. Deslocamento – Viga V3-2.

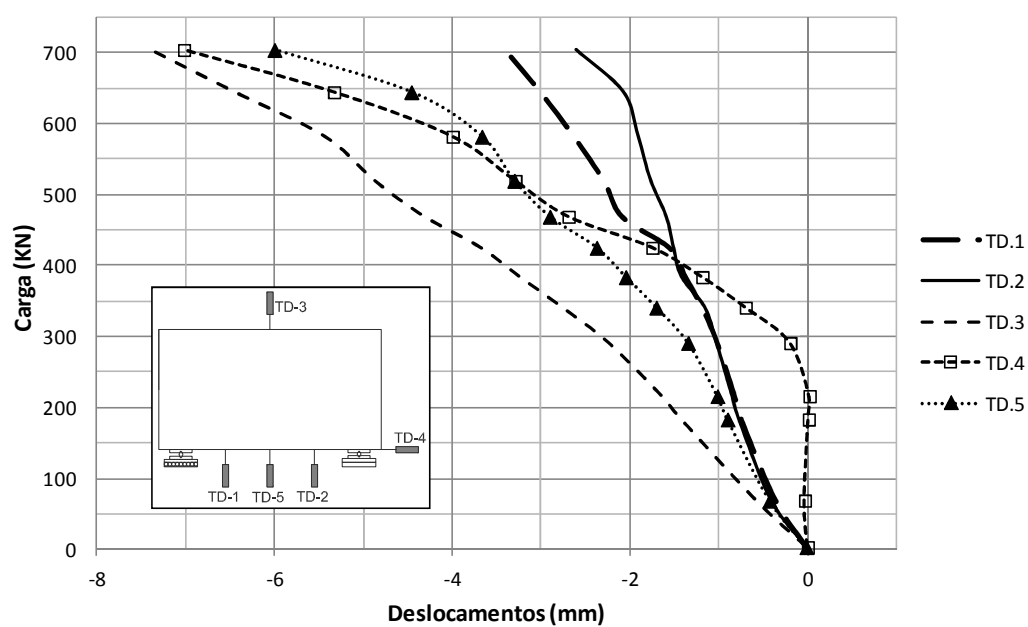


Figura 4.13 - Carga vs. Deslocamento – Viga V3-3.

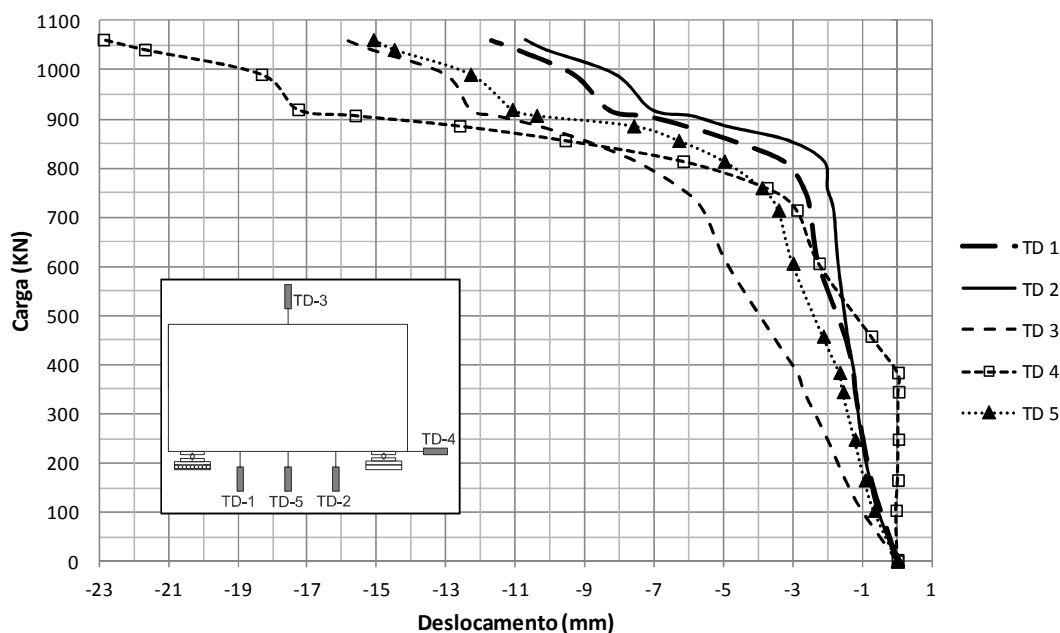


Figura 4.14 - Carga vs. Deslocamento – Viga V4.

4.3.2. Carga vs. Deformação

4.3.2.1. Carga vs. Deformação no reforço principal.

Nas Figuras 4.15 a 4.23 se esquematiza as curvas de deformação do reforço principal, em um ponto central do vão, com relação à carga aplicada nas vigas. A posição dos extensômetros é indicada com um diagrama em cada Figura.

Nota-se nas curvas Carga vs. Deformação, Figuras 4.15 a 4.23, um patamar que surge quando aparece a primeira fissura nas vigas, que ocorre entre 25 Ton. e 30 Ton. para as vigas V2 e entre 30 Ton. e 40 Ton. para as vigas V1, V3 e V4.

Como se mencionou na seção 4.3.1, o comportamento das vigas foi marcadamente influenciado pelo comportamento do reforço usado. Tanto para a viga reforçada com aço como as reforçadas com bambu, pode-se ver nas curvas de Carga vs. Deslocamento e Carga vs. Deformação, que existem dois estágios gerais, não fissurado e fissurado. No primeiro, apresenta-se no material de reforço uma pequena variação da deformação com respeito ao acréscimo de carga, devido à resistência das tensões serem realizadas pela matriz do concreto e não pelo reforço. E no segundo estágio (viga fissurada), no caso do bambu, o comportamento pode ser considerado elástico até a ruína. Entretanto, o comportamento para as vigas reforçadas com aço no segundo estágio está subdividido em dois: elástico e plástico, pois o aço depois da fissuração da viga,

continua no regime elástico até atingir a carga de escoamento, de 80 Ton. aproximadamente na viga V4, que da início ao regime plástico do material, ver a Figura 4.23.

Observa-se também nas Figuras 4.15 a 4.23, que imediatamente depois do surgimento da primeira fissura, ocorrem no material de reforço grandes deformações em virtude da transferência das tensões para a armadura que eram resistidas pelo concreto. Em seguida, com o acréscimo de carga, a inclinação das curvas aumenta dependendo das características do material do reforço, que no caso do bambu, e a diferença do aço que é um material industrializado, pode apresentar maior dispersão no seu comportamento.

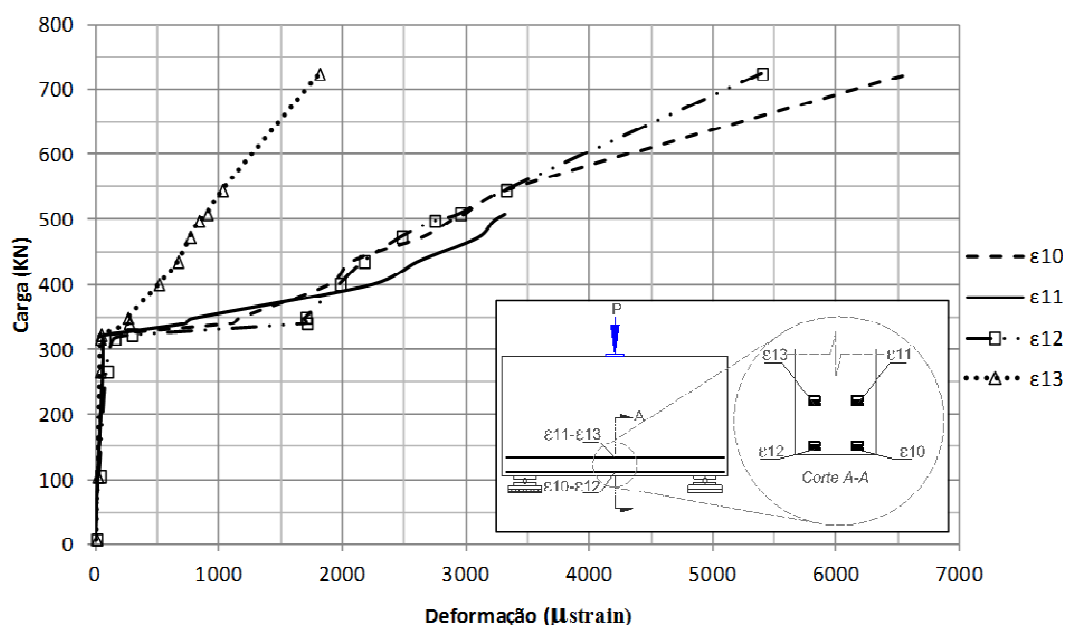


Figura 4.15 – Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V1-2.

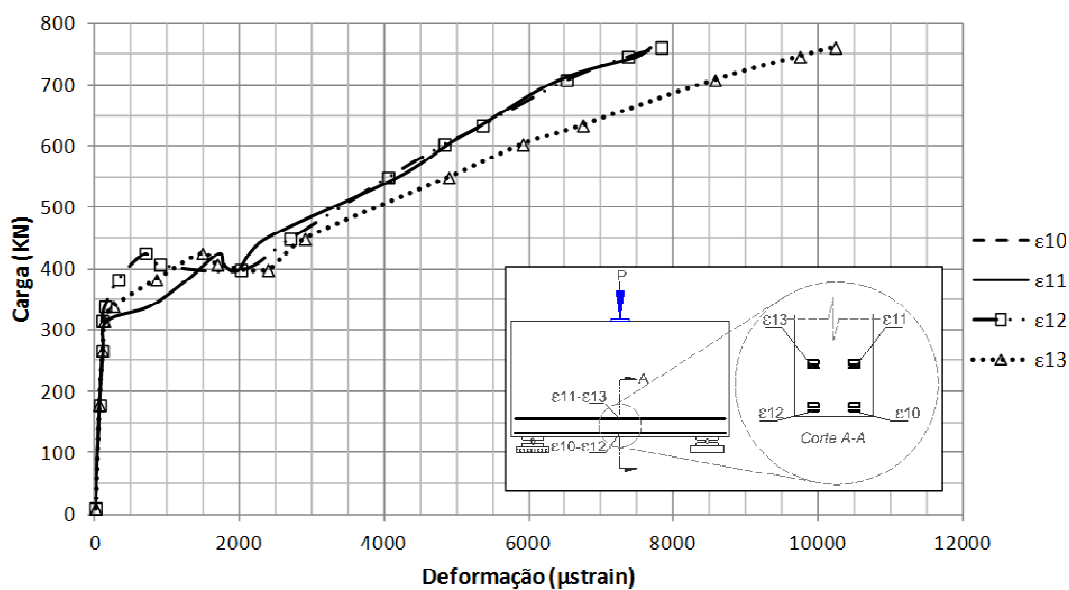


Figura 4.16 - Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V1-3.

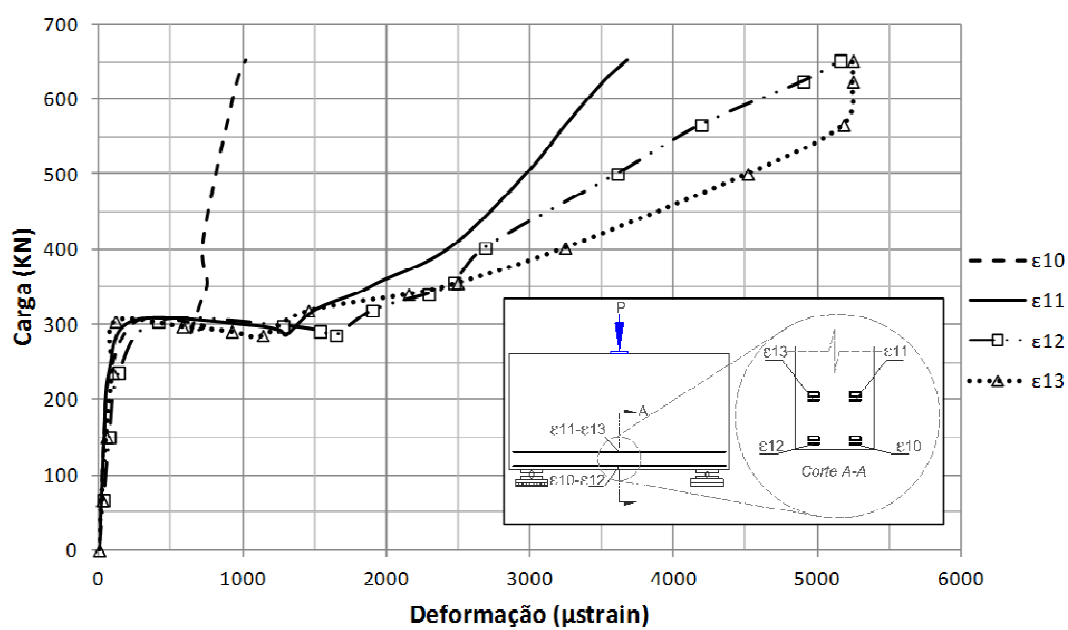


Figura 4.17 - Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V2-1.

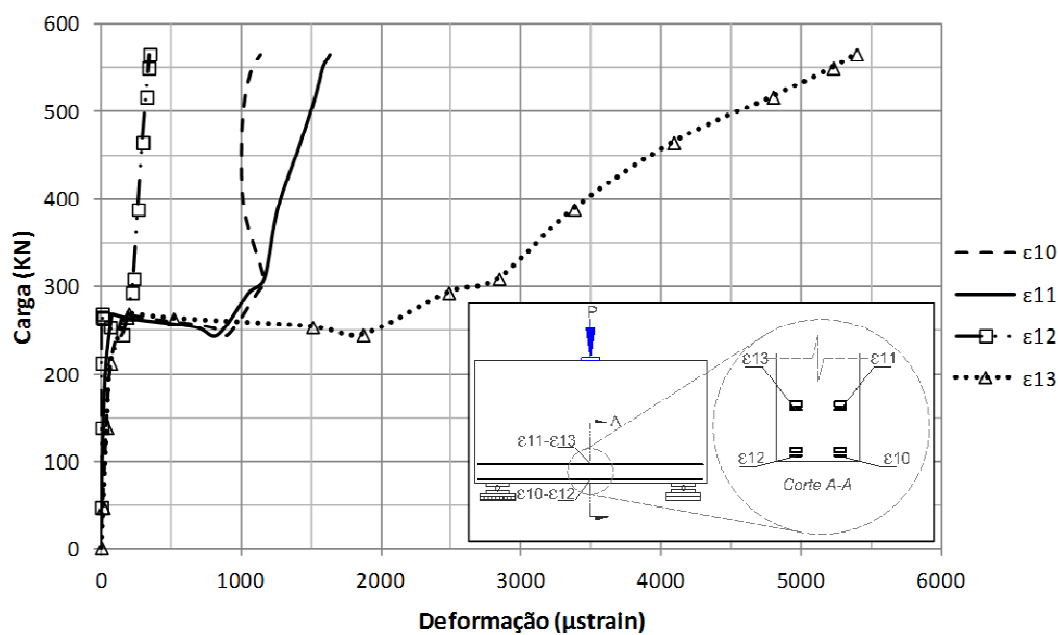


Figura 4.18 - Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V2-2.

