

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BAMBU

Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Campinas, SP
Fevereiro - 2002

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BAMBU

Autora: Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira

Orientador: Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Jr.

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração em Edificações.

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese.

06/05/02

Campinas, SP
Fevereiro - 2002

Prof. Dr.

Matrícula:

21412-4

Nº CHAMADA T/UNICAMP
F413V
V EX
TOMBO ECI 49618
PROC 16-837102
C DX
PREÇO R\$ 11,00
DATA 14/06/01
Vº CPD _____

CM00169102-1

18 10 244920

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F413v Ferreira, Gisleiva Cristina dos Santos
Vigas de concreto armadas com bambu /
Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira.--Campinas,
SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Armando Lopes Moreno Jr.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual
de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Vigas. 2. Bambu. 3. Concreto. I. Moreno
Júnior, Armando Lopes. II. Universidade Estadual
de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III.
Título.

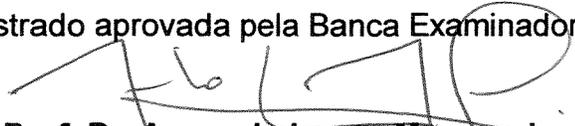
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

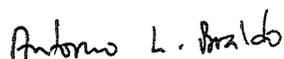
VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BAMBU

Autora: Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Jr.
Presidente e Orientador / Unicamp



Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo
Feagri / Unicamp



Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia
Fec / Unicamp

Campinas, 25 de fevereiro de 2002

0619 288
222 6490

“É duplamente vencedor quem, na vitória, venceu a si mesmo”

Publilio Siro

Dedicatória

Aos meus pais que me proporcionaram a alegria de estar completando mais esta etapa de minha vida. Também ofereço as minhas irmãs, amigos e professores que me ajudaram a desenvolver este trabalho.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Jr., meu orientador, pela sua confiança em minha capacidade técnica e por me direcionar em todos os passos deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo pela sua ajuda nos momentos de dúvida.

A todos os professores do Departamento de Arquitetura e Construção por me receberem com atenção e carinho.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas pelo acompanhamento e preocupação na etapa experimental do meu trabalho.

As pessoas do Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola pela colaboração no corte e manuseio dos colmos de bambu utilizados em meu trabalho.

Ao Instituto Agrônomo de Campinas, especialmente ao pesquisador científico Anísio. Azzini, pelo fornecimento de material indispensável à minha pesquisa.

A todos os amigos, especialmente Daniel, Aninha, Wilza, Martha, Cal, Aline, Adriana, que acompanharam de perto todo meu trabalho.

A todos, que de alguma forma me ajudaram na realização deste trabalho...

Muito obrigada.

Sumário

	Página
Lista de tabelas	XIII
Lista de figuras	XV
Lista de Gráficos	XIX
Resumo	XXI
Abstract	XXII
1 Introdução	1
2 Revisão bibliográfica	5
2.1 Matéria-prima de origem vegetal	5
2.2 Bambu como elemento estrutural	10
2.3 Propriedades mecânicas do bambu	12
2.4 A espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i>	14
2.5 Dificuldades da associação bambu/concreto	16
2.5.1 Absorção de água	16
2.5.2 Variação dimensional	17
2.5.3 Aderência entre o bambu e o concreto	19
2.6 Durabilidade do bambucreto	21

2.7	Recomendações para uso do bambucreto	22
2.8	Vantagens e desvantagens do bambu	23
2.8.1	Vantagens	23
2.8.2	Desvantagens	23
2.9	Colheita e preservação	24
2.10	Investigações experimentais realizadas	25
2.10.1	Comportamento de vigas de concreto reforçadas com bambu	25
2.10.2	Caracterização física e mecânica de espécies de bambu	27
2.10.3	Boletim da Diretoria de Obras Públicas de São Paulo (1934)	30
3	Programa Experimental	34
3.1	Considerações iniciais	34
3.2	Ensaio de caracterização dos materiais	34
3.2.1	Ensaio de tração paralela às fibras	34
3.2.2	Ensaio de compressão paralela às fibras	36
3.2.3	Ensaio de variação dimensional	38
3.2.4	Ensaio de arrancamento (<i>Pull-out</i>)	40
3.3	Detalhes das Vigas e Esquemas de Carregamento	41
3.4	Instrumentação	46
3.5	Ensaio à Flexão de Vigas de Concreto Armadas com Bambu	48
4	Materiais e Métodos	50
4.1	Bambu	50
4.1.1	Procedimentos de colheita e armazenagem do bambu	50
4.2	Ensaio de tração paralela às fibras	53
4.3	Ensaio de compressão paralela às fibras	58
4.4	Ensaio de variação dimensional	60
4.5	Ensaio de arrancamento (<i>Pull-out</i>)	63

4.6 Concreto	68
4.6.1 Cimento	70
4.6.2 Agregados	71
4.6.3 Aço	73
4.7 Vigas	75
5 Resultados	83
5.1 Caracterização do bambu	83
5.1.1 Ensaio de tração paralela às fibras	83
5.1.2 Ensaio de compressão paralela às fibras	87
5.1.3 Ensaio de variação dimensional	89
5.1.4 Ensaio de arrancamento (<i>Pull-out</i>)	92
5.2 Dimensionamento à flexão, teórico, para vigas armadas com bambu	96
5.2.1 Viga 1 (testemunho)	96
5.2.2 Viga 2, 3, 5 e 6 – Bambu como armadura longitudinal	98
5.2.3 Viga 4 – Armadura longitudinal dupla de bambu	101
5.3 Ensaio à flexão das vigas armadas com bambu	105
5.2.1 Viga 1	106
5.2.2 Viga 2	107
5.2.3 Viga 3	111
5.2.4 Viga 4	114
5.2.5 Viga 5	118
5.2.6 Viga 6	121
5.3.7 Caracterização do concreto das vigas	124

