

3. Descrição de materiais, vigas de teste e ensaios

3.1. Introdução

Sendo o foco desta pesquisa o estudo experimental de vigas parede de concreto reforçado com bambu, neste capítulo se indica o processo realizado no laboratório abordando a descrição de materiais, equipamentos, instrumentação, corpos de prova e metodologia dos ensaios das nove vigas parede de concreto reforçado com tiras de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* e uma viga parede de concreto reforçado com aço, biapoiadas e carregadas com uma carga concentrada no centro do bordo superior.

3.2. Bambu

Selecionou-se o bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*, cultivado na PUC-Rio e cortado na faixa de idade de três a seis anos após nascimento. Posteriormente, realizou-se o tratamento de impermeabilização da superfície do bambu, para logo depois fabricar a armadura de reforço de cada uma das nove vigas parede estudadas.

3.2.1. Corte e Tratamento de Impermeabilização do Bambu

Depois de realizar o processo de corte e cura a céu aberto foram recolhidos e selecionados os colmos de bambu para serem usados. Já no laboratório de estruturas e materiais da PUC-Rio prosseguiu-se com o corte dos colmos de bambu em tiras, empregando uma faca radial como é mostrado na Figura 3.1b. Posteriormente, com a ajuda de uma escova metálica, eliminaram-se da superfície das tiras cortadas partículas e impurezas que pudessem afetar a aderência do

tratamento (Figura 3.1c). Seguidamente, as tiras de bambu foram perfiladas com cortes laterais conforme as dimensões de cada elemento de reforço.

Sobre cada elemento de reforço perfilado e com a superfície limpa de impurezas, aplicou-se uma capa de resina epóxi denominada Sikadur32. Imediatamente depois, com o fim de melhorar a aderência entre o bambu e o concreto, incorporou-se sobre sua superfície areia com tamanho máximo de 2.38 mm, ver a granulometria na Tabela 3.1. A seguir, na Figura 3.1 mostra-se o processo de impermeabilização e preparação das tiras do bambu para reforçar o concreto.



(a)



(b)



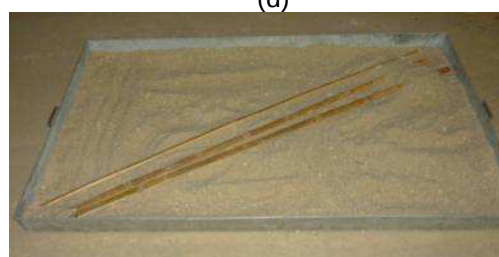
(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 3.1 – Impermeabilização e preparação do bambu. (a) Corte e cura na mata, (b) corte do colmo em tiras, (c) limpa da superfície das tiras do bambu, (d) perfilado de tiras do bambu, (e) aplicação de Sikadur32, (f) incorporação de areia, (g) bambu impermeabilizado.

Tabela 3.1 – Granulometria de areia usada na superfície das tiras do bambu.

Peneira	Malha	Resíduos		Res. Acumul.	
		(Kg)	(%)	Pasado (%)	Retido (%)
4	4.76	0.025	2.5	97.5	2.5
8	2.38	0.042	4.2	93.3	6.7
16	1.19	0.165	16.5	76.8	23.2
30	0.59	0.573	57.3	19.5	80.5
50	0.297	0.002	0.2	19.3	80.7
100	0.149	0.185	18.5	0.8	99.2
Fundo	-	0.008	0.8	-	-
Total		1	100		292.8
Módulo de Finura		2.93			
Máximo Diâmetro		2,38 mm			

3.2.2. Resistência à tração do Bambu.

A Tabela 3.2 apresenta os valores de resistência à tração (σ_t) e do módulo de elasticidade (E) que foram registrados em pesquisas anteriores por Culzoni (1986), Ghavami (1995), Lima Jr *et al.* (2000) e Ghavami & Marinho (2001).

Tabela 3.2 – Resultados dos ensaios de tração para bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* obtidos em pesquisas de Culzoni (1986), Ghavami (1995), Lima Jr. *Et al.* (2000) e Ghavami & Marinho (2001).

Pesquisa	Resistência à tração σ_t (Mpa)		Mod. de Elasticidade E (Gpa)	
	Com nó	Sem nó	Com nó	Sem nó
Culzoni (1986)	110.17	138.63	11.67	13.84
Ghavami (1995)	119.02	135	11.75	14.5
Lima Jr <i>et al.</i> (2000)	97.51	277.19	13.14	23.75
Ghavami & Marinho (2001)	170.28	224.08	18.31	20.76

Para a obtenção da resistência à tração do bambu se adotaram as recomendações da norma ISO/TC165 N314 “Determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu”.

Foram ensaiados dez corpos de prova com a geometria mostrada na Figura 3.2. A espessura de cada corpo de prova dependeu da espessura própria dos colmos de bambu selecionados, no entanto, pelas condições do laboratório (pela abertura das garras da máquina) se usou para este ensaio colmos de bambu com espessuras entre sete milímetros e dez milímetros.

Nas Figuras 3.2 e 3.3 mostra-se nos extremos das amostras, chapas de alumínio de cinco centímetros de comprimento coladas com resina epóxi da Sika para evitar o escorregamento e esmagamento das zonas do bambu fixadas com as garras da máquina.

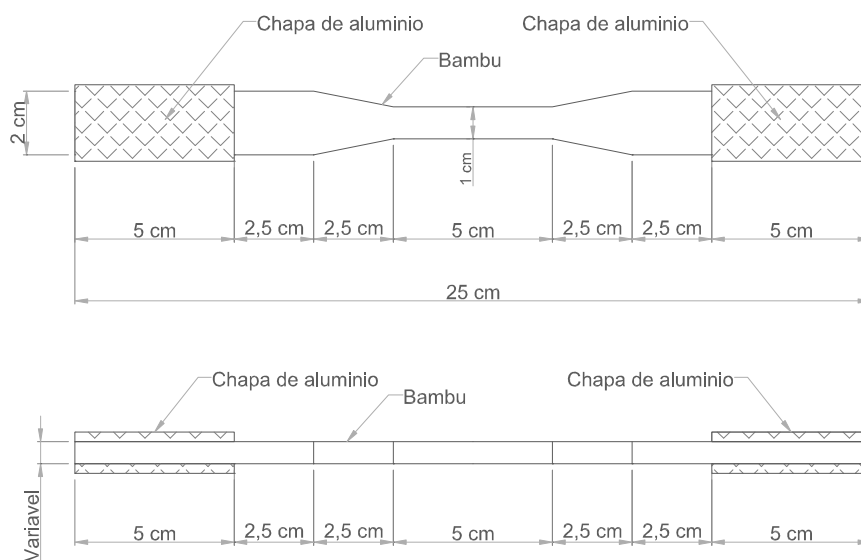


Figura 3.2 – Geometria de corpos de prova para ensaio de tração



Figura 3.3 – Corpos de prova - material bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Os testes foram realizados no Instituto Tecnológico ITUC da PUC-Rio na máquina universal INSTRON No. 6233 Modelo 5500R, monitorada com o o