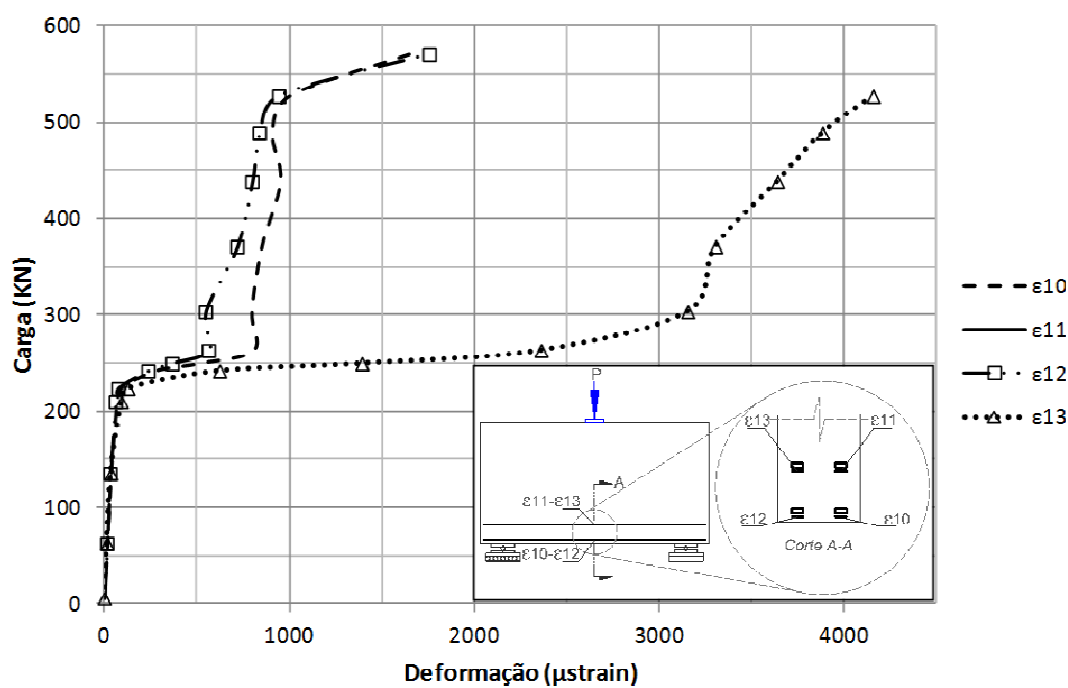


Figura 4.19 - Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V2-3.

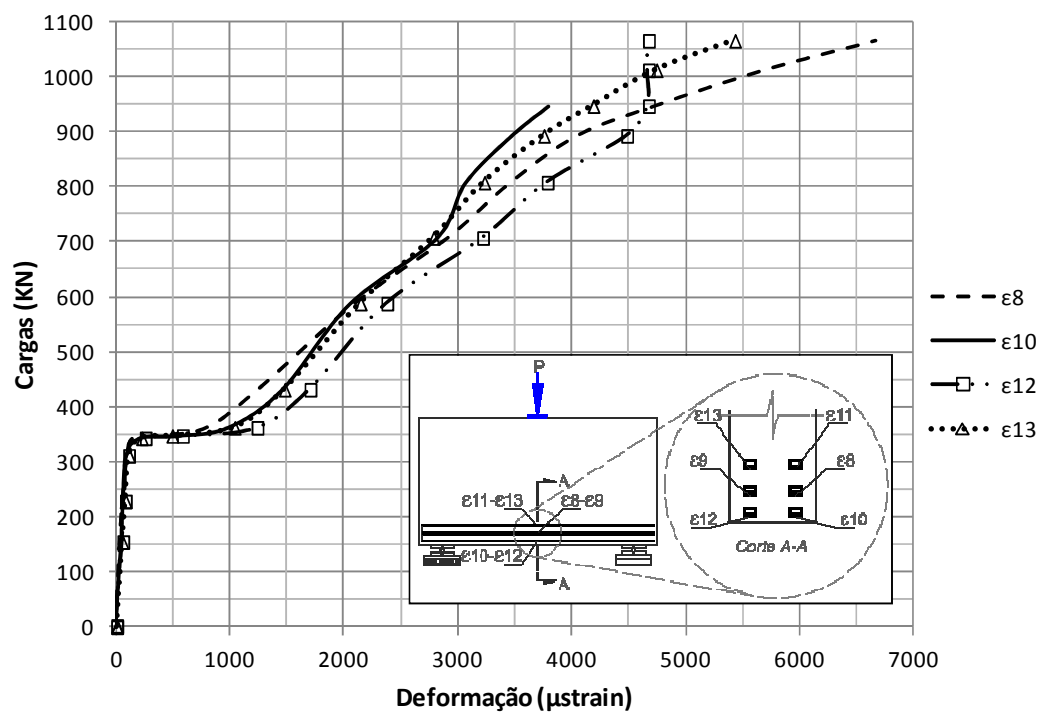


Figura 4.20 - Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V3-1.

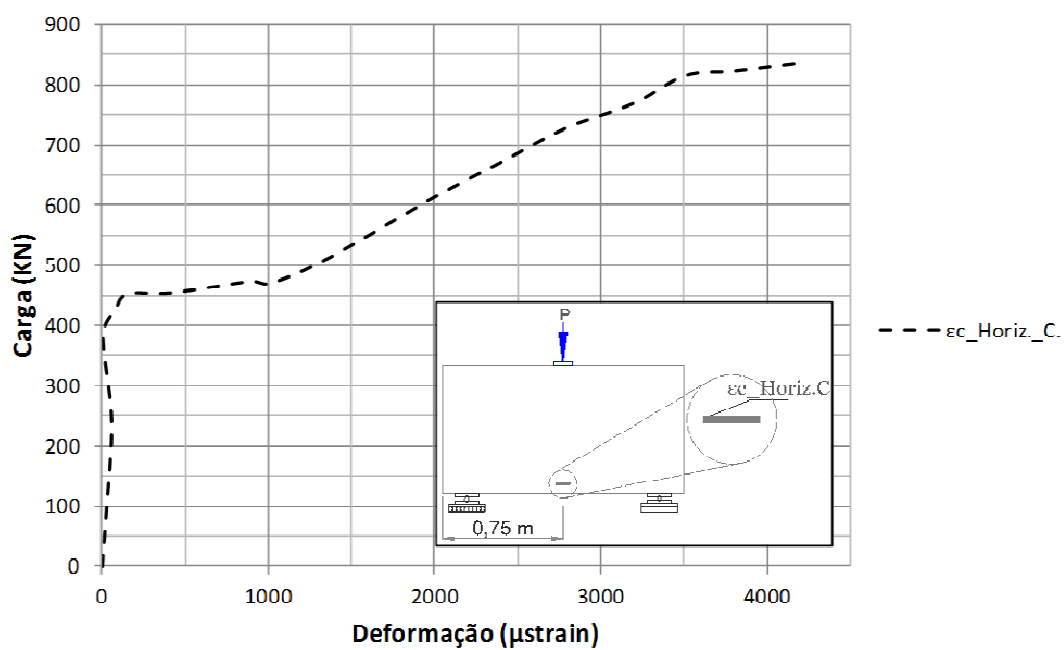


Figura 4.21 - Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V3-2.

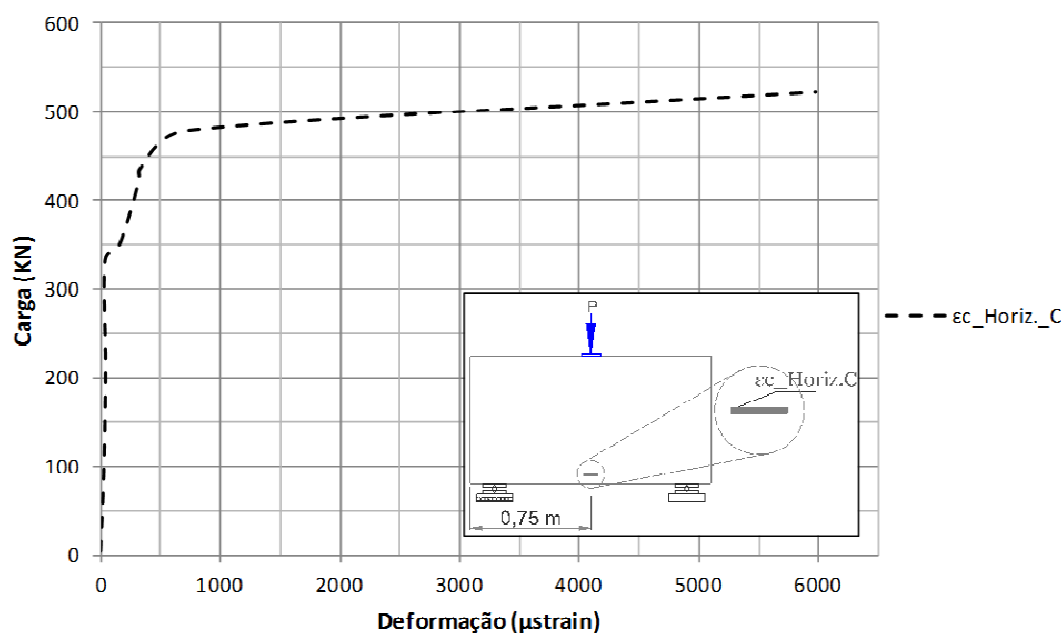


Figura 4.22 - Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V3-3.

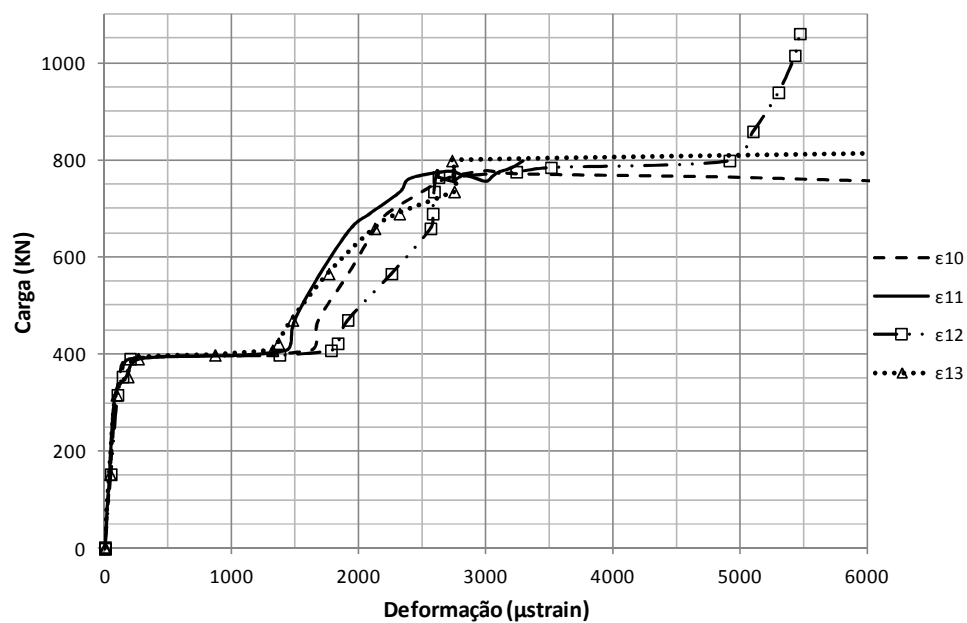


Figura 4.23 - Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V4.

4.3.2.2. Carga vs. Deformação no concreto

Instalou-se na face frontal da viga extensômetros em três direções, vertical, horizontal e diagonal a 45° com respeito à horizontal, localizados no centro da biela formada entre o ponto de aplicação de carga e o apoio da viga, como é mostrado no diagrama adjunto nas Figuras 4.24 a 4.32.

Nessas Figuras é observado que as três curvas apresentam um trecho inicial linear até aparecer a primeira fissura na viga, que produz uma redistribuição das tensões, gerando perturbação nas deformações. Quando a estrutura assume o novo mecanismo de resistência, a perturbação apresentada nas deformações se estabiliza, continuando com o aumento da deformação à medida que a carga é acrescentada.

Nota-se nas Figuras 4.24 a 4.32, que o extensômetro diagonal a 45° apresenta maior deformação com respeito aos extensômetros vertical e horizontal, e que para a carga de 20 Ton. (estágio não fissurado) a leitura desse extensômetro foi de 30 μ strain a 40 μ strain, com exceção das vigas V1-3 e V3-2, que tiveram respectivamente deformações de 20 μ strain e 57 μ strain. Logo da primeira fissura, a análise dos resultados de deformações é mais laboriosa, pois, com cada nova fissura no concreto, as tensões nas bielas da viga se redistribuem causando perturbações nas leituras de deformação, que se não são levadas em conta, pode-se observar que para os valores de deformação do extensômetro diagonal, a curva tende a manter a mesma inclinação do trecho inicial (estágio não fissurado). Por outro lado, vê-se que o extensômetro horizontal apresentou as menores deformações, indicando que as deformações registradas pelo extensômetro vertical, terão um comportamento (não quantitativo) similar às deformações registradas pelo extensômetro diagonal a 45°.