5.3.8 Deformações no concreto	126
5.3.9 Deslocamentos verticais	127
5.3.10 Evolução das fissuras das vigas ensaiadas	128
6 Análise dos Resultados	130
7 Conclusões e Recomendações	136
8 Referências Bibliográficas	138

Lista de Tabelas

	Página	
Tabela 2.1.1	Distribuição dos elementos anatômicos das espécies de bambu <i>P. viridis</i> (PV) e <i>D. giganteus</i> (DG)	7
Tabela 2.3.1	Relação entre a resistência à tração e peso específico	13
Tabela 2.4.1	Características físicas do bambu	14
Tabela 2.4.2	Características mecânicas do bambu	15
Tabela 2.10.1.1	Resultados dos ensaios das vigas	26
Tabela 2.10.2.1	Especificações das vigas ensaiadas	29
Tabela 5.1.1.1	Características físicas e mecânicas dos corpos-de-prova ensaiados a tração	83
Tabela 5.1.2.1	Características físicas e mecânicas dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela	88
Tabela 5.1.3.1	Resultados do ensaio do bambu Gigante natural	89
Tabela 5.1.3.2	Resultados do ensaio do bambu gigante com piche e areia	89
Tabela 5.1.3.3	Resultados do ensaio do bambu gigante com verniz e areia	90
Tabela 5.1.4.1	Propriedades mecânicas do concreto utilizado no Ensaio de Arrancamento (<i>Pull-out</i>)	93
Tabela 5.1.4.2	Características dos corpos-de-prova de bambu sem tratamento	94
Tabela 5.1.4.3	Características físicas dos corpos-de-prova de bambu com piche e areia	94
Tabela 5.1.4.4	Características físicas dos corpos-de-prova de bambu com verniz e areia	94
Tabela 5.1.4.5	Características físicas dos corpos-de-prova de bambu com verniz e arame	94
Tabela 5.3.1	Resultados obtidos para as vigas ensaiadas	105
Tabela 5.3.7.1	Compressão diametral do concreto das vigas	125
Tabela 5.3.7.2	Compressão axial do concreto das vigas	126

Lista de Figuras

		Página
Figura 2.2.1	Anatomia do bambu	6
Figura 2.4.1	Características do corpo de prova e montagem do ensaio de compressão diametral	15
Figura 2.5.2	Variação dimensional do bambu em contato com o concreto fresco	18
Figura 2.10.1.1	Dimensões e posição da armadura de bambu nas vigas ensaiadas	25
Figura 2.10.2.1	Absorção de água de sete espécies de bambu estudadas	27
Figura 2.10.2.2	Esquema do corpo-de-prova utilizado no teste de arrancamento	28
Figura 2.10.2.3	Dimensões e armaduras das vigas reforçadas com bambu	29
Figura 3.2.1.1	Detalhe do extensômetro elétrico	35
Figura 3.2.1.2	Aquisitor de dados	36
Figura 3.2.2.1	Tecido do bambu aumentado 44 vezes	37
Figura 3.2.2.2	Dimensões dos corpos-de-prova para o ensaio de compressão	38
Figura 3.2.3.1	Tratamento de impermeabilização	40
Figura 3.2.4.1	Posicionamento das taliscas de bambu nas fôrmas para ensaio de arrancamento	41
Figura 3.3.1	Armadura das vigas confeccionadas	42
Figura 3.3.2	Armadura de bambu com tratamento de verniz e arame	43
Figura 3.3.3	Armadura da viga 1	43

Figura 3.3.4	Seção transversal da viga 2	44
Figura 3.3.5	Seção transversal da viga 4	44
Figura 3.3.6	Posicionamento da armadura de bambu na viga 5	45
Figura 3.3.7	Posicionamento das cargas no carregamento das vigas	45
Figura 3.4.1	Disposição dos extensômetros na Viga 1	46
Figura 3.4.2	Disposição dos extensômetros nas Vigas 2 e 3	47
Figura 3.4.3	Disposição dos extensômetros nas Vigas 5 e 6	47
Figura 3.5.1	Viga 3 antes da aplicação de carga	49
Figura 3.5.2	Detalhe da viga 3 posicionada no pórtico para ensaio de flexão	49
Figura 4.1.1.1	Moita de bambu Gigante no IAC - Campinas	50
Figura 4.1.1.2	Dispositivo circular com lâminas	51
Figura 4.1.1.3	Taliscas de bambu secando ao ar	52
Figura 4.1.1.4	Taliscas de bambu imersas em água	52
Figura 4.2.1	Taliscas de bambu para o ensaio de tração	53
Figura 4.2.2	Corpos-de-prova com redução da área transversal central para o ensaio de tração	54
Figura 4.2.3	Aspecto da borracha após a tentativa de ensaio de tração	55
Figura 4.2.4	Bambu “cimentado” ao cano de aço fundido	55
Figura 4.2.5	Braçadeiras de metal	56
Figura 4.2.6	Ruptura “serrada” da seção próxima ao nó do corpo-de-prova	57
Figura 4.2.7	Braçadeiras de metal encapadas com lixa	58
Figura 4.3.1	Lixadeira de madeira	59
Figura 4.3.2	Corpos-de-prova após a ruptura	59
Figura 4.3.3	Prensa usada no ensaio de compressão	60
Figura 4.4.1	Dimensões dos corpo-de-prova	61
Figura 4.4.2	Amostras de bambu saturadas	62
Figura 4.4.3	Amostras de bambu em estufa	63
Figura 4.5.1	Tratamento de piche e areia	64
Figura 4.5.2	Tratamento de verniz e areia	64
Figura 4.5.3	Tratamento de verniz e arame	65
Figura 4.5.4	Corpos-de-prova com tratamentos para o ensaio de arrancamento (“Pull-out”)	66