programa *Bluehill*. Usou-se para medir a deformação na zona central do corpo de prova um clip gage INSTRON de serial No. 1194 com comprimento máximo de 50 mm. A taxa de aplicação da carga foi de 0.01 mm/seg.

3.3. Descrição das vigas parede ensaiadas

Testaram-se dez vigas parede de concreto, das quais, nove foram reforçadas com tiras de bambu e uma com aço. Para sua nomeação, as dez vigas foram distribuídas em quatro grupos diferenciados pela taxa de reforço principal e material de reforço, ver Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Grupos de vigas parede testadas.

Grupo	Área média de reforço (cm ²)	Taxa de reforço principal ρ (%)	Material de reforço
V1	13.2	1.0	Bambu
V2	16.2	1.2	Bambu
V3	25.1	1.9	Bambu
V4	8	0.6	Aço

3.3.1. Geometria das vigas parede ensaiadas

Utilizaram-se as dimensões usadas no trabalho experimental de Guimarães (1982). Mostra-se na Figura 3.4, a geometria geral das vigas parede ensaiadas. Observa-se que a largura da viga é de 0.18m, a altura de 0.80 m e a distância entre eixos dos apoios corresponde a 1.20 m, de modo que a relação de esbeltez (l/h) é igual a 1.5, que concorda com a definição de vigas parede citadas nos capítulos 1 e 2.

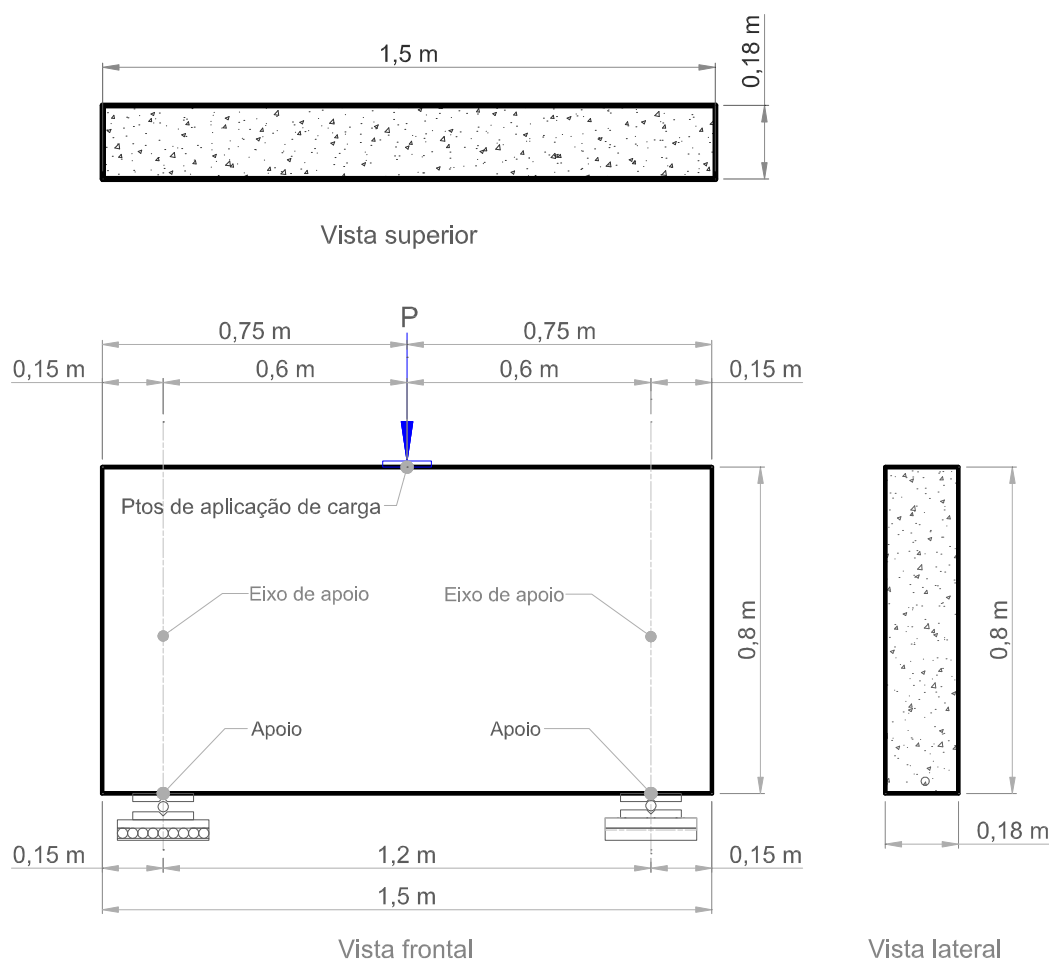


Figura 3.4 – Geometria geral das vigas parede.

3.3.2. Reforço das vigas

Cada um dos grupos V1, V2 e V3 constituiu-se por três vigas reforçadas com tiras de bambu e cuja denominação se realizou agregando à identificação do grupo um número sequencial de um a três, como se esquematiza na Figura 3.5.

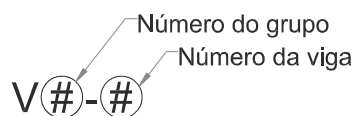


Figura 3.5 - Identificação de vigas.