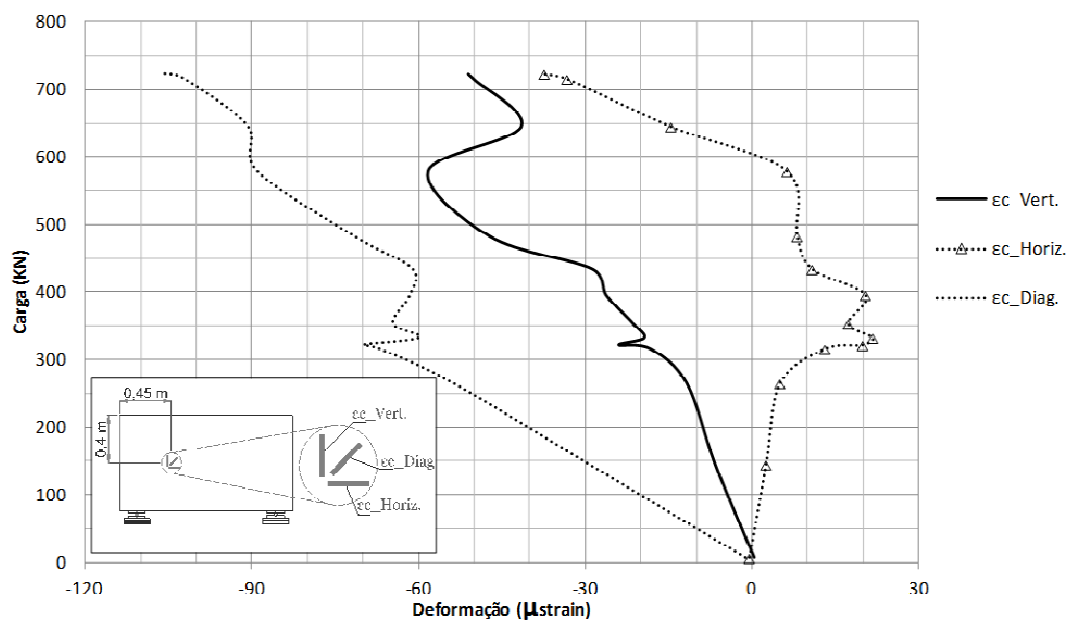


Figura 4.24 – Carga vs. Deformação do concreto – Viga V1-2.

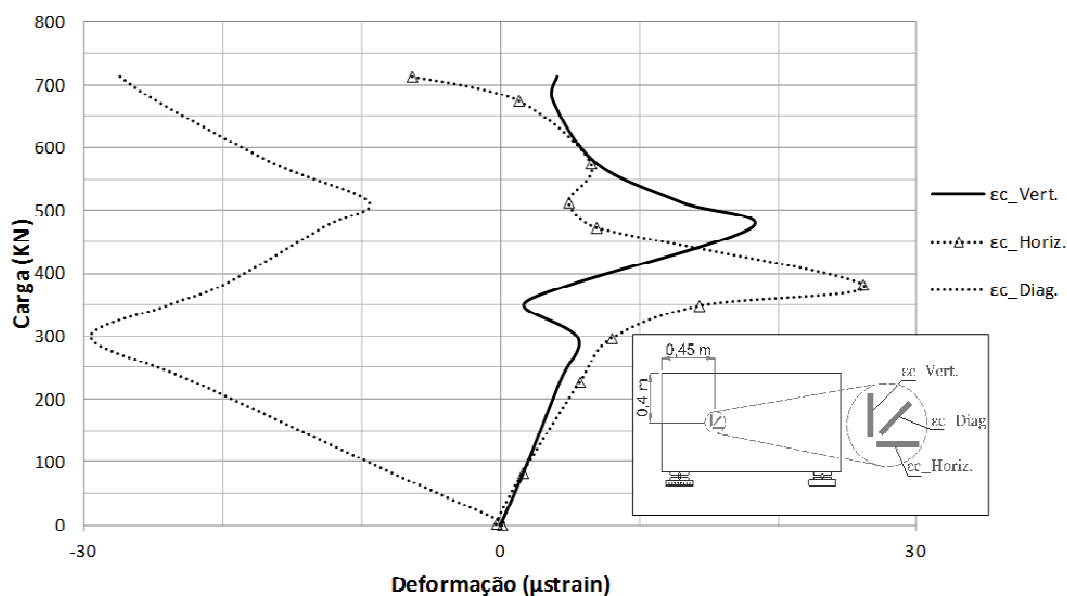


Figura 4.25 - Carga vs. Deformação do concreto – Viga V1-3.

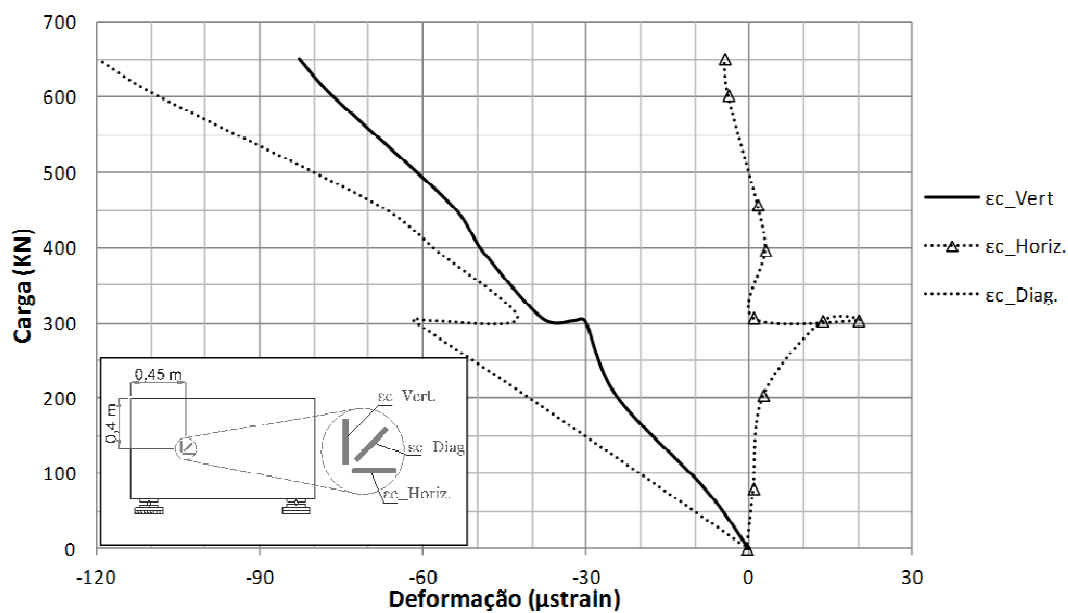


Figura 4.26 - Carga vs. Deformação do concreto – Viga V2-1.

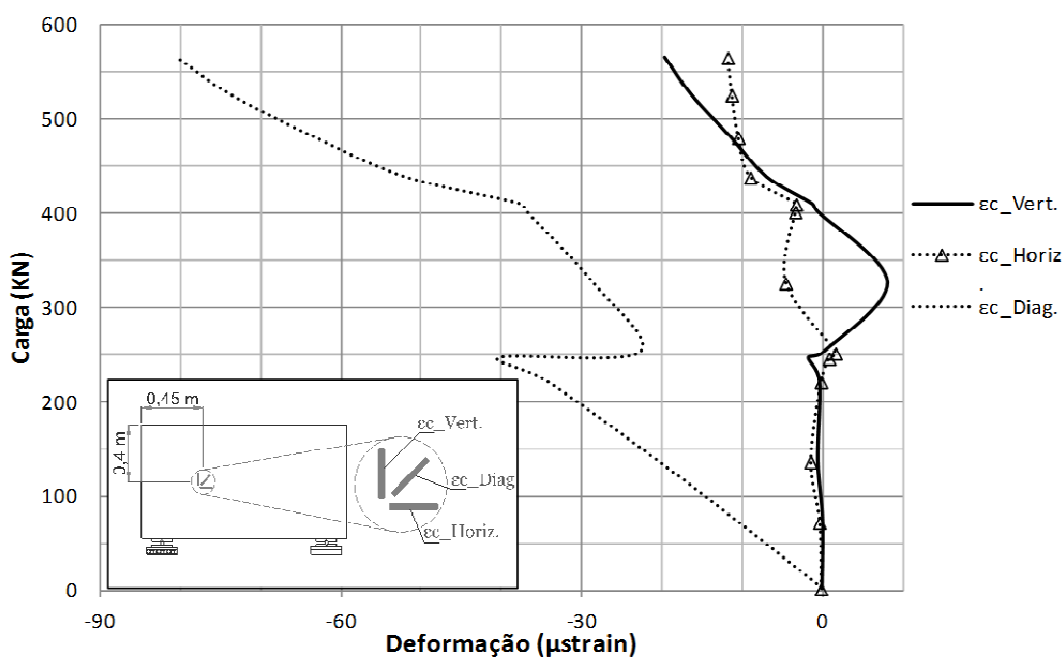


Figura 4.27 - Carga vs. Deformação do concreto – Viga V2-2.

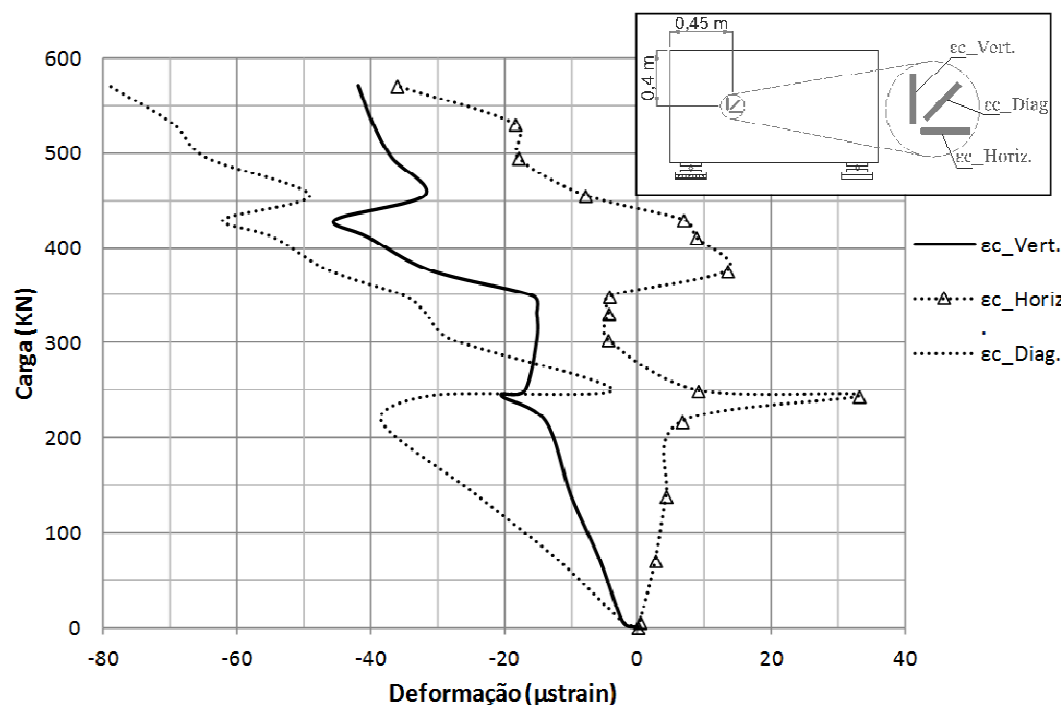


Figura 4.28 - Carga vs. Deformação do concreto – Viga V2-3.

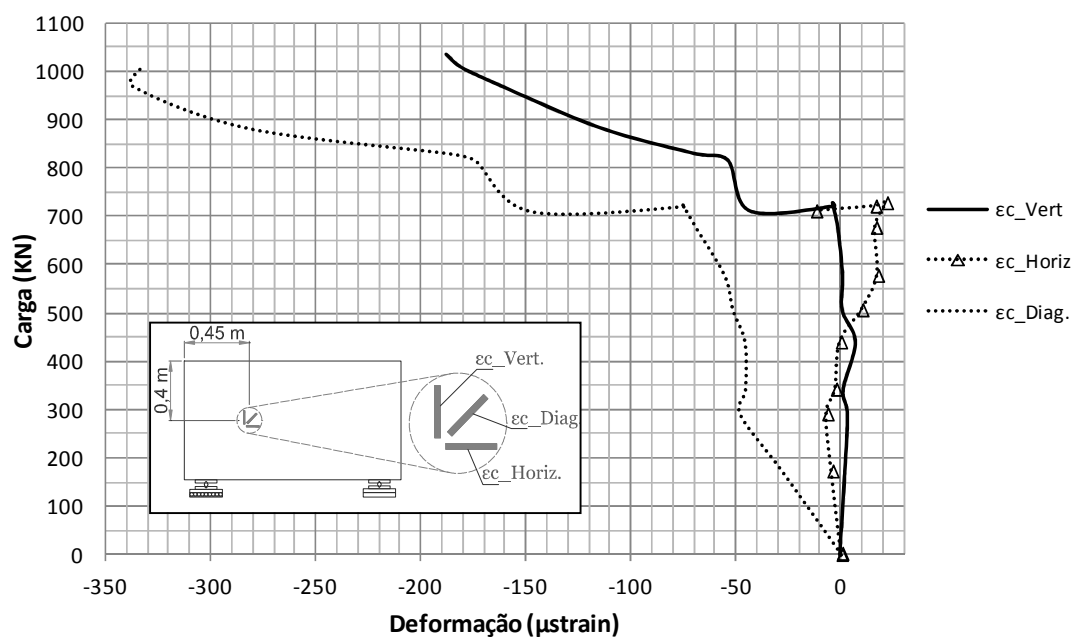


Figura 4.29 - Carga vs. Deformação do concreto – Viga V3-1.