Figura 4.5.5	Prensa adaptada para o ensaio de arrancamento (“Pull-out”)	67
Figura 4.5.6	Posicionamento dos relógios comparadores	68
Figura 4.6.1	Ensaio de compressão axial	69
Figura 4.6.2	Ensaio de compressão diametral	70
Figura 4.7.1	Detalhe da armadura da Viga 1	75
Figura 4.7.2	Detalhe da armadura da Viga 2	76
Figura 4.7.3	Detalhe da armadura da Viga 3	76
Figura 4.7.4	Detalhe da armadura da Viga 4	77
Figura 4.7.5	Detalhe da armadura da Viga 5	78
Figura 4.7.6	Detalhe dos extensômetros colados nas taliscas de bambu	78
Figura 4.7.7	Fôrmas das vigas	79
Figura 4.7.8	Concretagem das vigas	80
Figura 4.7.9	Posicionamento da viga no pórtico	81
Figura 4.7.10	Detalhe das fissuras	81
Figura 5.1.1.1	Detalhe do extensômetro após a ruptura do CP no ensaio à tração	84
Figura 5.1.2.1	Detalhe da ruptura do CP de bambu no ensaio à compressão	88
Figura 5.1.4.1	Detalhe do posicionamento dos relógios no ensaio de arrancamento (“Pull-out”)	93
Figura 5.3.1.1	Detalhe da ruptura da viga 1	106
Figura 5.3.2.1	Fissura da viga 2 durante o ensaio à flexão	108
Figura 5.3.2.2	Detalhe da ruptura do concreto da viga 2 no ensaio à flexão	108
Figura 5.3.3.1	Detalhe das fissuras da viga 3 durante seu carregamento	111
Figura 5.3.4.1	Posicionamento da viga 4 no pórtico	114
Figura 5.3.4.2	Detalhe da ruptura do concreto no ponto de aplicação de carga da viga 4	115
Figura 5.3.5.1	Detalhe das fissuras de ruptura da viga 5	118
Figura 5.3.6.1	Detalhe das fissuras de ruptura das vigas 5 e 6	121
Figura 5.3.7.1	Corpo-de-prova para ensaio de compressão axial instrumentado	124
Figura 5.3.7.2	Ensaio de compressão diametral	125

Figura 5.3.10.1	Panorama das fissuras por escoamento da armadura das vigas 1, 2, 3, e 4	131
Figura 5.3.10.2	Panorama das fissuras por fendilhamento das vigas 5 e 6	131

Lista de Gráficos

Gráfico 4.6.2.1	Curva granulométrica do agregado graúdo	72
Gráfico 4.6.2.2	Curva granulométrica do agregado miúdo	73
Gráfico 4.6.3.1	Propriedades mecânicas do aço CA-50B	74
Gráfico 5.1.1.1	Tensão x Deformação – CP 01	85
Gráfico 5.1.1.2	Tensão x Deformação – CP 02	85
Gráfico 5.1.1.3	Tensão x Deformação – CP 03	86
Gráfico 5.1.1.4	Tensão x Deformação – CP 04	86
Gráfico 5.1.1.5	Tensão x Deformação – CP 05	87
Gráfico 5.1.3.1	Retração total do bambu Gigante (<i>D. giganteus</i>)	91
Gráfico 5.1.3.2	Umidade ao ar do bambu Gigante (<i>D. giganteus</i>)	91
Gráfico 5.1.3.3	Umidade saturada do bambu Gigante (<i>D. giganteus</i>)	93
Gráfico 5.1.4.1	Tensão x deslocamento do ensaio de arrancamento	95
Gráfico 5.2.1.1	Deformação na armadura de aço da Viga 1	107
Gráfico 5.3.2.1	Deformação na armadura da viga 2 no quarto do vão direito	109
Gráfico 5.3.2.2	Deformação na armadura da viga 2 no meio do vão	109
Gráfico 5.3.2.3	Tensão x deformação da viga 4 no meio do vão	110
Gráfico 5.3.2.4	Tensão x deformação da viga 2 no quarto do vão	110
Gráfico 5.3.3.1	Deformação na armadura da viga 3 no quarto do vão direito	112
Gráfico 5.3.3.2	Deformação na armadura da viga 3 no meio do vão	112
Gráfico 5.3.3.3	Tensão x deformação da viga 3 no meio do vão	113
Gráfico 5.3.3.4	Tensão x deformação da viga 3 no quarto do vão	113
Gráfico 5.3.4.1	Deformação na armadura da viga 4 no quarto do vão direito	116
Gráfico 5.3.4.2	Deformação na armadura da viga 4 no meio do vão	116
Gráfico 5.3.4.3	Tensão x deformação da viga 4 no meio do vão	117

Gráfico 5.3.4.4	Tensão x deformação da viga 4 no quarto do vão	117
Gráfico 5.3.5.1	Deformação na armadura da viga 5 no quarto do vão	119
Gráfico 5.3.5.2	Deformação na armadura da viga 5 no meio do vão	119
Gráfico 5.3.5.3	Tensão x deformação da viga 5 no meio do vão	120
Gráfico 5.3.5.4	Tensão x deformação da viga 5 no quarto do vão	120
Gráfico 5.3.6.1	Deformação na armadura da viga 6 no quarto do vão direito	122
Gráfico 5.3.6.2	Deformação na armadura da viga 6 no meio do vão	122
Gráfico 5.3.6.3	Tensão x deformação da viga 6 no meio do vão	123
Gráfico 5.3.6.4	Tensão x deformação da viga 6 no quarto do vão	123
Gráfico 5.3.8.1	Deformação do concreto na região comprimida das vigas	127
Gráfico 5.3.9.1	Deslocamento vertical das vigas ensaiadas	128
Gráfico 6.1	Carga x deformação das vigas 1 e 4	132
Gráfico 6.2	Carga x deformação das vigas 5 e 6	133
Gráfico 6.3	Carga x deformação das vigas 2 e 3	134