O reforço principal das vigas pertencentes aos grupos V1, V2 e V4, foi distribuído em duas camadas com dois elementos de reforço. Da mesma forma para as vigas do grupo V3, o reforço principal distribuiu-se em três camadas, ver a Figura 3.6.

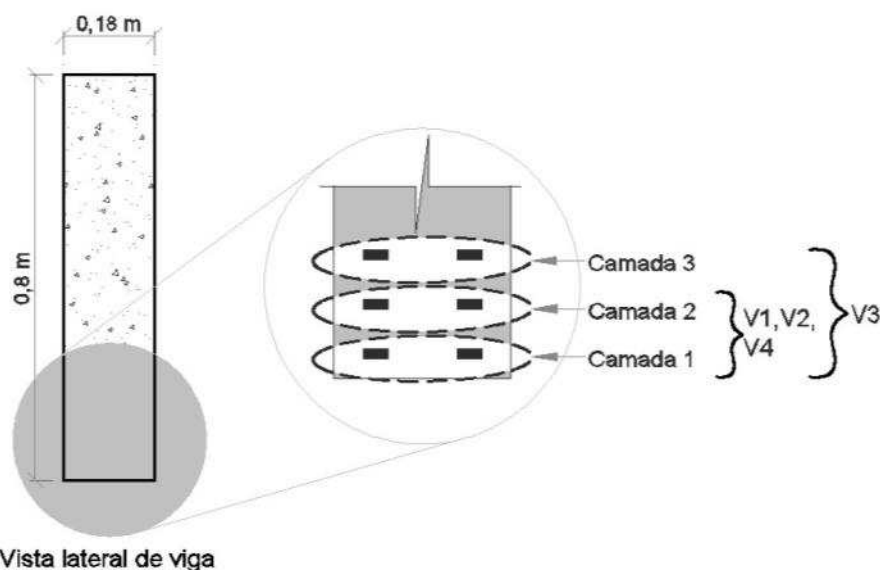


Figura 3.6 – Camadas de reforço principal.

3.3.2.1. Vigas V1

As três vigas do grupo V1 foram reforçadas à flexão com quatro tiras de bambu distribuídas em duas camadas. As áreas transversais das tiras de bambu em cada camada são mostradas na Tabela 3.4.

Além de 13.2 cm² de área média para o reforço principal em cada viga deste grupo, colocou-se uma armadura secundaria formada por estribos de bambu. Na Figura 3.7 mostra-se a distribuição geral do reforço usado.

Tabela 3.4 – Área e distribuição de reforço principal nas vigas V1

V1-1			V1-2			V1-3		
Dimensões da Seção (mm)	Área da seção (cm ²)	camada	Dimensões da Seção (mm)	Área da seção (cm ²)	camada	Dimensões da Seção (mm)	Área da seção (cm ²)	camada
31x15	4.7	1	32x10	3.2	1	27x17	4.6	1
23x17	3.9	1	30x18	5.4	1	27x16	4.3	1
25x8	2.0	2	25x10	2.5	2	25x9	2.3	2
28x10	2.8	2	25x8	2.0	2	25x8	2.0	2
$\Sigma(\text{cm}^2) =$	13.4		$\Sigma(\text{cm}^2) =$	13.1		$\Sigma(\text{cm}^2) =$	13.2	
Média (cm ²) = 13.2								



Como se apresentou na Tabela 3.3, as três vigas deste grupo têm uma taxa de armadura principal (ρ) de 1.2% que corresponde em média a 16.2 cm² distribuídos em duas camadas, como é indicado na Tabela 3.5. Na Figura 3.8 se apresenta a distribuição geral do reforço nas vigas V2, que a diferença das vigas dos grupos V1, V3, e V4, não foram reforçadas com armadura de alma.

V2-1			V2-2			V2-3		
Dimensões da Seção (mm)	Área da seção (cm²)	camada	Dimensões da Seção (mm)	Área da seção (cm²)	camada	Dimensões da Seção (mm)	Área da seção (cm²)	camada
34x12	4.1	1	32x10	3.2	1	30x18	5.4	1
33x17	5.6	1	30x17	5.1	1	32x13	4.2	1
31x11	3.4	2	31x14	4.3	2	33x10	3.3	2
30x10	3.0	2	30x12	3.6	2	33x10	3.3	2
$\Sigma(\text{cm}^2) =$	16.1		$\Sigma(\text{cm}^2) =$	16.2		$\Sigma(\text{cm}^2) =$	16.2	
Média (cm²) = 16.2								