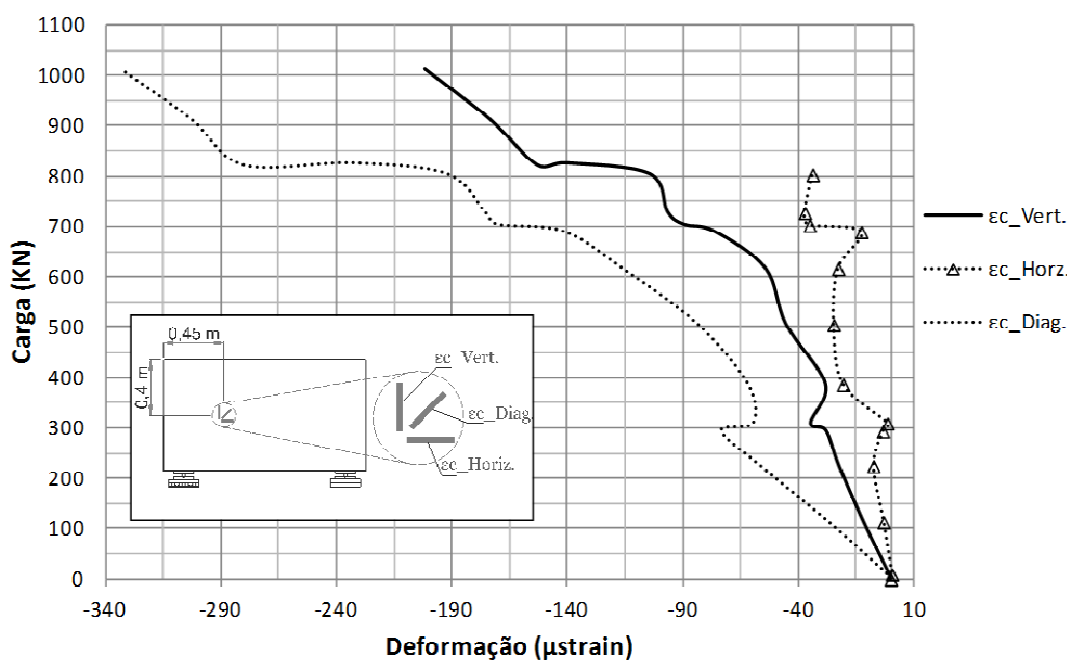


Figura 4.30 - Carga vs. Deformação do concreto – Viga V3-2.

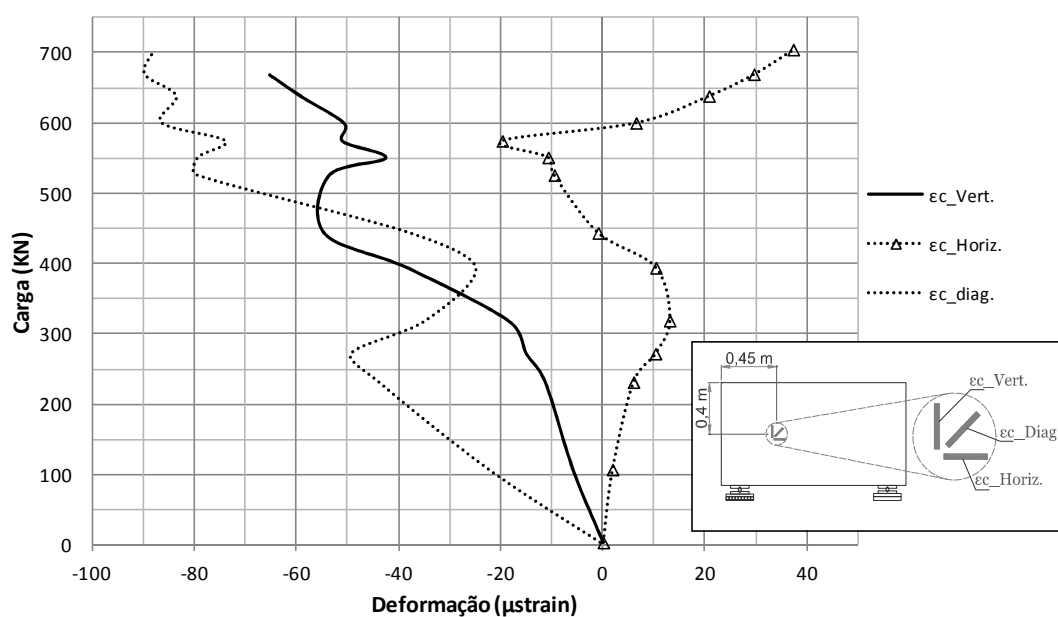


Figura 4.31 - Carga vs. Deformação do concreto – Viga V3-3.

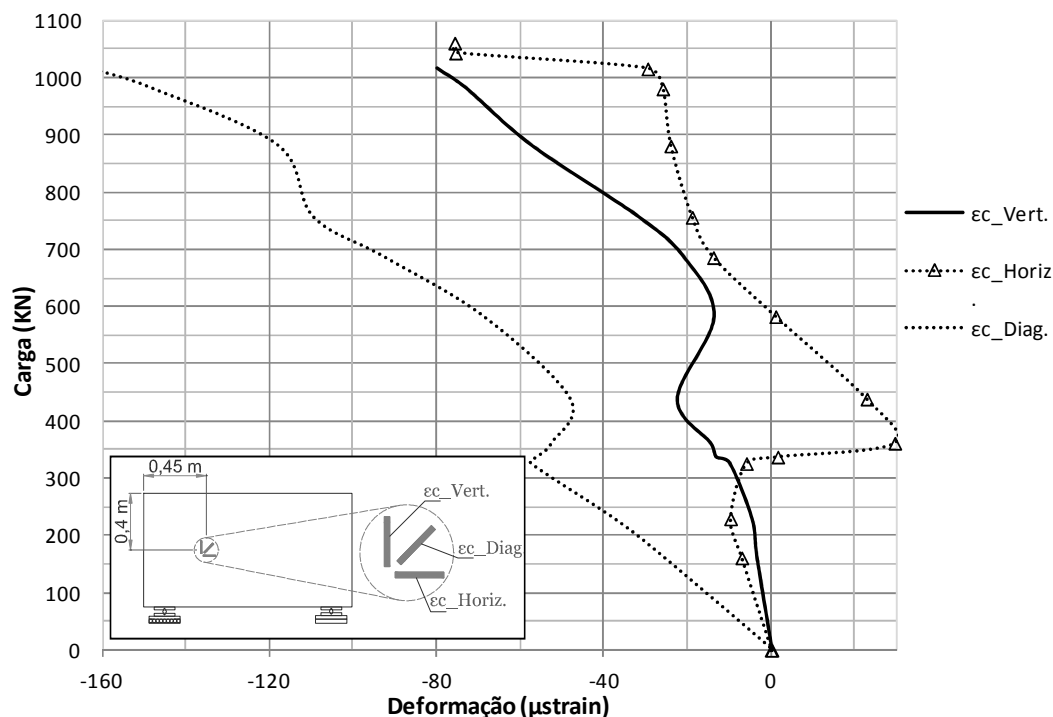


Figura 4.32 - Carga vs. Deformação do concreto – Viga V4.

4.3.3. Abertura de fissuras

O processo de fissuração das vigas durante os ensaios foi acompanhado mediante leituras de abertura das fissuras originadas com o acréscimo do carregamento. Para isso, as vigas foram divididas em três zonas, como é mostrado na Figura 4.33, onde cada zona é diferenciada com um (Z) mais um número que define uma região de flexão (Z2) e duas regiões de cisalhamento (Z1 e Z3). Essa denominação se usará no transcorrer do capítulo.

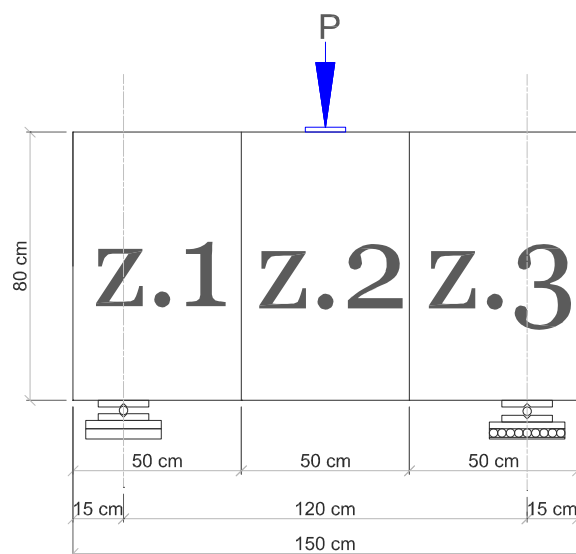


Figura 4.33 – Zonas de flexão e cisalhamento na viga.

Nas Figuras 4.34 a 4.41 são mostradas as curvas Carga vs. Abertura de fissura, cujo comportamento para as vigas reforçadas com bambu (grupos V1, V2 e V3) é segmentado, especialmente em aquelas que apresentaram armadura de alma e maior taxa de armadura principal, vigas do grupo V3. Esse comportamento se deve à ação da armadura de alma e seu escorregamento dentro da matriz de concreto, além da abrupta ruptura das fibras do bambu usado como reforço principal. Nota-se também nas Figuras 4.34 a 4.41, que as primeiras fissuras que surgem nas vigas são as de flexão, quer dizer, as da zona central da viga, zona dos (Z2).

Para maior facilidade da análise da informação, apresentam-se as Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7. A Tabela 4.5 mostra a carga de surgimento das fissuras, tanto nas zonas de cisalhamento (Z1 e Z3) como na zona de flexão (Z2). Nota-se que a primeira fissura se registrou, para os grupos de vigas V1, V3 e V4, na faixa entre 30 Ton. e 35 Ton. com exceção da viga V3-3 a qual se registrou 28 Ton. Para o grupo V2, a primeira fissura foi registrada na faixa de 25 Ton. a 30 Ton. A Tabela 4.6 relaciona (em %) a carga de surgimento das primeiras fissuras, para as zonas de flexão e cisalhamento (Z1, Z2 e Z3), com a carga de ruptura experimental. Nota-se que para as vigas V1, que apresentam armadura de alma e tem a taxa de armadura principal igual a 1%, a média da relação carga de fissuração e carga de ruptura, para as primeiras fissuras nas zonas um (Z1) e dois (Z2), é de 61.6% e 46.2%, respectivamente, sendo similares aos valores médios das vigas do grupo V2, 60.4% para a zona um (Z1) e 45.3% para a zona dois (Z2). Sabe-se que as vigas do grupo V2 não apresentam armadura de alma e sua taxa de reforço principal é de 1.2%, maior que a taxa das vigas V1. Com isso se demonstra que a armadura de alma no controle de fissuração tem um papel importante, e que é corroborado com a Tabela 4.7, onde se apresenta a abertura de fissuras nas três zonas da viga (Z1, Z2 e Z3) para uma carga 50 Ton. Nessa tabela pode-se ver que a abertura de fissuras (em mm) das vigas do grupo V2 são superiores às aberturas de fissuras das vigas V1, V3 e V4. Também chama a atenção na Tabela 4.7 que para a carga de 50 Ton. a média das aberturas das vigas V3 e da viga V4 é igual, com exceção da zona dois (Z2).

Tabela 4.5 – Cargas de fissuração e abertura máxima de fissuras.

Viga	Carga de inicial de fissuração (Ton.)			Carga de Ruptura (Ton)	Abertura máxima de fissura (mm)		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3		Zona 1	Zona 2	Zona 3
V1-1	46.0	35.0	47.0	73.3	1.1	2.0	0.9
V1-2	46.0	34.0	42.0	76.1	1.4	2.7	1.6
V2-1	38.0	30.0	44.0	65.2	0.9	3.0	1.1
V2-2	32.0	26.0	30.0	56.5	1.7	2.4	1.8
V2-3	38.0	25.0	46.0	57.1	1.1	1.4	0.9
V3-1	48.0	34.0	50.0	106.5	1.0	1.2	0.9
V3-2	38.0	31.0	46.0	101.1	0.7	0.9	0.8
V3-3	45.0	28.0	35.0	70.4	0.6	2.9	0.5
V4	45.0	35.0	42.0	103*	2.4	3.4	2.9

*Não é carga de ruptura, pois a viga V4 não chegou a ruína..

Tabela 4.6 – Relação cargas de fissuração – Carga de ruptura.

Viga	Carga inicial de fissuração (Ton.)			Carga de Ruptura (Ton)	Relação carga de fissuração-Carga de ruptura (%)			Média da relação carga de fissuração-Carga de ruptura (%)		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3
V1-1	46.0	35.0	47.0	73.3	62.8	47.7	64.1	61.6	46.2	59.7
V1-2	46.0	34.0	42.0	76.1	60.4	44.7	55.2			
V2-1	38.0	30.0	44.0	65.2	58.3	46.0	67.5			
V2-2	32.0	26.0	30.0	56.5	56.6	46.0	53.1	60.5	45.3	67.0
V2-3	38.0	25.0	46.0	57.1	66.5	43.8	80.6			
V3-1	48.0	34.0	50.0	106.5	45.1	31.9	46.9			
V3-2	38.0	31.0	46.0	101.1	37.6	30.7	45.5	48.9	34.1	47.4
V3-3	45.0	28.0	35.0	70.4	63.9	39.8	49.7			
V4	45.0	35.0	42.0	103*	-	-	-	-	-	-

*Não é carga de ruptura, pois a viga V4 não chegou a ruína..

Tabela 4.7 – Abertura de fissuras em vigas carregadas com 50 Ton.

Viga	Abertura de fissura (mm)			Média das aberturas de fissura (mm)		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3
V1-1	0.5	1.3	0.3	0.7	1.5	0.7
V1-2	0.8	1.7	1.0			
V2-1	0.7	1.9	0.9			
V2-2	1.5	2.3	1.8	1.3	2.0	1.4
V2-3	1.6	1.9	1.6			
V3-1	0.3	0.8	0.4			
V3-2	0.4	0.5	0.4	0.4	0.6	0.4
V3-3	0.5	0.6	0.4			
V4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4

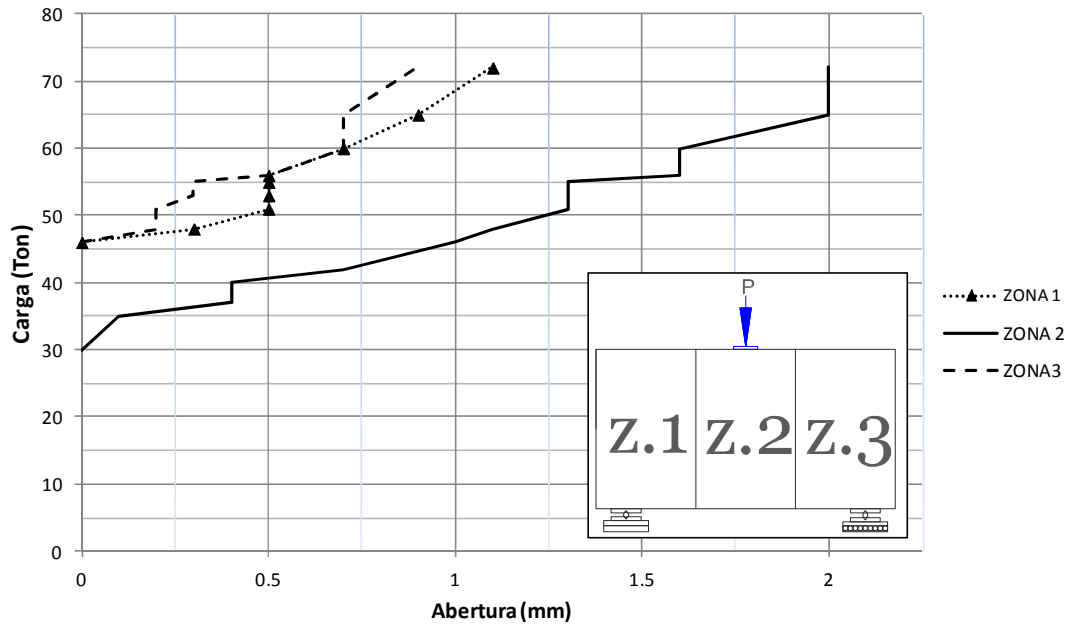


Figura 4.34 - Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V1-2.