RESUMO

A utilização do bambu como armadura em vigas de concreto pode viabilizar construções rurais, uma vez que se trata de material de baixo custo e de fácil obtenção no meio rural. Neste sentido, este trabalho pretendeu apresentar soluções aos principais problemas de utilização do bambu como armadura em elementos estruturais de concreto, tais como o modelo de dimensionamento e a aderência do bambu ao concreto. Para tanto, foram construídas seis vigas de concreto armadas com taliscas de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* (bambu Gigante) com variação de taxa de armadura e no comprimento das taliscas. Para proporcionar uma melhor aderência entre o bambu e o concreto foram analisados três tipos de mecanismos visando o incremento de aderência do bambu ao concreto, sendo o tratamento de verniz e anéis de arame farpado o que apresentou melhores resultados. Os resultados obtidos da análise das vigas construídas mostraram que os procedimentos teóricos propostos podem ser utilizados no dimensionamento de vigas de concreto armadas com bambu.

palavras chaves: viga, bambu, concreto

ABSTRACT

The use of the bamboo as armature in reinforced concrete beams can make rural constructions feasible because it is a low cost construction material and it is easily obtained in the rural areas. That's why, the objective of this work was to present solutions to the principal problems of using the bamboo as armature in concrete structural elements, that are: dimension model and its adherence to the concrete. To accomplish this experiment, six reinforced concrete beams were constructed with bamboo strips from the specie *Dendrocalamus giganteus* (Giant bamboo) with variations of armature rate and length of the bamboo strips. Before constructing the beams, three adherence techniques were tested. The results indicated that the best adherence method tested was the varnish with rings of wire. Then, the results obtained from the analyzed beams showed that the proposed theoretical procedures can be used in the dimensioning of reinforced concrete beams with bamboo armature.

Keywords: beams, bamboo, concrete

1 INTRODUÇÃO

O bambu é uma planta de crescente importância para a humanidade, conhecida como “a madeira dos pobres”, na Índia, “o amigo das pessoas”, na China, e como “o irmão”, no Vietnã, sendo bem menos conhecida no Ocidente. Ele cresce mais rapidamente do que qualquer outra planta no planeta e, sua admirável vitalidade, grande versatilidade, leveza, resistência, facilidade em ser trabalhado com ferramentas simples, são qualidades que tem proporcionado ao bambu os mais variados papéis no meio rural.

A evolução do setor agropecuário tem sido grande nos últimos anos. Com isso, a demanda por infra-estrutura rural tem aumentado significativamente.

A partir da década de 70, passou a existir um maior rigor na legislação e fiscalização da exploração de recursos naturais, principalmente em relação ao corte de madeira nativa.

Os proprietários rurais que antes utilizavam indiscriminadamente os materiais naturais, sem preocupação com a questão ecológica, começaram a ter problemas e muitos se viram na situação de escassez de material para a realização de novas construções.

Paralelamente a essa situação, para a obtenção da infra-estrutura necessária à expansão do setor, os projetos de construções rurais passam por mudanças, o que os torna cada vez mais refinados, com inúmeros detalhes e dignos de um projeto urbano.

Portanto, muitos proprietários passaram a empregar materiais de construção geralmente utilizados na cidade, como o cimento, o aço, etc., cujos preços acabam por encarecer a construção rural, principalmente devido ao transporte.

Diante desse problema, os proprietários rurais menos abastados encontraram-se numa situação complicada. Se por um lado os materiais naturais que estavam acostumados a utilizar passaram a sofrer severa fiscalização, por outro, os tradicionalmente utilizados na cidade eram muito caros.

A saída foi a utilização de materiais existentes localmente, porém que não agridam o meio ambiente. Em substituição à madeira (largamente utilizada e que teve o seu corte sujeito a diversas restrições) uma boa alternativa é a utilização do bambu.

No entanto, no Brasil, o bambu não é plenamente utilizado como um material estrutural, ao contrário do que ocorre em outros países. Por exemplo, no Himalaia e entre a China e o Tibet, gigantescas pontes foram construídas com cabos de bambu trançado. Essas obras inspiraram a construção das grandes pontes de aço, hoje comuns em diversos países.

Baseado em conhecimentos adquiridos por várias gerações, o bambu vem sendo cultivado e empregado, por suas características de rusticidade, rapidez de crescimento, baixo custo e, por ter se adaptado às diversas condições edafoclimatológicas, o que tem propiciado sua grande disponibilidade ao longo do território brasileiro.

O bambu pode ser utilizado diretamente em construções ou combinado com materiais convencionais, como paredes de pau-a-pique ou, mais recentemente, na substituição do aço em construções secundárias, embora apresente problemas como o baixo módulo de elasticidade longitudinal em relação ao aço, baixa aderência ao concreto e instabilidade dimensional.

Devido a pequena quantidade de estudos experimentais executados até o momento, não se tem conhecimentos suficientes do comportamento destas vigas de concreto armadas com bambu em relação aos estados limites. Desta forma, tornam-se imprescindíveis estudos experimentais de modelos, para se definir parâmetros que forneçam subsídios que possibilitem garantir segurança frente aos estados limites.

As pesquisas envolvendo o emprego de bambu são crescentes em nível mundial, impostas pela necessidade de aproveitar recursos naturais para viabilizar construções com características especiais, como por exemplo, uma melhor resistência estrutural em regiões sujeitas a terremotos.

No Brasil, a principal aplicação do bambu é no meio rural, na agricultura (tutor de culturas trepadeiras, como tomate, chuchu) e como cercas de hortas, galinheiros. O bambu também pode ser aplicado em sistemas de controle de erosão, sistemas subterrâneos de drenagem e sistemas de irrigação (PEREIRA, 1997). Outras aplicações especiais estão sendo estudadas, como na confecção de compósitos (CBVC) de cimento-bambu (BERALDO, 1994).

As pesquisas envolvendo este tipo de material são motivadas pela necessidade da obtenção de materiais de construção que permitam a obtenção de construções com um menor custo econômico, além das vantagens que serão obtidas com a melhoria das habitações ou instalações rurais.