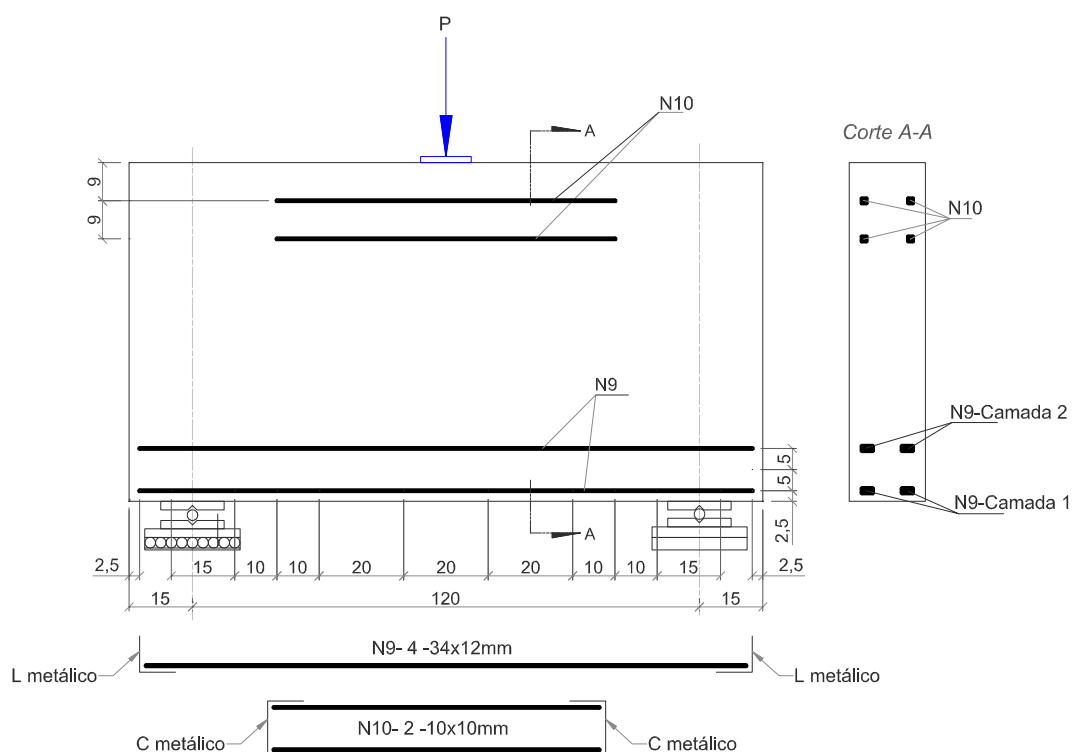


Figura 3.8 – Distribuição geral de reforço nas vigas V2

3.3.2.3. Vigas V3

Da mesma forma que para o grupo de vigas V1, usou-se nas vigas do grupo V3 armadura de alma formada por estribos de bambu, ver a distribuição de armadura na Figura 3.9. A área média de reforço principal nas vigas deste grupo foi de 25.1 cm², ver Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Área e distribuição de reforço principal nas vigas V3

V3-1			V3-2			V3-3		
Dimensões da Seção (mm)	Área da seção (cm ²)	camada	Dimensões da Seção (mm)	Área da seção (cm ²)	camada	Dimensões da Seção (mm)	Área da seção (cm ²)	camada
30x19	5.7	1	31x16	5	1	32x19	6.1	1
30x19	5.7	1	32x13	4.2	1	30x15	4.5	1
32x11	3.5	2	31x15	4.7	2	32x13	4.2	2
33x11	3.6	2	32x12	4	2	33x11	3.6	2
31x11	3.4	3	32x12	3.8	3	32x11	3.5	3
31x10	3.1	3	32x11	3.5	3	31x10	3.1	3
$\Sigma(\text{cm}^2) =$	25		$\Sigma(\text{cm}^2) =$	25.2		$\Sigma(\text{cm}^2) =$	25	
Média (cm ²) = 25.1								

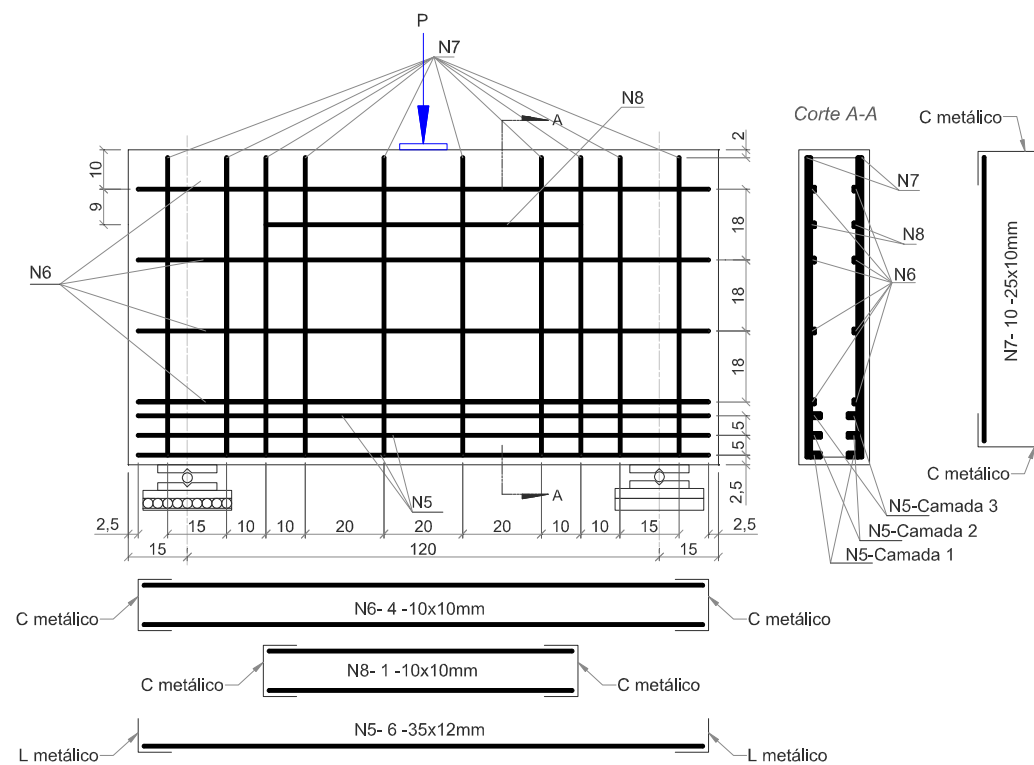


Figura 3.9 – Distribuição geral de reforço nas vigas V3

3.3.2.4. Viga V4

A viga V4 foi reforçada em sua totalidade com barras de aço. Colocou-se 8.0 cm² de reforço principal distribuído em duas camadas, além de uma armadura secundária formada por barras de aço de Ø 6.3mm. A Figura 3.10 mostra a distribuição do reforço.