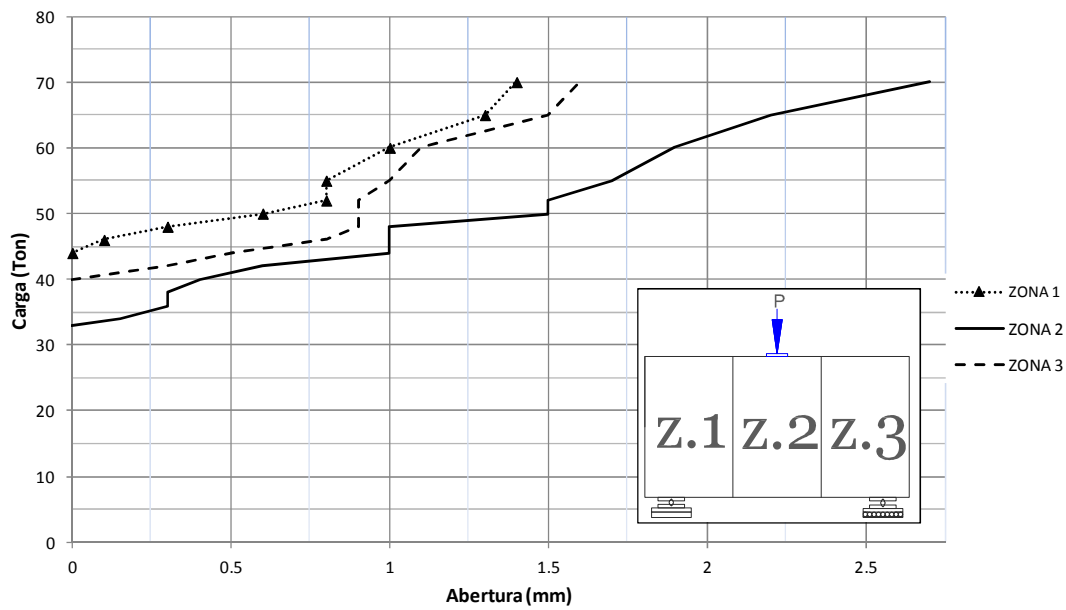


Figura 4.35 - Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V1-3.

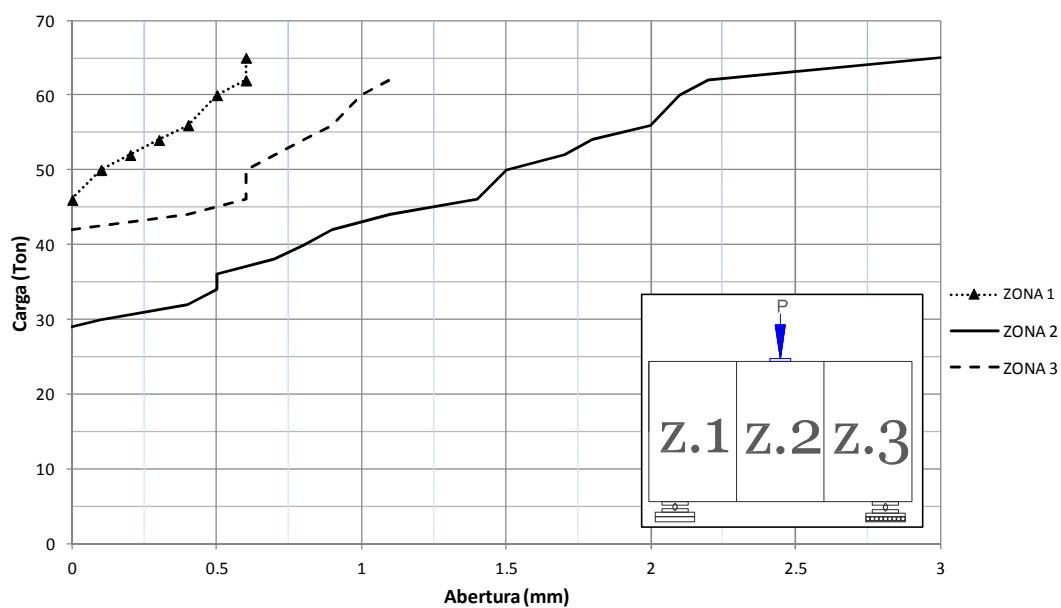


Figura 4.36 - Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V2-1.

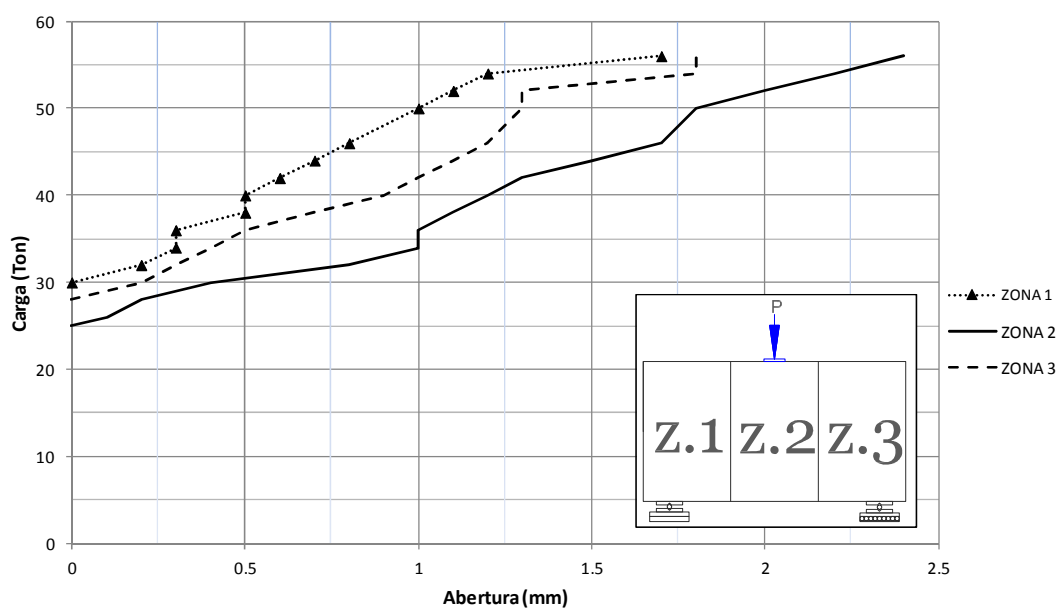


Figura 4.37 - Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V2-2.

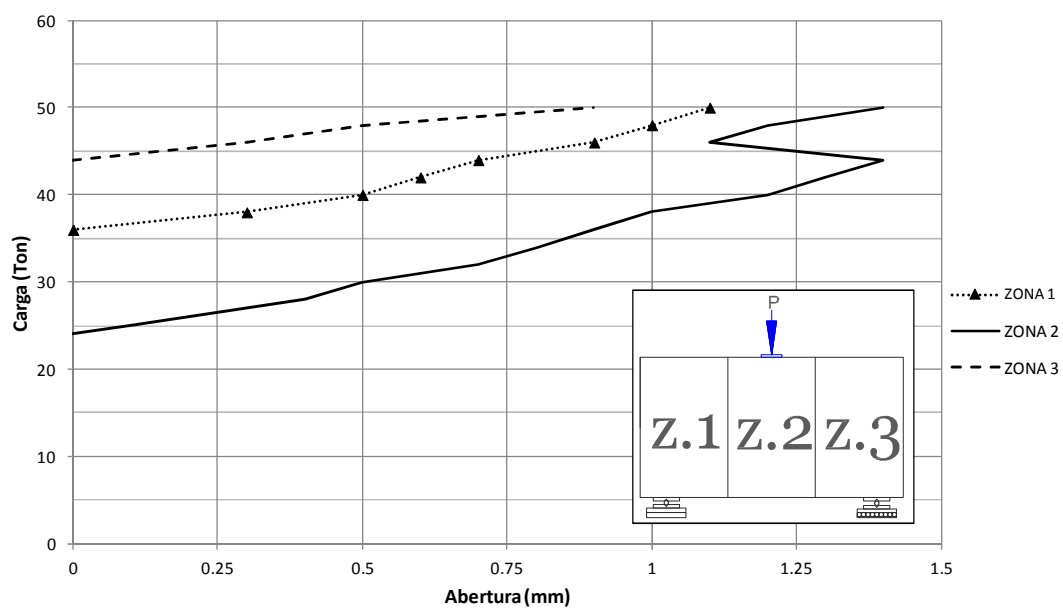


Figura 4.38 - Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V2-3.

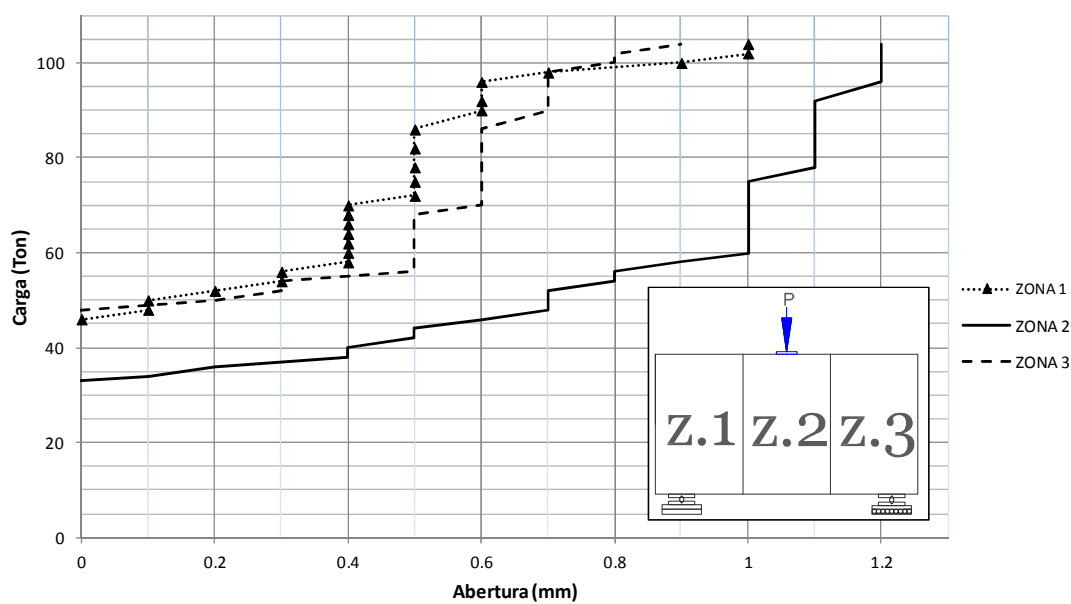


Figura 4.39 - Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V3-1.

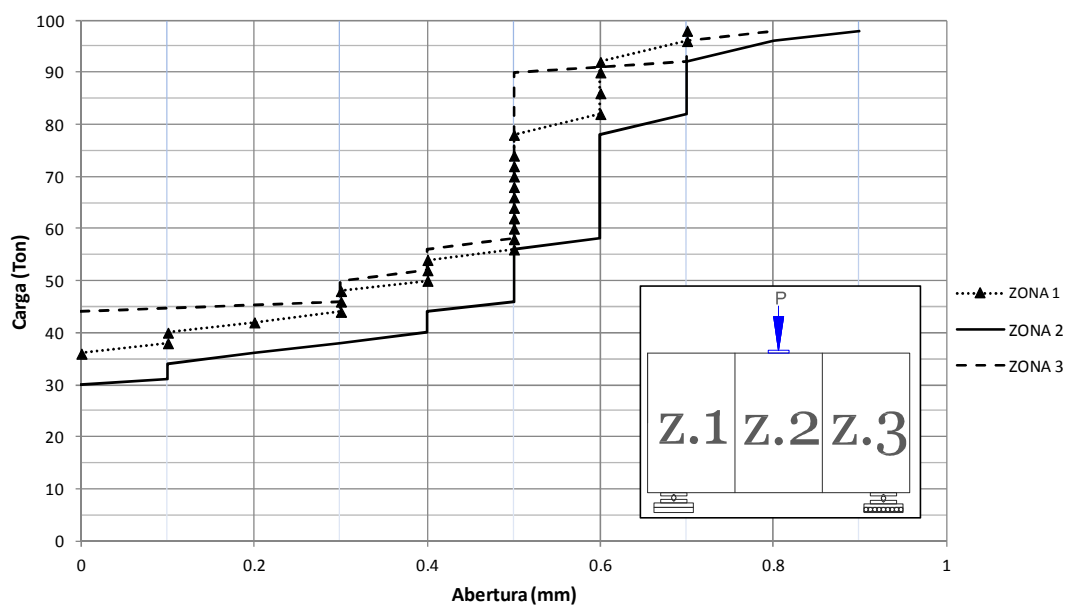


Figura 4.40 - Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V3-2.