A planta vulgarmente conhecida como bambu pertence à família *Graminae*, com aproximadamente 45 gêneros e mais de mil espécies espalhadas pelo mundo.

Torna-se uma alternativa viável a utilização desse material devido a fatores naturais e econômicos: tem um ciclo mais curto que o da madeira (o que facilita o reflorestamento), seu custo de plantio é relativamente baixo, seu crescimento é rápido, seu cultivo é simples e o colmo do bambu é praticamente todo utilizável. Além disso,

como material de construção, apresenta boa resistência aos esforços mecânicos, leveza e facilidade de manuseio com ferramentas simples, dentre outras vantagens.

Grande parte das utilizações atribuídas hoje ao aço eram antes desempenhadas pelo bambu, devido suas fibras serem longas e dispostas paralelamente na direção longitudinal do colmo, proporcionando uma alta resistência à tração.

Para a utilização em construções, LOPEZ (1974) que as espécies mais apropriadas são o bambu gigante, o bambu comum, o bambu imperial, o tuldoides e o guadua. Dentre essas espécies, as que apresentam maior resistência mecânica são as tuldoides e gigante, portanto, as mais utilizadas.

A união do concreto com o bambu foi batizada por alguns pesquisadores de "bambucreto". A utilização do bambucreto no meio rural visa competir com o preço de peças convencionais de concreto armado com aço, e também porque muitas vezes é difícil obter o aço em algumas regiões rurais mais afastadas.

Como reforço para o concreto, a utilização do bambu esbarra, principalmente, na pouca aderência que este desenvolve com o concreto, além da carência de pesquisas que apontem para métodos de dimensionamento de peças de concreto armadas com bambu.

O estudo teórico/experimental aqui relatado teve por objetivo a definição de parâmetros necessários ao estabelecimento de procedimentos de dimensionamento à flexão de vigas de concreto armadas com bambu, que garantam segurança frente aos estados limites. Parâmetros sempre colocados como obstáculo à utilização do bambu como armadura em vigas de concreto, como modelo de dimensionamento e aderência bambu/concreto, foram abordados de forma clara e direta neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Matériaprima de origem vegetal

Existem no mundo cerca de 75 gêneros e 1250 espécies de bambus, das quais 62% são nativas da Ásia, 34% das Américas e 4% da África e Oceania. A classificação e identificação botânica das espécies é muito difícil, tendo em vista que este tipo de vegetal floresce em intervalos de tempo muito longos (30 a 100 anos), dependendo da espécie e de condições ambientais LOPEZ (1974).

De acordo com LOPEZ (1974), a história do bambu remonta ao começo da civilização na Ásia, sendo a origem da palavra bambu desconhecida. Dos antigos usos que se faziam do bambu, destacam-se a obtenção de papel, álcool, tecidos, cordas, cabos, construção de pontes e uma infinidade de outros usos, como utensílios domésticos, artesanato, construção civil e rural.

Pelas características de seu colmo, o bambu é considerado uma planta lenhosa, monocotiledônea, pertencente às Angiospermas, da família *Graminae*, tribo *Bambusae*, constituído basicamente por colmo, rizoma e um sistema radicular fasciculado. Seu colmo é dividido em intervalos por um diafragma saliente, formando os nós e entrenós (figura 2.1.1). A cavidade de cada intervalo apresenta tem diâmetro muito variável, chegando a ser, para algumas espécies, quase imperceptível, sendo o colmo praticamente sólido.



Figura 2.2.1 – Anatomia do bambu

O bambu pode apresentar a ramificação do rizoma de dois tipos:

- a) Grupo Paquimorfo, simpodial ou entouceirante, que se desenvolve principalmente nas zonas tropicais, compreendendo entre outros, os gêneros *Bambusa* e *Dendrocalamus*;
- b) Grupo Leptomorfo, monopodial ou alastrante, que se desenvolve principalmente em zonas temperadas, compreendendo, entre outros, os gêneros *Arundinaria* e *Phyllostachys*.

A parte externa do colmo é formada por duas camadas de células epidermas cobertas por uma camada cutinizada e com cera. Mais internamente ocorre uma camada mais espessa e altamente lignificada, constituída de numerosas células esclerenquimáticas (fibras), dificultando qualquer movimento lateral de líquidos.

O tecido do colmo é composto pelas células de parênquima, pelos feixes vasculares e pelas fibras. O colmo todo compreende cerca de 50% de parênquima, 40% de fibras e 10% de tecidos condutores. Os feixes fibro-vasculares condutores compreendem o xilema e o floema, os quais são menores e mais numerosos na

periferia do colmo e maiores e em menor número na parte interna do colmo, portanto, propiciando à parte externa maior resistência que a interna.

BERALDO e ZOULALIAN (1995) apresentaram a distribuição dos elementos anatômicos das espécies de bambu *Phyllostachis viridis* e *Dendrocalamus giganteus*, obtida através de imagem microscópica (tabela 2.1.1). A largura da lâmina (correspondente à espessura da parede do colmo) para observação microscópica foi subdividida em 3 regiões, correspondendo às camadas interna, intermediária e externa. Foi constatado que a concentração de fibras é 3 vezes maior na camada externa que na interna, ocorrendo o inverso em relação às células de parênquima.

Tabela 2.1.1 - Distribuição dos elementos anatômicos das espécies de bambu *P. viridis* (PV) e *D. giganteus* (DG)

Camadas do colmo	Vasos (%)		Fibras (%)		Parênquima (%)	
	PV	DG	PV	DG	PV	DG
Interna	13	11	24	16	63	73
Intermediária	13	9	37	32	50	59
Externa	10	8	63	55	27	37

Fonte: BERALDO e ZOULALIAN (1995)

Pesquisando as espécies *Bambusa vulgaris*, *Guadua angustifolia* e *Dendrocalamus giganteus*, AZZINI et al (1977) observaram que a maior quantidade de feixes fibro-vasculares foi encontrada em colmos de *B. vulgaris* (410 feixes/cm²) enquanto que para o *D. giganteus* foram identificados 256 feixes/cm². Concluíram também que o número de feixes vasculares por unidade de superfície na camada externa foi sempre superior à camada interna.