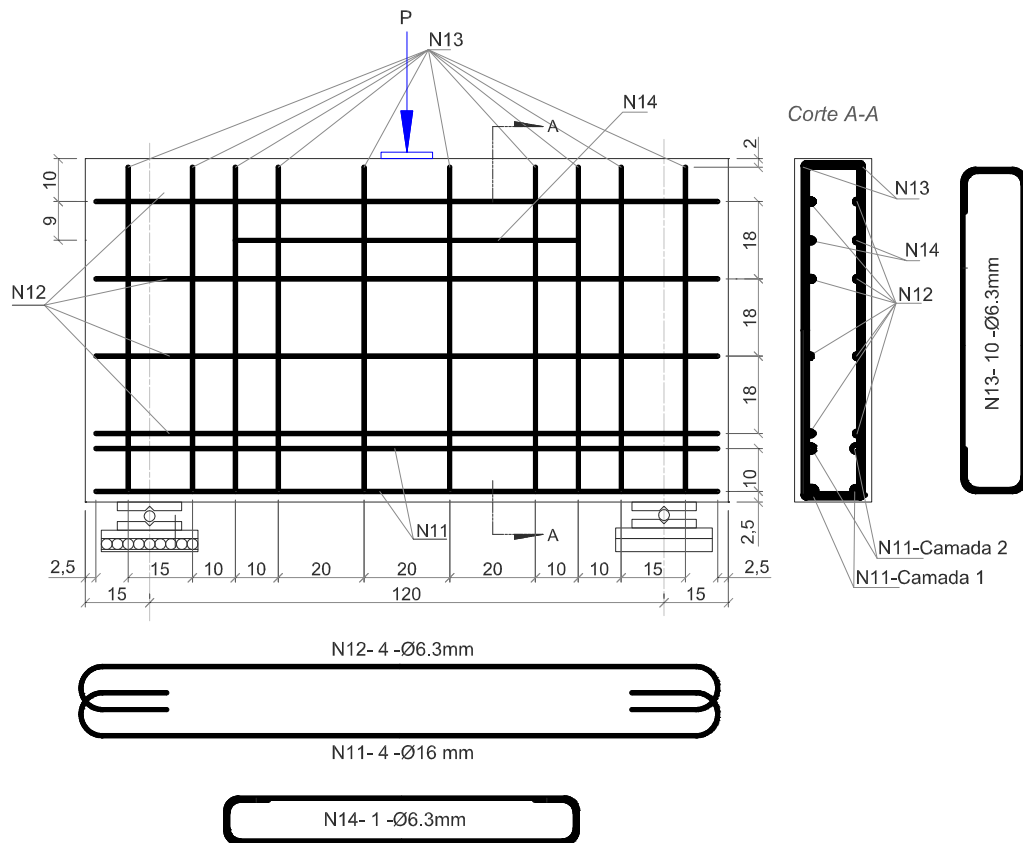


Figura 3.10 – Distribuição geral de reforço na viga V4

Na Tabela 3.7 indica-se o resumo das taxas geométricas de reforço (ρ), tanto principal como secundário das vigas V1, V2, V3 e V4, calculadas com as eqs. 3.1, 3.2 e 3.3.

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad (3.1)$$

$$\rho_h = \frac{A_{wh}}{bd} \quad (3.2)$$

$$\rho_v = \frac{A_{wv}}{bl_v} \quad (3.3)$$

Onde,

ρ = Taxa geométrica de reforço principal

ρ_h = Taxa geométrica de reforço de alma horizontal

ρ_v = Taxa geométrica de reforço de alma vertical

l_v = Distancia livre entre eixos de apoios

A_s, A_{wh}, A_{wv} = Área transversal de reforço.

Tabela 3.7 – Taxas geométricas de reforço ($\rho\%$) das vigas V1,V2,V3,V4

Vigas	Armadura principal		Armadura alma			
	A_s (cm ²)	ρ (%)	Horizontal		Vertical	
			A_{wh} (cm ²)	ρ_h (%)	A_{wv} (cm ²)	ρ_v (%)
V1-1	13.4	1.0	8.0	0.6	40.0	1.9
V1-2	13.1	1.0	8.0	0.6	40.0	1.9
V1-3	13.2	1.0	8.0	0.6	40.0	1.9
V2-1	16.1	1.2	-	-	-	-
V2-2	16.2	1.2	-	-	-	-
V2-3	16.2	1.2	-	-	-	-
V3-1	25.1	1.9	8.0	0.6	40.0	1.9
V3-2	25.1	1.9	8.0	0.6	40.0	1.9
V3-3	25.0	1.9	8.0	0.6	40.0	1.9
V4	8.0	0.6	2.5	0.2	49.9	2.3

3.3.3. Estribos

Os estribos que compõem a armadura secundária, ou também chamada de alma, constituíram-se com elementos de bambu cortados em tiras e impermeabilizados, unidos mediante resina epóxi (Sikadur32) a duas chapas de aço com forma de C (Figura 3.11c). Nota-se que estas chapas apresentam dois furos com o objetivo de melhorar a aderência entre a resina epóxi e a superfície lisa de colagem da chapa (ver as Figuras 3.11a e 3.11b). É importante mencionar que a limpeza adequada das superfícies de colagem, tanto para a chapa de aço como para o bambu, garante a integridade do estribo.