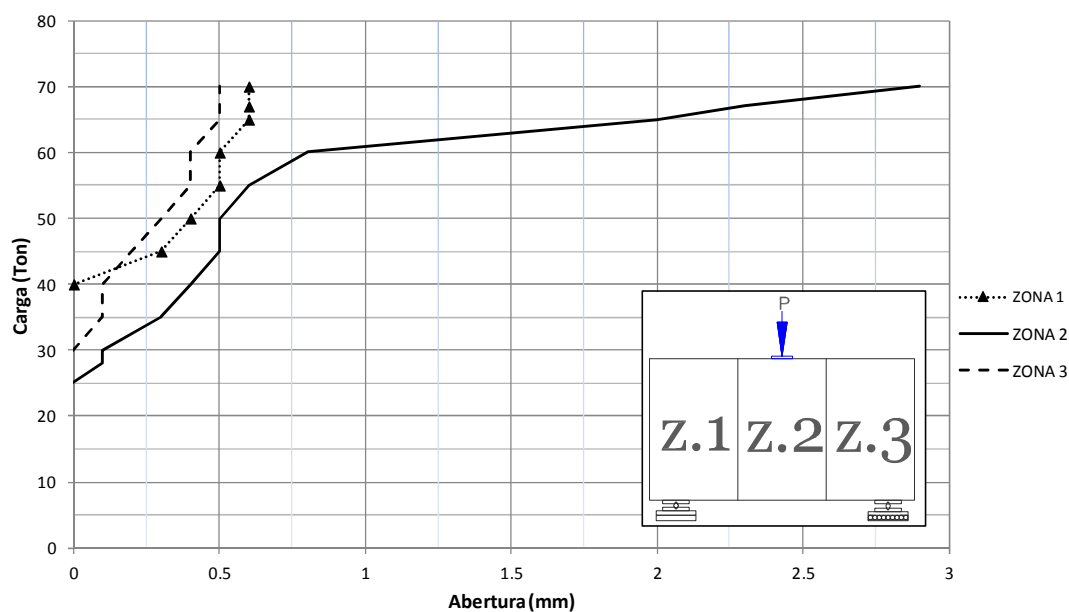


Figura 4.41 - Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V3-3.

Na Figura 4.42, observa-se que entre 77 Ton. e 87 Ton. as aberturas das três zonas (Z1, Z2 e Z3) da viga V4 apresentam um acréscimo acelerado com respeito ao incremento de carga, pois o aço de reforço principal atinge a tensão de escoamento em 77 Ton., como se pode ver na Figura 4.23.

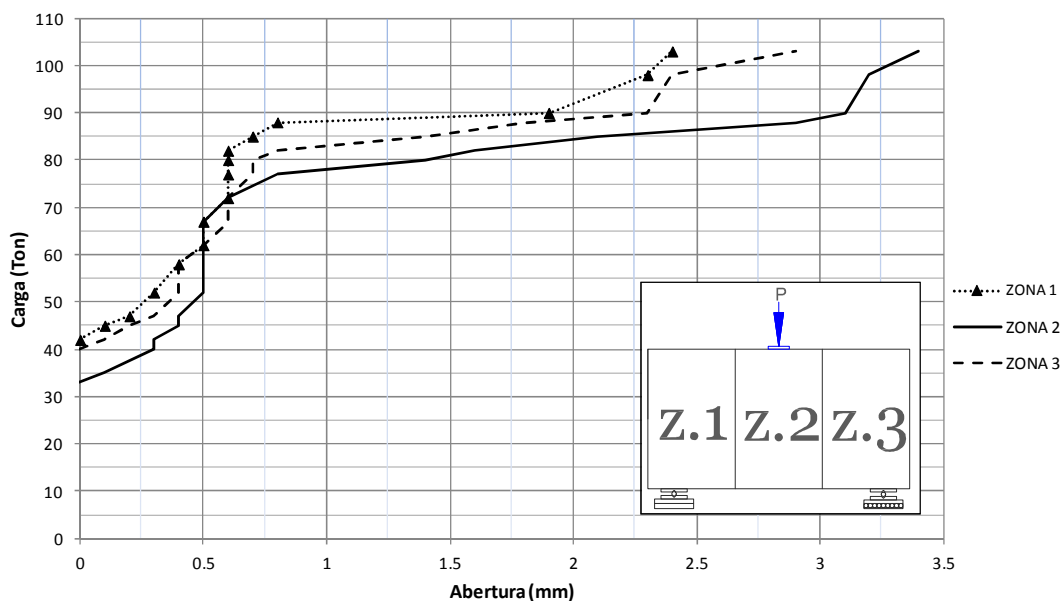


Figura 4.42 - Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V4.

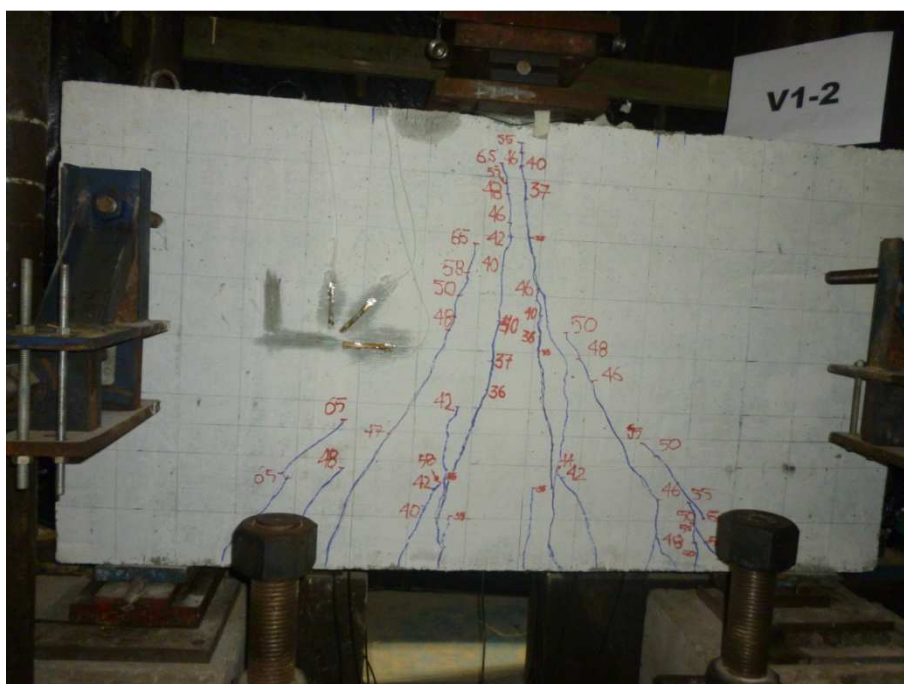
4.3.4. Mecanismos de falha e configuração de fissuras

Quando a resistência à tração do concreto é atingida, surge na parte inferior da zona central (Z2) da viga as primeiras fissuras, quase verticais, que com o posterior acréscimo de carga, aumentam em comprimento e abertura. Em seguida, o processo de fissuração continua com a aparição gradativa de fissuras cada vez mais próximas aos apoios e com direção ao ponto de aplicação de carga, implicando uma maior inclinação nas fissuras a medida que essas se afastam do centro do vão. Se a resistência do reforço é superior aos esforços à tração, gerados pela flexão, aparece uma fissura inclinada nas zonas onde o cortante tem maior influência (Z1 e Z3), que nasce nos apoios da viga e se propaga em direção ao ponto de aplicação da carga. Logo depois, surge uma segunda fissura diagonal paralela, que evidencia as zonas diagonais de esforços de compressão chamadas bielas comprimidas.

Nas Figuras 4.43 a 4.51 se mostra a configuração de fissuras gerada em cada uma das vigas ensaiadas. Nota-se que sobre a superfície branca da face frontal das vigas marcou-se a trajetória das fissuras associada à carga aplicada (em Ton).

A Figura 4.43 mostra a configuração de falha da viga V2-2. Observe-se que a maioria das fissuras geradas, incluindo a de falha, ocorreu na zona central da

viga (Z2). A ruptura segundo a classificação realizada no capítulo dois foi ruptura por flexão.



(a)



(b)

Figura 4.43 – Configuração de fissuras - Viga V1-2.

A ruptura da viga V1-3, também é classificada como ruptura de flexão, porém, comparada com a viga V1-2, a fissura de falha se deslocou em direção Ao apoio de primeiro gênero, ficando a 30 cm horizontais do centro do vão, ver Figura 4.44.

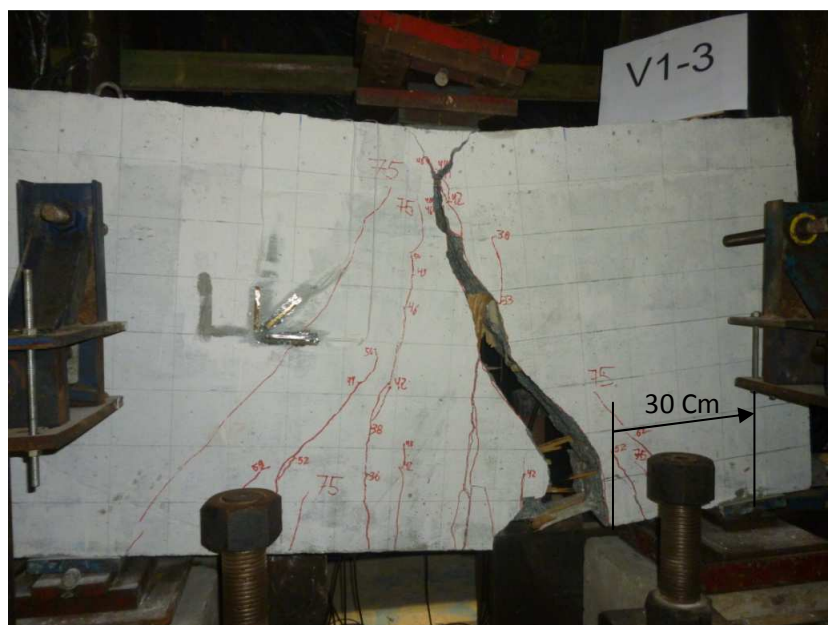


Figura 4.44 – Configuração de fissuras - Viga V1-3.

A configuração de fissuração das vigas V2 mostradas nas Figuras 4.45 a 4.47, com respeito às vigas V1 não é muito diferente, pois também a ruptura ocorrida foi de flexão. No entanto, nota-se especialmente na viga V2-2, Figura 4.46, algumas fissura horizontais localizadas paralelamente à armadura principal, originadas principalmente pela baixa aderência do reforço com o concreto, pois, nesta viga o vibrado do concreto durante a concretagem não foi adequado.

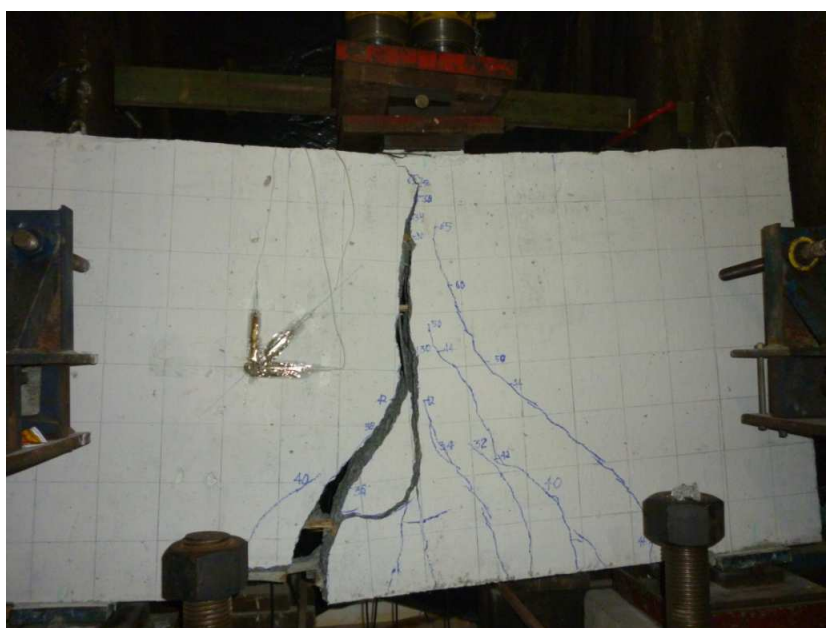


Figura 4.45 – Configuração de fissuras - Viga V2-1.

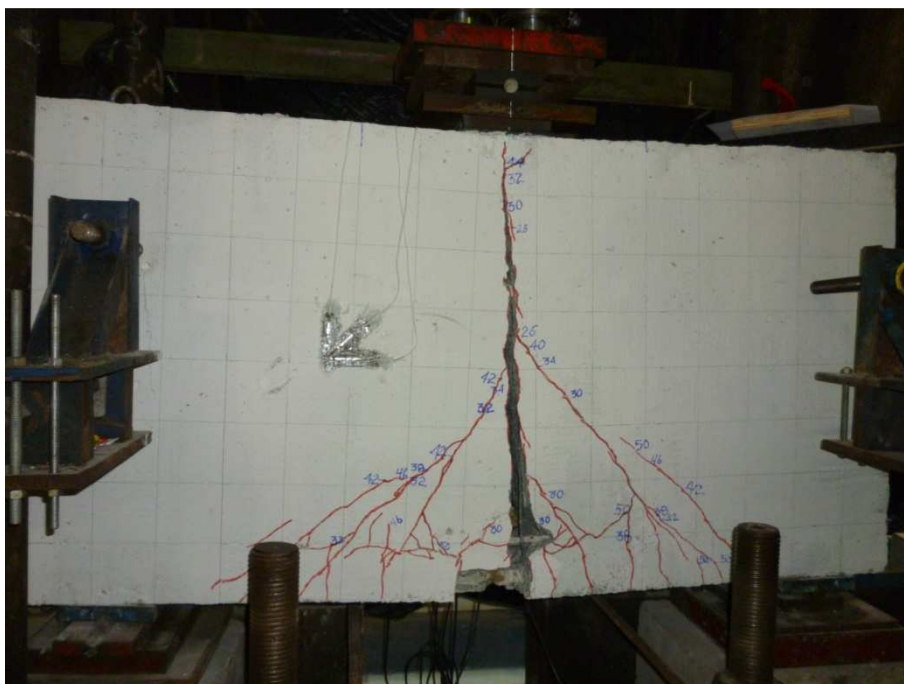


Figura 4.46 – Configuração de fissuras - Viga V2-2.

Na Figura 4.42 nota-se o modo de falha da viga V2-3, que apesar de ser ruptura de flexão, sua forma parabólica é produto da combinação de fissuras de flexão e fissuras horizontais causadas pela baixa aderência na interfase do bambu e o concreto.