A umidade natural do bambu diminui com a altura do colmo e varia com a idade e estação do ano. Durante a secagem, a retração do bambu não é contínua. Em colmos adultos, a secagem das diferentes espécies variam entre 4 e 16% na espessura da parede e entre 3 e 12% no diâmetro. A retração ao longo do comprimento é

desprezível, atingindo cerca de 0,1%. Como uma estimativa quantitativa, um bambu verde pode ter aproximadamente 100 a 125% de umidade com 1,5 ano de idade, podendo diminuir para 30% quando estiver maduro. Tem sido observado que a umidade ótima do bambu para utilização como reforço em elementos estruturais é entre 15 e 20 %, que pode ser obtida por secagem natural ou em estufa.

O bambu é um material leve, pois seu peso específico varia de 5 a 9 kN/m³, dependendo do teor de umidade dos colmos de bambu e da temperatura do ambiente.

A alta velocidade de crescimento dos colmos de bambu é uma de suas características principais. AZZINI e SALGADO (1992) estudando as espécies de bambu: *Bambusa tuldoides*, *Bambusa vulgaris*, *Bambusa vulgaris var. vittata*, *Dendrocalamus giganteus* e *Guadua angustifolia*, nas condições de solo e clima de Campinas, SP, concluíram que a maior velocidade de crescimento, tanto para o valor médio (10,6 cm/dia) como máximo (22,0 cm/dia), foi observada nos colmos de *D. giganteus*. Já os menores valores foram apresentados pelos colmos de *G. angustifolia*, com velocidade média de 5,7 cm/dia e máxima de 7,9 cm/dia.

Alguns países, como Costa Rica, Equador e Colômbia utilizam o bambu normalmente como material de construção. Segundo BARBOSA e INO (1998), na Costa Rica a produção habitacional em bambu é de aproximadamente, 100 casas por ano, apresentando desempenho exigido pela ONU para construções residenciais.

JANSSEN (1984) enumerou algumas propriedades que determinam o melhor uso das espécies de bambu:

- Porcentagem útil dos colmos, isto é, parte do colmo onde diâmetro e distância entre os nós são constantes.
- espessura da parede do colmo, que deve ser constante;
- propriedades mecânicas;
- durabilidade natural e preservação.

Segundo AZZINI et al (1978), as espécies de bambu mais difundidas no Brasil são *Bambusa tuldoides* Munro (bambu comum), *B. vulgaris* Schrad (bambu verde), *B. vulgaris* Schrad var. *vittata* (bambu imperial, amarelo), *Dendrocalamus giganteus* Munro (bambu gigante, balde) e algumas espécies do gênero *Phylllostachys* sp (cana da Índia).

Segundo o pesquisador citado anteriormente, a melhor maneira de plantio do bambu é cortar vários pedaços com duas gemas cada e preparar canteiros para enraizamento, que consistem na mistura de terra fértil e areia, com 20 cm de comprimento. Os pedaços devem ser enterrados deitados, a 10 cm de profundidade. Em 30 dias, já deverão estar surgindo brotos, mas se houver variações bruscas de temperatura, ocorrerá atrasos. A época ideal para plantio vai de outubro a março. Uma vez por ano deve-se fazer uma adubação de cobertura.

LOPEZ (1974) comentou que, entre 3 e 6 anos, o bambu adquire sua máxima resistência, que declina à medida em que o colmo vai secando, sendo que a idade mais apropriada para o corte dos colmos situa-se entre 2 e 6 anos, dependendo da espécie e sua aplicação final. É aconselhável realizar o corte nas estações de seca, pelo fato do reduzido crescimento vegetativo, com conteúdos de umidade e açúcares menores que em outras estações, reduzindo consideravelmente o ataque de fungos e pragas. Em geral, no Brasil, a melhor época para o corte é entre maio e agosto porque, além de ser uma estação de seca, é uma época em que os insetos estão em hibernação ou em um nível populacional muito baixo, infestando madeiras cortadas em períodos anteriores.

Os colmos do bambu possuem excelentes propriedades físicas e mecânicas que o qualificam, em certos casos, para serem utilizados no lugar de metais. Suas características de leveza, dureza, conteúdo de fibras, flexibilidade e facilidade de trabalho são ideais para os diferentes propósitos tecnológicos e são determinadas pela sua estrutura anatômica. Nos internós as células são axialmente orientadas, enquanto que nos nós aparecem interconexões transversais.

2.2 Bambu como Elemento Estrutural

Alguns pesquisadores estudaram as propriedades mecânicas do bambu. Na literatura, é possível encontrar muitos valores, no entanto, dificilmente encontra-se o mesmo resultado para dois autores diferentes. A divergência entre valores se dá, principalmente, pela ausência de normas para a realização dos ensaios, ficando a cargo de cada pesquisador executar o ensaio de acordo com o que achar mais apropriado e pelo fato do bambu ser um material natural, ele é conseqüentemente, um material heterogêneo.

Os primeiros experimentos de que se tem notícia com o bambu reforçando o concreto datam de 1917 na China, Japão e Filipinas. Por volta de 1918, os chineses foram os primeiros a utilizar o bambu como substituto do aço no reforço de concreto de pontes ferroviárias e outras construções. Na Europa, alemães e italianos, por volta dos anos 30, também já realizavam suas pesquisas. A 2ª Guerra Mundial incentivou os estudos, por parte de Japão e Estados Unidos, de se utilizar o bambu caso a obtenção do aço fosse dificultada.