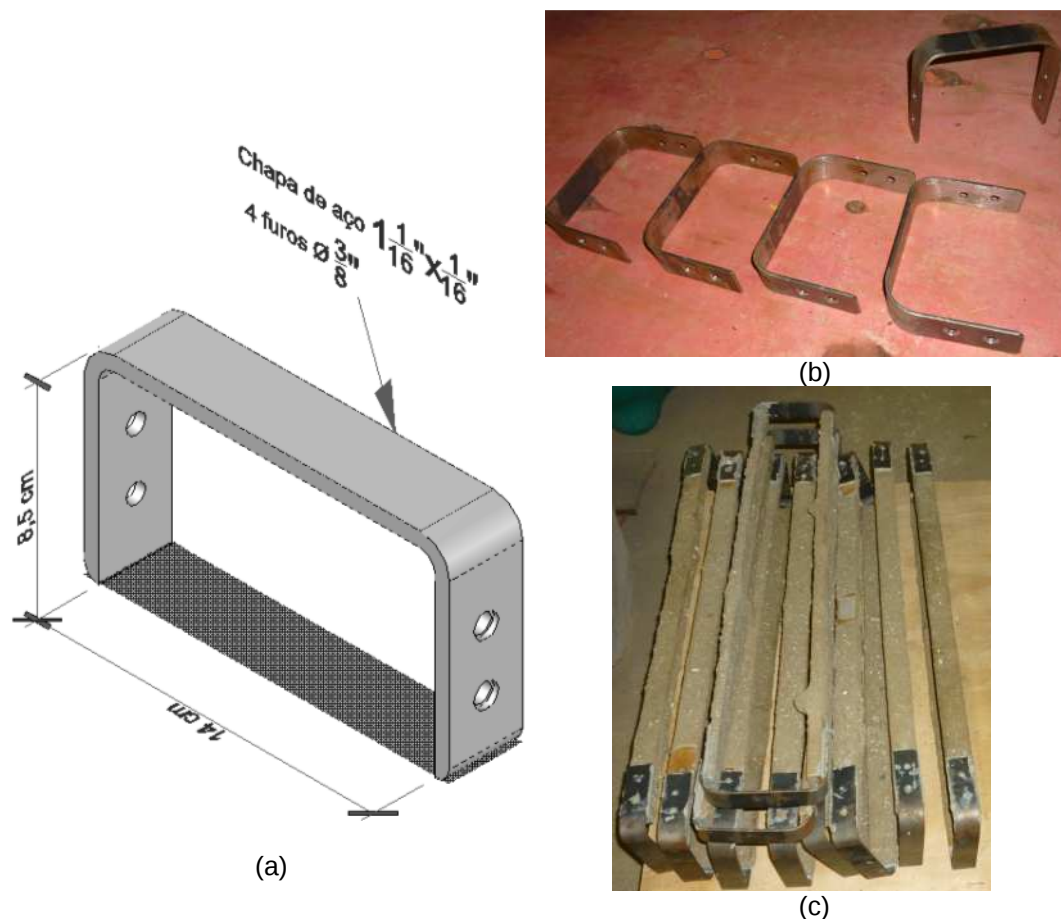


Figura 3.11 – Estribos das vigas V1 e V3. (a) Esquema geral de chapa em aço com forma de C, (b) Chapas em C, (c) Estribos formados por tiras de bambu e chapas de aço.

3.4. Montagem do ensaio

As vigas testadas foram solicitadas no bordo superior por uma carga central concentrada gerada pela ação de dois macacos hidráulicos com capacidade de 500 KN cada um (Figura 3.12). A carga foi transmitida desde a superfície dos êmbolos dos macacos até a superfície do bordo superior da viga por um conjunto nivelado de chapas de aço. Na Figura 3.15 se vê o esquema geral da montagem do ensaio.

Para os apoios das vigas, empregou-se chapas (15 x 18 x 2 cm) e roletes lisos de aço com uma polegada de diâmetro (Figura 3.13). Além disso, para evitar uma possível instabilidade lateral originada pela excentricidade entre o carregamento e as reações nos apoios, usou-se sobre as faces frontal e posterior das vigas, elementos que constituíram o sistema de contenção lateral (ver as Figuras 3.14 e 3.15).



Figura 3.12 – Macacos hidráulicos de 500KN cada um. Conjunto de chapas niveladas de transmissão de carga.

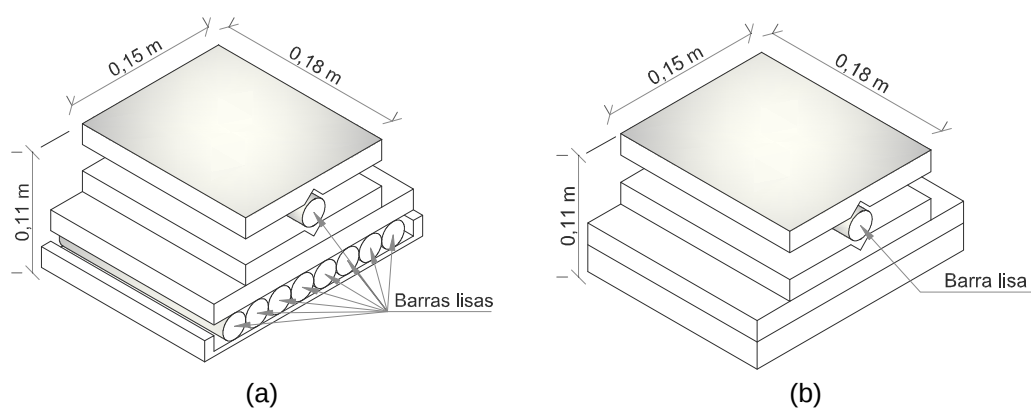


Figura 3.13 – Apoios de viga, (a) primeiro gênero e (b) segundo gênero.