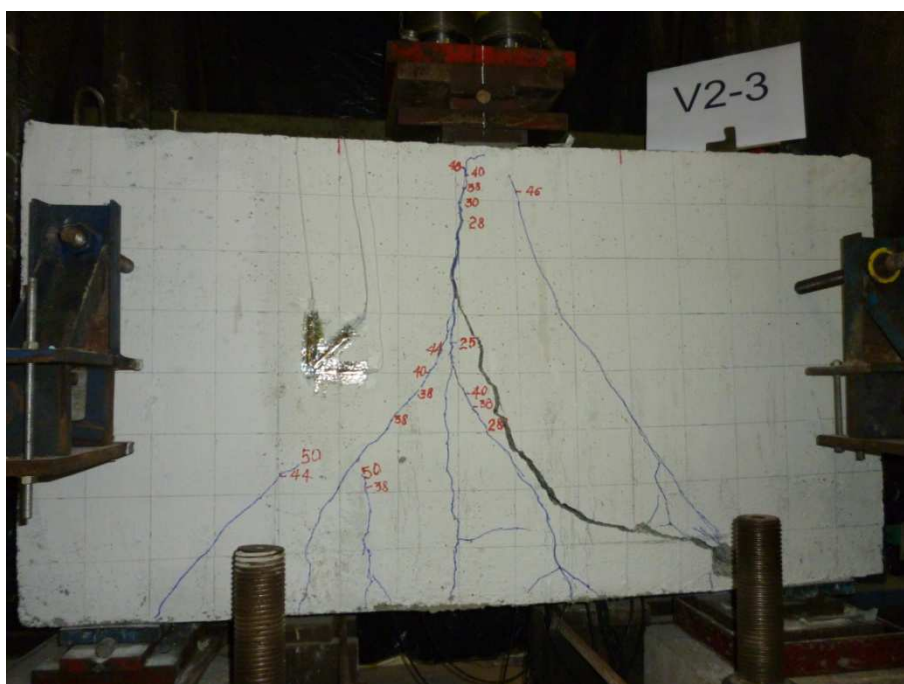


Figura 4.47 – Configuração de fissuras - Viga V2-3.

O grupo de vigas V3 exibe uma configuração de fissuras que atinge as zona de flexão (Z2) e as zonas de cisalhamento (Z1 e Z3), pois, dito grupo apresentou maior carga de ruptura com relação aos grupos de vigas V1 e V2. Nota-se na Figura 4.48, correspondente à viga V3-1, que a ruptura foi por cisalhamento do tipo tração diagonal (definido no capítulo dois), já que a fissura de falha traçou-se em diagonal desde o apoio até o ponto de aplicação de carga.

As vigas V3-2 e V3-3, ver as Figuras 4.49 e 4.50, falharam por flexão, porém, a viga V3-2 apresentou uma configuração de fissuras análoga à viga V3-1.

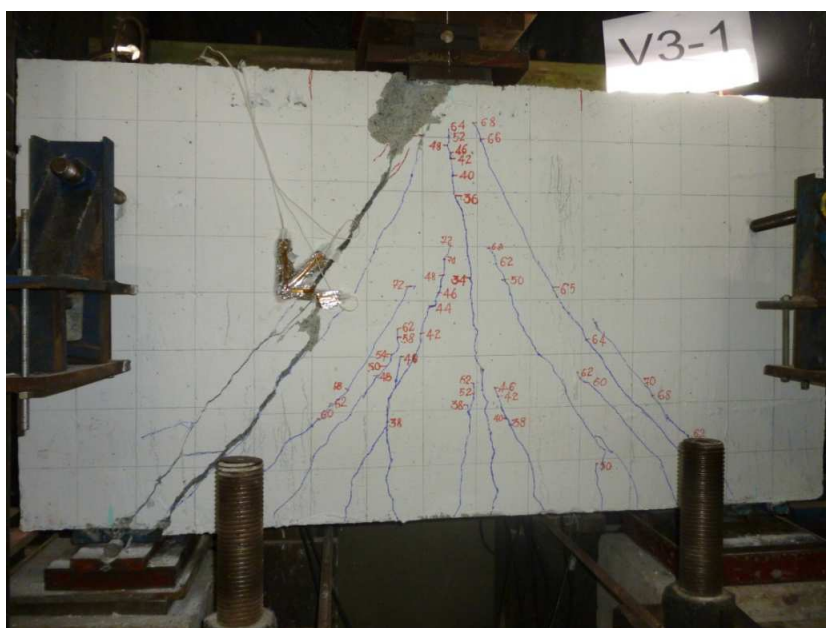


Figura 4.48 – Configuração de fissuras - Viga V3-1.



Figura 4.49 – Configuração de fissuras - Viga V3-2.

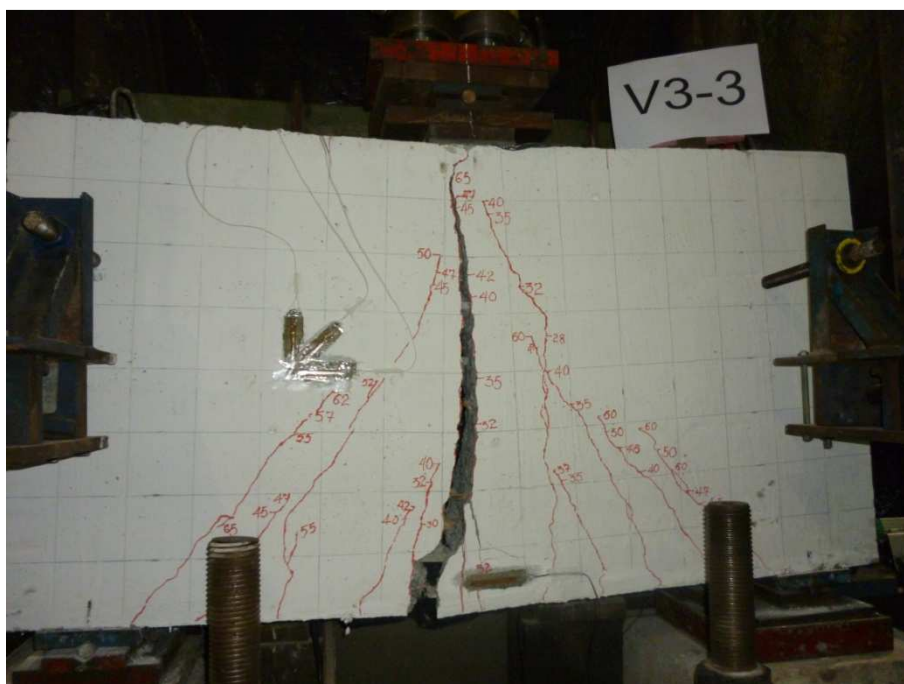


Figura 4.50 – Configuração de fissuras - Viga V3-3.

A viga V4, reforçada com aço não chegou a romper. As fissuras que surgiram, como se pode ver na Figura 4.51, localizaram-se em sua maioria na zona de flexão (Z2).

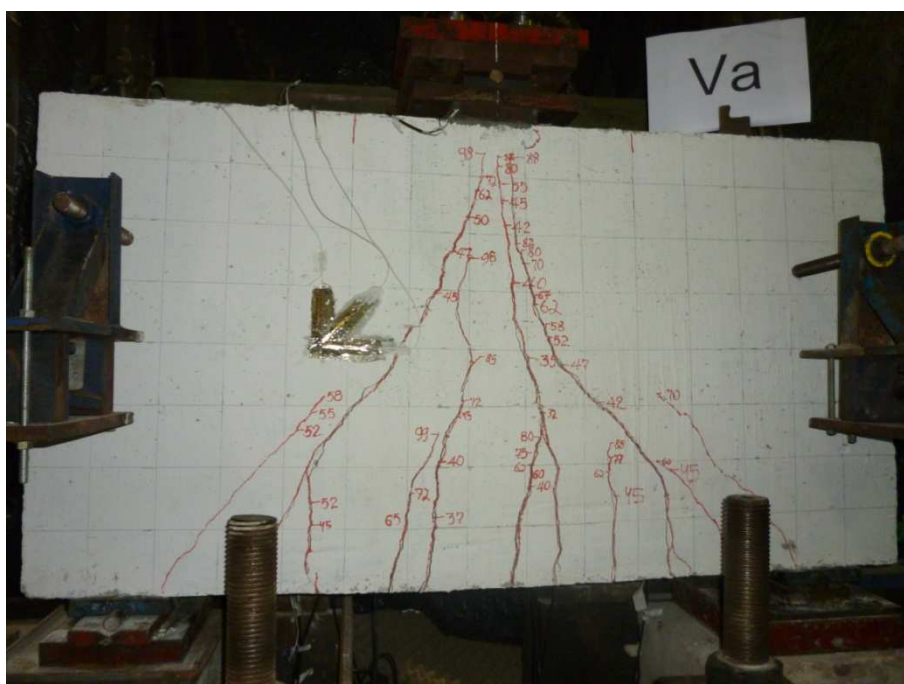


Figura 4.51 – Configuração de fissura - Viga V4.

4.3.5. Carga última

Para prever a capacidade de carga última das vigas V1, V2, V3 e V4, usou-se o programa CAST, que se baseia no modelo de bielas e tirantes. Para o uso do CAST é preciso que o usuário defina a geometria do modelo de bielas e tirantes tendo em conta a distribuição de esforços no elemento estudado, junto com os critérios de resistência de cada componente do modelo (bielas, tirantes e nós) de acordo com o código normativo escolhido, que no presente estudo foi o ACI318(2008), ver tabela 2.5.

Definidas a geometria do modelo e a resistência à compressão efetiva do concreto nas bielas (f_{ce}), determinada teoricamente pela equação (2.21), o CAST calcula a força máxima para que na biela não se supere a resistência do concreto. Da mesma forma e simultaneamente, os nós são verificados de acordo com os fatores de eficiência do concreto e de redução de resistência, ver a equação 2.22. Nas tabelas 4.8 e 4.9 mostram-se as resistências efetivas à compressão do concreto (das bielas e dos nós) estabelecidas na modelagem do programa CAST para calcular a carga última das vigas V1, V2, V3 e V4.

Tabela 4.8 – Resistência efetiva à compressão do concreto das bielas tipo garrafa

	Bielas Garrafa			
	Vigas-V1	Vigas-V2	Vigas-V3	Vigas-V4
Média Resistência à compressão do concreto.	38.0	34.1	37.5	35.0
f'_c (Mpa)				
Resistência à compressão efetiva do concreto.	24.2	21.8	23.9	22.3
f_{ce} (Mpa)				
Fator de redução			$\beta_s = 0.75$	

Tabela 4.9 – Resistência efetiva à compressão do concreto dos nós tipo C-C-C e C-C-T

	Nós			
	Vigas-V1	Vigas-V2	Vigas-V3	Vigas-V4
Resistência à compressão Região nodal C-C-C	32.3	23.2	25.5	23.8
f_{ce} (Mpa)				
Resistência à compressão Região nodal C-C-T	25.9	23.2	25.5	23.8
f_{ce} (Mpa)				
Fator de redução			$\beta_{n(ccc)} = 1.0, \beta_{n(cct)} = 0.8$	

Os resultados de carga última nas vigas V1, V2, V3 e V4: 355.6 KN, 435.3 KN, 674.4 KN e 885.3 KN, respectivamente, são vistos nas Figuras 4.52 a 4.54.

Ao contrário da viga V4 que falha por esforços de compressão nas bielas, ver a Figura 4.55 e a Tabela 4.13, as vigas V1, V2 e V3, Figuras 4.52 a 4.54 e Tabelas 4.10 a 4.12, falham por resistência aos esforços de tração no tirante, pois a relação entre o esforço máximo suportado e o esforço efetivo (f_u/f_{ce}) das bielas é menor a um (1).

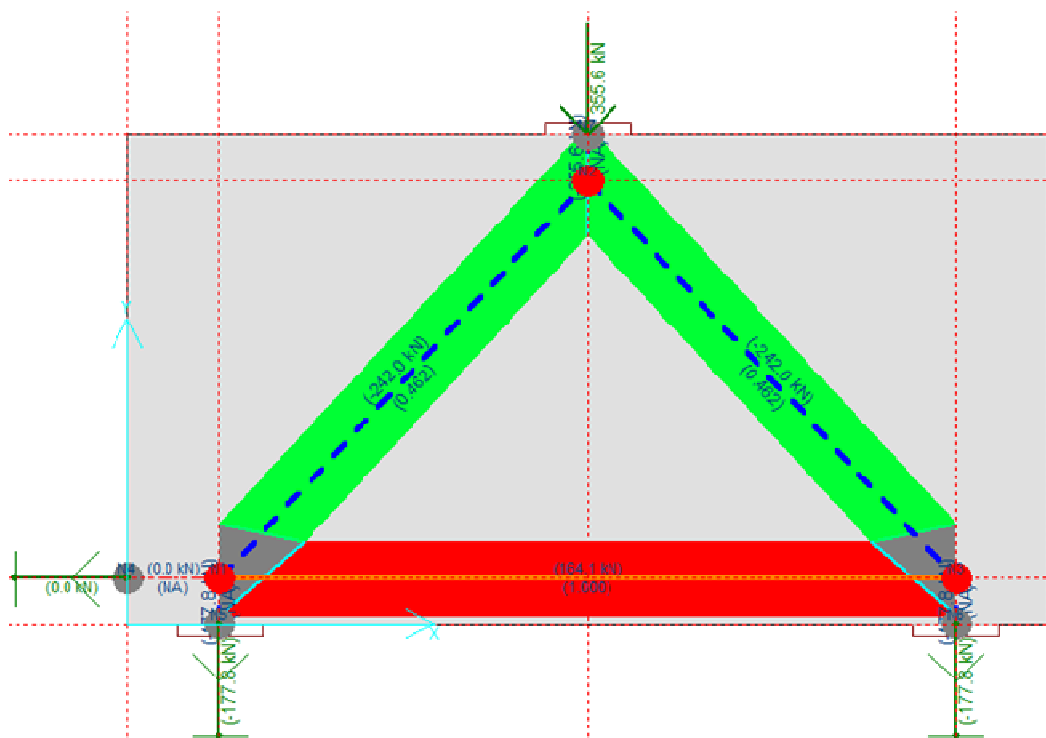


Figura 4.52 – Predição de carga última – Vigas V1.

Tabela 4.10 – Tensões nas bielas e tirante na predição da carga última das vigas V1 – fatores do ACI (2008).

ID	I (mm)	θ (°)	F (KN)	f_{ce} (MPa)	$w_{mín}$ (mm)	w_{eff} (mm)	f_u (MPa)	f_u/f_{ce}	Tipo de elemento
E1	884.6	47.3	-242.0	11.2	55.5	120.0	5.2	0.462	BG
E2	884.6	312.7	-242.0	11.2	55.5	120.0	5.2	0.462	BG
E3	1200.0	180.0	164.1	124.3	100.0	120.0	124.3	1.000	T

Onde:

ID :identificação elemento;

I : comprimento de elemento;

F : força;

f_{ce} : Esforço máximo suportado pelo concreto ou tirante conforme fatores de eficiência aplicados.