Devido a sua alta resistência à tração, GHAVAMI (1995) recomendou o uso do bambu como um material alternativo, substituindo o aço, como reforço em peças de concreto. Par ao autor, as melhores espécies para este fim são *Bambusa vulgaris* e *Dendrocalamus giganteus*, respectivamente, com 170 MPa e 135 MPa de resistência à tração.

Segundo TARGA e BALLARIN (1990), a determinação do Módulo de Elasticidade de um colmo maduro, seco ao ar livre, apresentou valores entre 12.500 e 19.500 MPa e valor médio de 16.000 MPa. Para algumas espécies secas em estufas, o valor pode atingir até 22.500 MPa. Já os colmos verdes geralmente atingem valores de até 10.000 MPa. Estes valores fazem com que o uso do bambu seja atrativo, especialmente se a relação entre a resistência à tração e o peso específico do bambu for considerado.

Entretanto, a resistência à compressão é muito menor do que a resistência à tração, ficando entre 31 e 72 MPa. Geralmente a resistência aumenta com a maturidade do colmo. Experiências conduzidas com o *Dendrocalamus strictus*, mostraram aumentos significativos da resistência à compressão dos 6 meses aos 2,5 anos de idade (a Tensão de Ruptura, o Módulo de Elasticidade e a Resistência à Compressão cresceram respectivamente 79%, 38% e 76%). Normalmente, depois da idade de 5 anos o acréscimo de resistência é insignificante.

Ao executar ensaios de tração em bambu, BERALDO (1990) recomendou o uso de técnicas para melhorar a aderência entre o mesmo e as garras da máquina de ensaio, com a finalidade de impedir que o corpo-de-prova atinja o estado limite e rompa por esmagamento. O envolvimento do bambu em taliscas com resina sintética ou tiras de aço, ou a colocação de pinos metálicos ou tarugos de madeira nas cavidades dos bambus roliços, podem proporcionar um melhor desempenho do ensaio.

O emprego de taliscas de bambu no concreto melhora a aderência, mas traz como desvantagem incompatibilidade química do amido (presente na parte interna do bambu) com o concreto, que no caso de colmos roliços somente aparecerá nas extremidades. Este amido neutraliza a reação química entre o cimento e a água, diminuindo a resistência do concreto.

Outra aplicação que pode apresentar o concreto reforçado com bambu é na fabricação de moirões para cercas. Primeiramente, são necessárias fôrmas apropriadas de madeira ou ferro, que podem ser múltiplas para proporcionar maior rendimento na fabricação. Elas poderão ter dimensões variadas para fabricação de moirões de diversos tamanhos.

Pelos estudos realizados por AZZINI *et al* (1986), para se realizar uma boa escolha dos bambus destinados a servir como reforço no concreto deve-se seguir as seguintes recomendações:

- escolher colmos maduros, de coloração escura;
- cortar os colmos rente ao solo, deixando-os em pé no campo até secagem e início da queda das folhas;
- cortar os galhos laterais e deixar os colmos secar em local sombreado por mais trinta dias.

2.3 Propriedades Mecânicas do Bambu

Para determinar as propriedades mecânicas do bambu, devem ser conhecidas a idade, a umidade e a espécie que está sendo utilizada.

O bambu é um material orgânico, portanto, é natural a variação nas propriedades de resistência entre as espécies e até mesmo dentro das mesmas. Isso pode ocorrer dependendo da amostra e da sua localização no colmo, sendo que a parte central do colmo é melhor devido a uniformidade das dimensões do diâmetro e comprimento entre os nós. A resistência é máxima quando o bambu está completamente maduro, mas as várias espécies alcançam maturidade em diferentes idades. Assim, somente bambus maduros devem ser usados como reforço em peças de concreto.

GHAVAMI (1992) estudando a relação entre a resistência à tração e o peso específico, para alguns materiais (tabela 2.3.1), constatou que o bambu é o material que apresenta um valor maior para esta relação, o que torna vantajosa a sua utilização como material de construção.

Tabela 2.3.1 – Relação entre a resistência à tração e peso específico

Material	Res. Tração σ_t (N/mm ²)	Peso específico γ (N/mm ³ .10 ⁻²)	$R = \sigma_t / \gamma \cdot 10^2$	$R/R_{aço=1,00}$
Aço (CA 50 A)	500	7,83	0,63	1,00
Bambu	140	0,80	1,75	2,77
Alumínio	304	2,70	1,13	1,79
Ferro fundido	281	7,20	0,39	0,62

FONTE: GHAVAMI (1992)

GEYMAYER e COX (1970) estudaram duas espécies de bambu encontradas nos Estados Unidos (*A. tecta* e *A. gigantea*). A espécie que ofereceu melhor resistência mecânica foi *A. tecta*, conhecida como cana fina, apresentando valores de até 37 MPa de resistência à tração. Entretanto seu módulo de elasticidade foi relativamente baixo, normalmente menos do que 1/10 do aço. Tanto resistência à tração como módulo de elasticidade variam muito com o tipo e as condições ambientais em que se encontra a espécie testada. A resistência à tração do bambu sob sucessivos carregamentos pode ser consideravelmente mais baixa do que a resistência à tração estática, tendo uma redução de até 50% na espécie *A. tecta*. Amostras desta espécie que foram submetidas à tensão de tração de 200 a 580 kg/cm² durante 1 ano, aumentaram aproximadamente 40% do alongamento elástico.

Conhecimentos sobre a deformação à flexão do bambu são necessários para sua utilização como reforço em elementos como vigas e lajes. Segundo VIJAY RAJ (1991) a camada interna do bambu é mais fraca do que a externa, sendo a última até 2 vezes mais forte do que a camada interna. Ensaios realizados indicaram valores médios de resistência à tração de 140 MPa para a camada externa e 52 MPa para a camada interna. Portanto, a porção interna da parede do bambu pode ser retirada sem causar problema na resistência do mesmo.