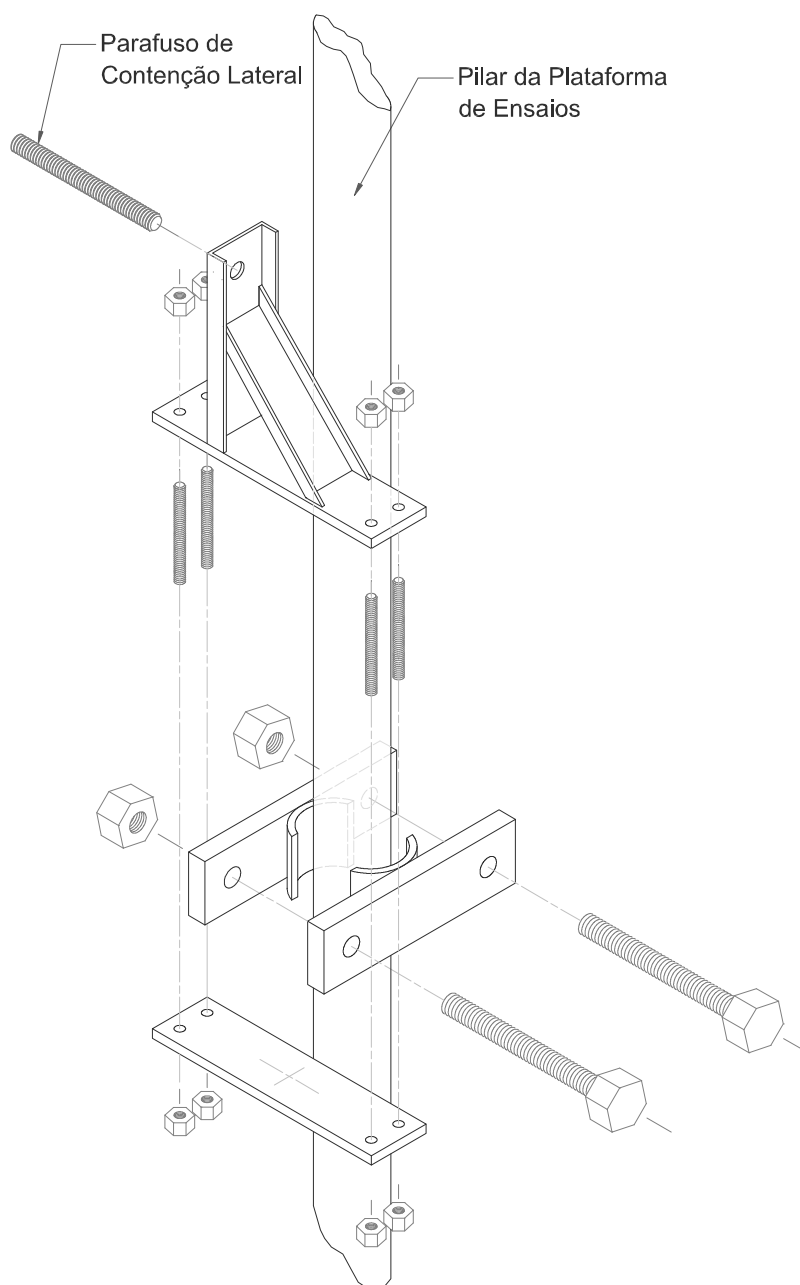


Figura 3.14 – Sistema de contenção lateral.

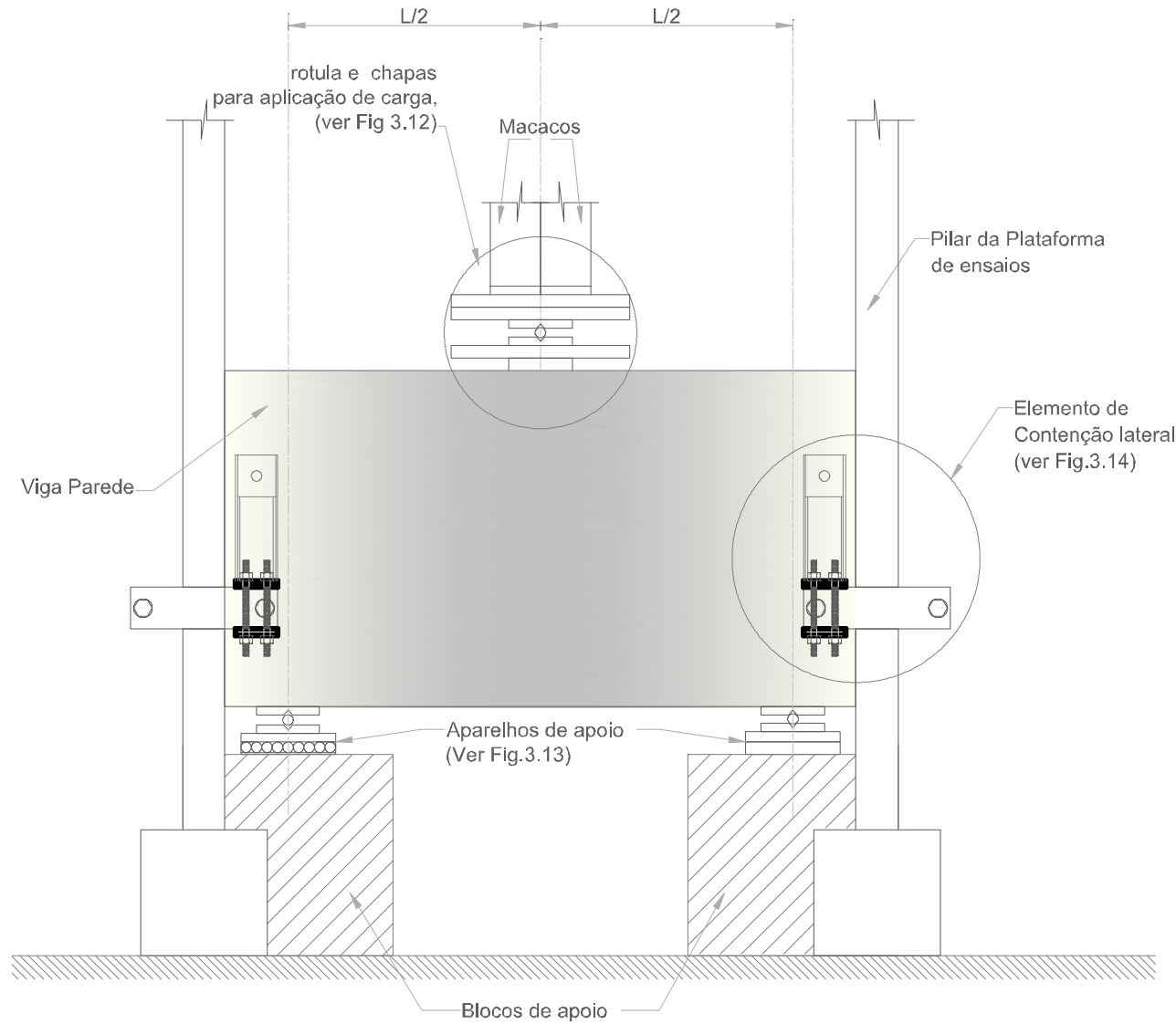


Figura 3.15 – Montagem geral do ensaio.

3.5. Instrumentação

Usou-se um sistema de aquisição de dados NI PXI 502 com o programa na plataforma LabView 8.6 para registrar as medições de deslocamentos, deformações e cargas, que foram obtidas respectivamente mediante o emprego de transdutores de deslocamento, extensômetros e um transdutor de pressão. No caso dos transdutores de deslocamento, localizaram-se em cinco pontos de cada viga testada, distribuídos da seguinte forma: três no bordo inferior, um no bordo superior e um na zona inferior da face lateral da viga. Para maior clareza se recomenda ver a Figura 3.16.