$w_{mín}$: espessura mínima da biela para que a tensão não exceda a tensão máxima f_{ce} ;

w_{eff} : espessura efetiva da biela;

f_u : Esforço efetivo na biela ou no tirante;

BG : biela em forma de garrafa.

T: Tirante

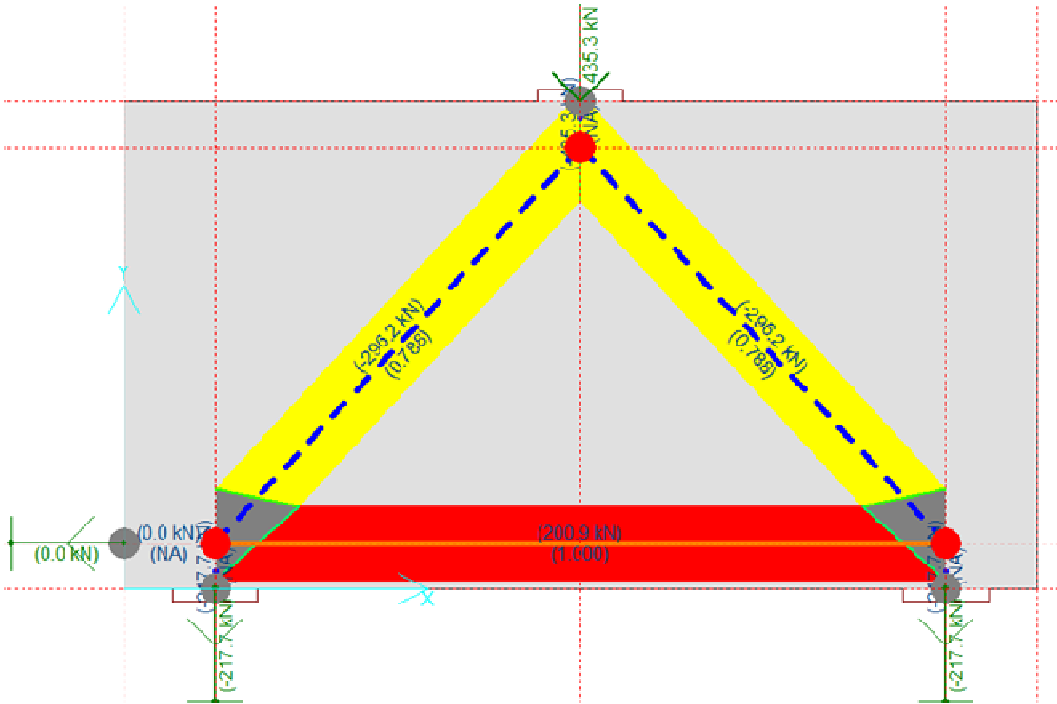


Figura 4.53 – Predição de carga última – Vigas V2.

Tabela 4.11 – Tensões nas bielas e tirante na predição da carga última das vigas V2 – fatores do ACI (2008).

ID	l (mm)	θ (°)	F (kN)	f_{ce} (MPa)	$w_{mín}$ (mm)	w_{eff} (mm)	f_u (MPa)	f_u/f_{ce}	Tipo de elemento
E1	884.6	47.3	-296.2	13.7	94.6	120.0	10.8	0.788	BG
E2	884.6	312.7	-296.2	13.7	94.6	120.0	10.8	0.788	BG
E3	1200.0	180.0	200.9	124.3	100.0	120.0	124.3	1.000	T

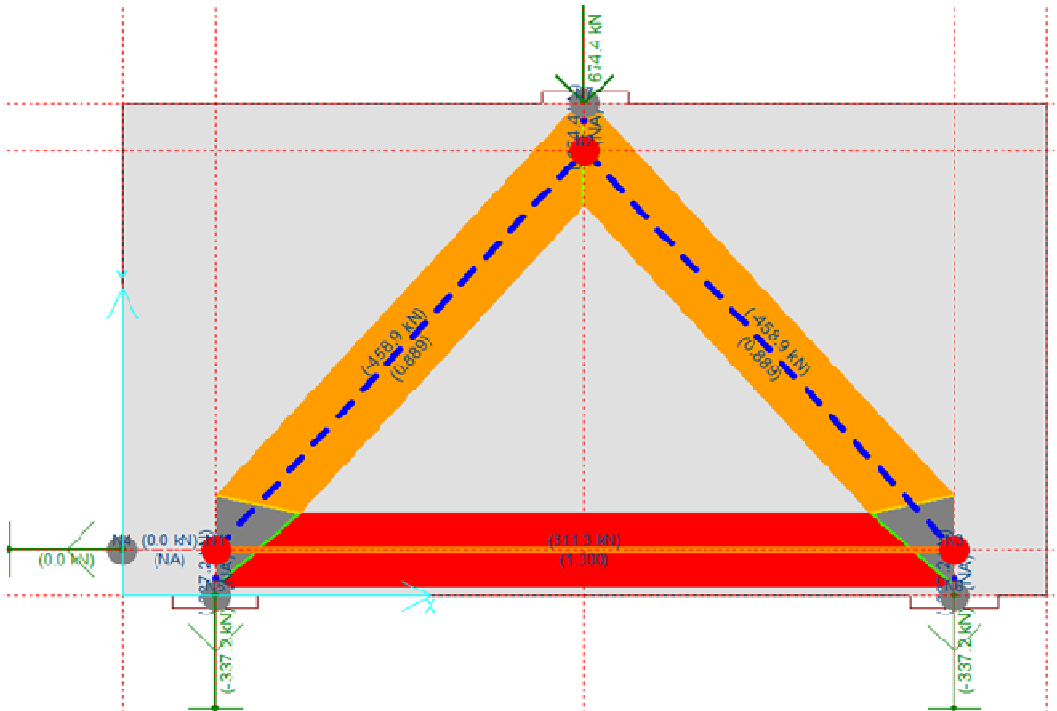


Figura 4.54 – Predição de carga última – Vigas V3.

Tabela 4.12 – Tensões nas bielas e tirante na predição da carga última das vigas V3 – fatores do ACI (2008).

ID	I (mm)	θ (°)	F (KN)	f_{ce} (MPa)	$w_{mín}$ (mm)	w_{eff} (mm)	f_u (MPa)	f_u/f_{ce}	Tipo de elemento
E1	884.6	47.3	-458.9	21.3	106.6	120.0	18.9	0.889	BG
E2	884.6	312.7	-458.9	21.3	106.6	120.0	18.9	0.889	BG
E3	1200.0	180.0	311.3	124.3	100.0	120.0	124.3	1.000	T

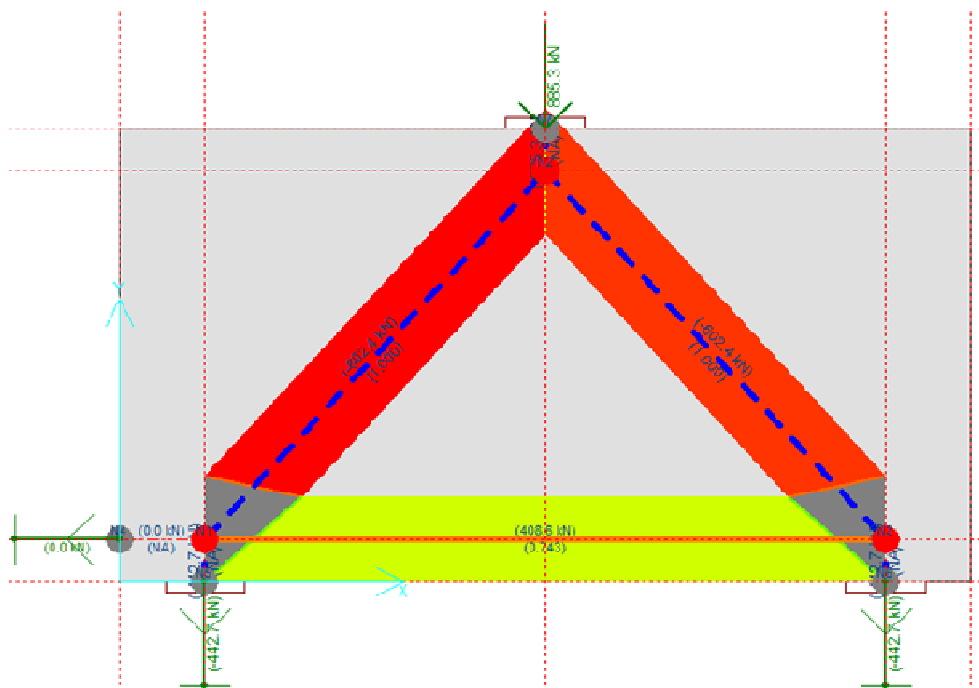


Figura 4.55 – Predição de carga última – Vigas V4.

Tabela 4.13 – Tensões nas bielas e tirante na predição da carga última da viga V4 – fatores do ACI (2008).

ID	I (mm)	θ (°)	F (KN)	f_{ce} (MPa)	$w_{mín}$ (mm)	w_{eff} (mm)	f_u (MPa)	f_u/f_{ce}	Tipo de elemento
E1	884.6	47.3	-602.4	22.3	150.0	150.0	22.3	1.000	BG
E2	884.6	312.7	-458.9	21.3	106.6	120.0	21.3	1.000	BG
E3	1200.0	180.0	408.6	510.8	100.0	120.0	379.5	0.743	T

Para facilitar a comparação das cargas últimas das vigas V1, V2, V3 e V4 obtidas nos ensaios de laboratório com as cargas últimas obtidas mediante programa CAST, se apresenta a Tabela 4.14. Nota-se que a relação entre a carga última obtida com o programa CAST e a carga última experimental ($CAST/Exp.$) é menor a um em todas as vigas. O que indica, que apesar de ter usado os critérios de resistência da norma ACI318 (2008) estabelecidos para concreto e aço, a previsão de carga do CAST continua sendo conservativa quando é usado o valor

da resistência à tração do bambu nos elementos tracionados (tirantes) do modelo de bielas e tirantes.

Tabela 4.14 – Relação carga última CAST – Carga última experimental

Viga	Carga última (Ton)		CAST/Exp.	Tipo de falha
	CAST (ACI318)	Experimen.		
V1-2	35.56	72.34	0.49	flexão
V1-3		76.09	0.47	flexão
V2-1	43.53	65.16	0.67	flexão
V2-2		56.52	0.77	flexão
V2-3		57.06	0.76	flexão
V3-1	67.44	106.51	0.63	cisalhante
V3-2		101.1	0.67	flexão
V3-3		70.4	0.96	flexão
V4	88.53	NF*	NF*	NF*

NF*= Não falhou

4.3.6. Aderência

Realizaram-se ensaios pull out para determinar a influencia no esforço de aderência quando as tiras de bambu foram impermeabilizadas com Sikadur 32 e recobertas com areia. Porém, pela baixa resistência à tração das tiras de bambu usadas nos corpos de prova (baixa qualidade por erros na proteção do material durante seu corte no mato), não foi possível finalizar os ensaios com sucesso, pois as tiras de bambu rompiam antes de ser arrancadas do cilindro de concreto. Na Figura 4.56 mostram-se imagens da superfície do bambu após os ensaios das vigas V1-2, V2-3, V3-3. Nota-se que a superfície das tiras de bambu ficou, em vários lugares, sem o recobrimento, facilitando seu escorregamento dentro da matriz de concreto e limitando a resistência das vigas parede.

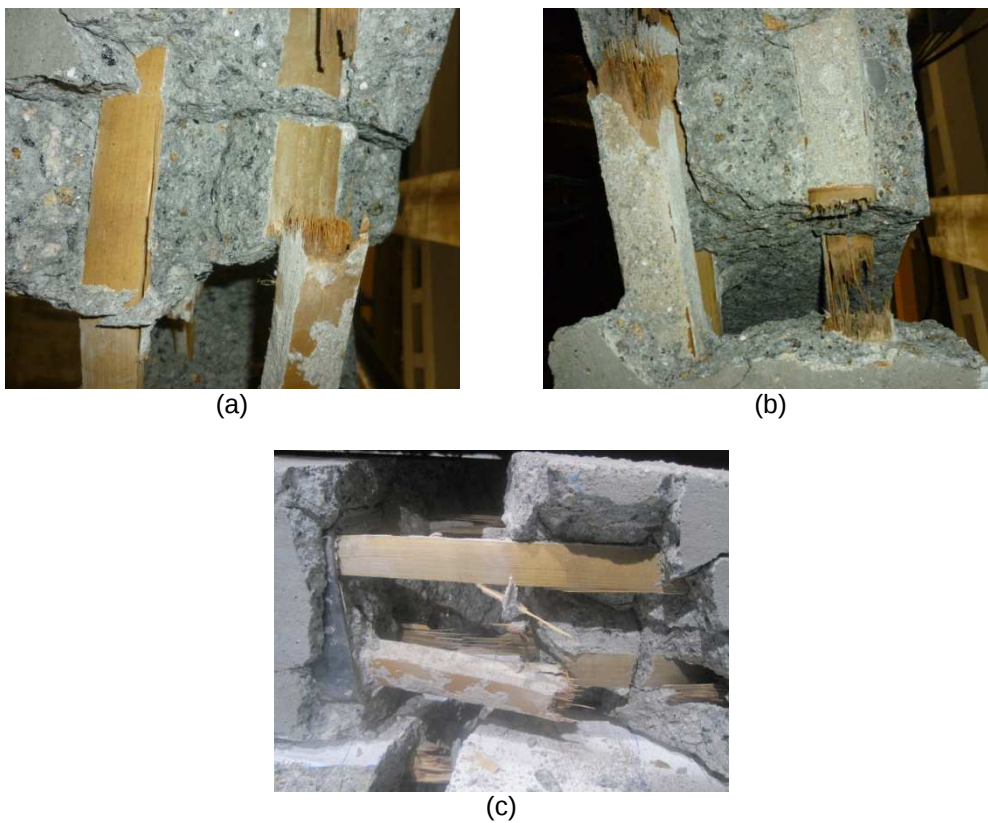


Figura 4.56 – Aderência entre bambu e concreto. (a) Viga V1-2. (b) Viga V2-3. (c) Viga V3-3.