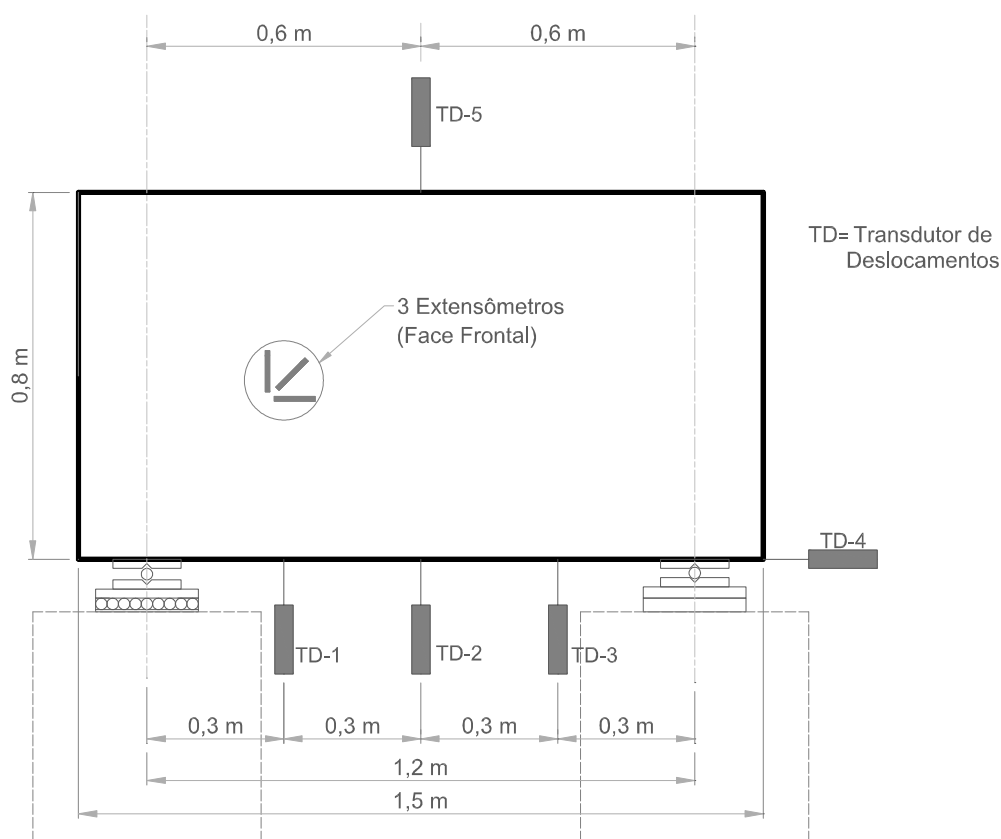
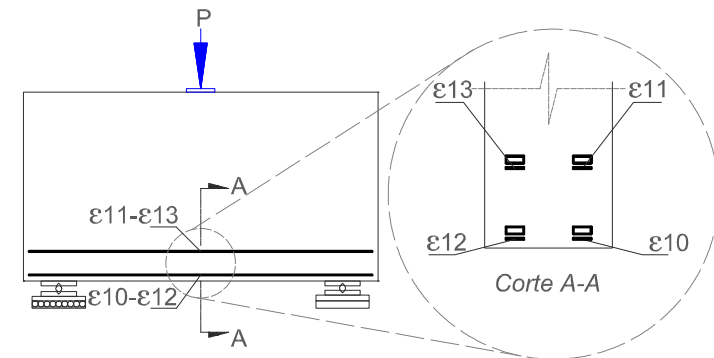


Figura 3.16 – Extensômetros e Transdutores de deslocamento

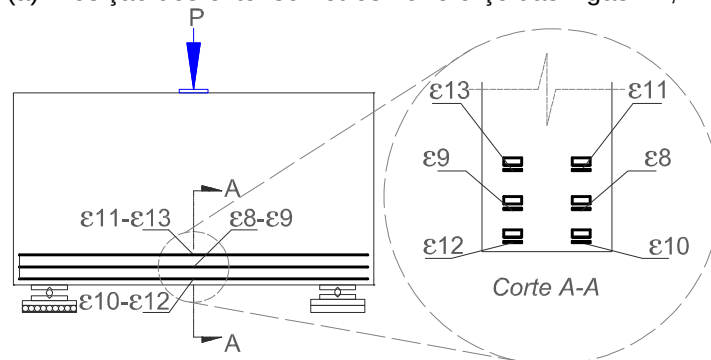
Para a medição de deformações, empregou-se extensômetros elétricos axiais únicos que foram posicionados na superfície das tiras do bambu de reforço principal (Figura 3.17). Note-se que os extensômetros posicionaram-se no meio do vão da viga, pois, é onde existe o momento fletor máximo. Para as

deformações no concreto, os extensômetros elétricos se localizaram na zona central da biela inclinada de compressão, como se pode observar na Figura 3.16.

Para a medição da carga aplicada, foi usado um transdutor de pressão calibrado, o qual é mostrado na Figura 3.18.



(a) Posição dos extensômetros no reforço das vigas V1, V2 e V4.



(b) Posição dos extensômetros no reforço principal da Viga V3



(c) Extensômetros em tiras de bambu.



(d) Extensômetros em tiras de bambu.



(e) Proteção de extensômetro

Figura 3.17 – Instrumentação para a medição de deformações- Extensômetros



Figura 3.18 – Instrumentação para a medição da carga -Transdutor de pressão

3.6. Procedimento do ensaio

Antes de realizar cada ensaio foi necessário posicionar a viga de forma que a distância entre os apoios fosse 120 cm, e que o arranjo das chapas para a transmissão de carga estivesse nivelado e localizado no cento da face superior da viga. Além disso, a viga foi nivelada com resina plástica. O procedimento do ensaio levado a cabo foi:

a. **Conexão e revisão do sistema de aquisição de dados:**

Depois de posicionar e nivelar a viga sobre a plataforma do ensaio, realizou-se a instalação do sistema de aquisição de dados, o qual se projetou para registrar deslocamentos, deformações, força aplicada e tempo do ensaio.

Revisou-se a coerência das leituras do sistema de aquisição de dados fazendo inicialmente uma aplicação progressiva de carga, deixando a estrutura se acomodar durante um minuto cada 5 KN. Neste processo de pré-carregamento atingiu-se uma carga de cinco toneladas.

b. **Carregamento:**

Com o sistema funcionando adequadamente, o carregamento se iniciou permitindo o acomodamento da estrutura durante um minuto a cada duas toneladas aplicadas.

c. **Aparição de fissuras:**

Quando a primeira fissura apareceu na viga, foram registradas as informações de carga de sua ocorrência e abertura de fissura (medição realizada com uma lupa graduada). Este processo se repete com todas as fissuras que surgem a cada duas toneladas até a ruína da viga.