A resistência à compressão do bambu, semelhante a outras madeiras, é mais alta quando medida paralelamente às fibras.

2.4 A Espécie *Dendrocalamus giganteus*

LIN (1968) descreveu o *Dendrocalamus giganteus* como possuindo colmos grandes, com altura de até 30 m, diâmetro de 20 a 30 cm, internós de 30 a 45 cm de comprimento e espessura de paredes entre 1 e 3 cm, sendo considerado como a maior espécie de bambu existente. É natural de Taiwan, Burma, Índia e Ceilão.

Em pesquisas realizadas principalmente no Rio de Janeiro, Brasil, foi constatado, nesta espécie, um crescimento de até 32 cm em um dia. Entre 4 e 12 meses, o colmo é mole e flexível, sendo indicado para fabricação de cestos e peças de decoração. A altura máxima é atingida entre 30 e 60 dias após a brotação e as fibras vão se tornando cada vez mais duras à medida que a planta cresce. Após 3 a 5 anos, esta espécie já alcançou o máximo de resistência mecânica e, portanto, já está pronta para ser utilizada na construção civil.

GHAVAMI (1994) obteve os valores apresentados nas tabelas 2.4.1 e 2.4.2 para as características físicas e mecânicas dessa espécie de bambu em particular:

Tabela 2.4.1 – Características físicas do bambu

Umidade natural (%)	Comprimento (m)	Distância entre nós (m)	Diâmetro (m)	Espessura (mm)	Peso específico (kN/m ³)
17,60	21,00	0,50	0,10	11,00	9,00

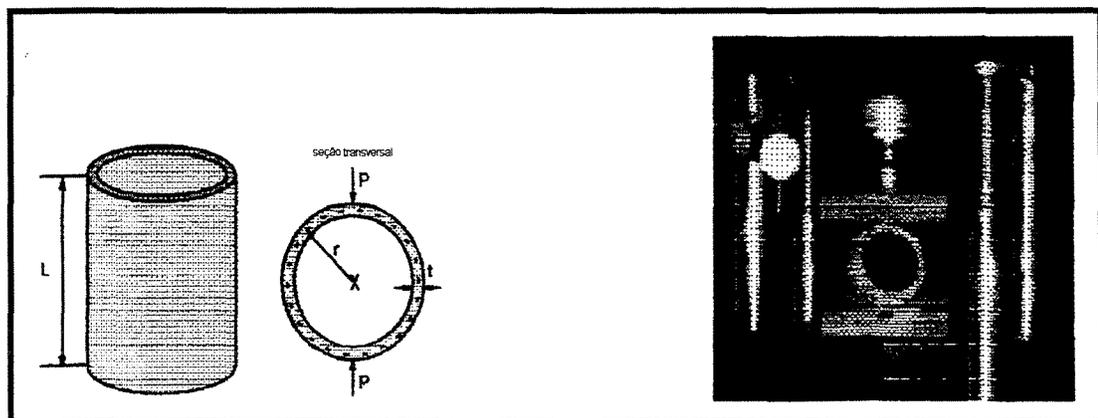
Fonte: GHAVAMI (1994)

Tabela 2.4.2 – Características mecânicas do bambu

	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)
Zona do entrenó	80	150
Zona do nó	39	119
Módulo de elasticidade	4020	14500

Fonte: GHAVAMI (1994)

Através do ensaio de compressão diametral (figura 2.4.1) LIMA JR. *et al.* (1999) determinaram a resistência à tração e o módulo de elasticidade transversal do bambu Gigante, sendo respectivamente, 20,53 MPa e 2,17 GPa. Os autores utilizaram a Teoria de Vigas Curvas para calcular a tensão máxima e o módulo de elasticidade transversal do bambu e concluíram, através de ensaios realizados anteriormente com outras espécies, que esta propriedade mecânica transversal do bambu é semelhante na maioria das espécies. Isto acontece porque as células de parênquima apresentam características mecânicas semelhantes para as diversas espécies de bambu. Estes resultados experimentais demonstram que o bambu pode ser utilizado como reforço em lajes de concreto.



Fonte: LIMA Jr. et al (1999)

Figura 2.4.1 – Características do corpo-de-prova e montagem do ensaio de compressão diametral

2.5 Dificuldades da Associação Bambu/Concreto

BERALDO (1991) avaliou que o uso do bambu como material de construção no Brasil não é mais difundido devido alguns fatores limitantes, como, a pequena vida útil do bambu frente ao aço; a variação volumétrica quando sujeito à umidade, o que acaba destruindo a união bambu/concreto; a baixa relação entre os módulos de elasticidade do bambu e do concreto, resultando em grandes deflexões e fissurações quando carregado e a baixa aderência entre o bambu e o concreto, em virtude de sua superfície lisa. Em vista disso, alguns pesquisadores desenvolveram, e ainda continuam desenvolvendo, estudos para viabilizar o uso do bambucreto com maior segurança.

Por fim, ainda existe a possibilidade de utilização do bambu como material alternativo para diminuir o peso de elementos construtivos ou como fator estético, como explica OLIVEIRA (1980). O "rippendencken" é um piso alemão que se obtém com placas de concreto-ferro-bambu, que apresenta vantagens sobre os convencionais devido ao menor peso específico, além de ser um bom isolante acústico.

2.5.1 Absorção de Água

Uma das principais desvantagens do bambu quando utilizado como reforço no concreto é a absorção de água. O bambu, segundo VIJAY RAJ (1991), quando cortado e deixado no mesmo ambiente contém uma umidade natural entre 12 e 20%. Colmos de bambu da espécie *Dendrocalamus strictus* com 2,5 anos de idade podem absorver entre 51 e 55% de água depois de 4 dias de imersão e entre 57 e 64% depois de 7 dias de imersão.

No estudo de GHAVAMI (1994) com vários impermeabilizantes, o que se mostrou mais eficaz foi o Negrolin, produzido pela Sika. O bambu Gigante foi imerso

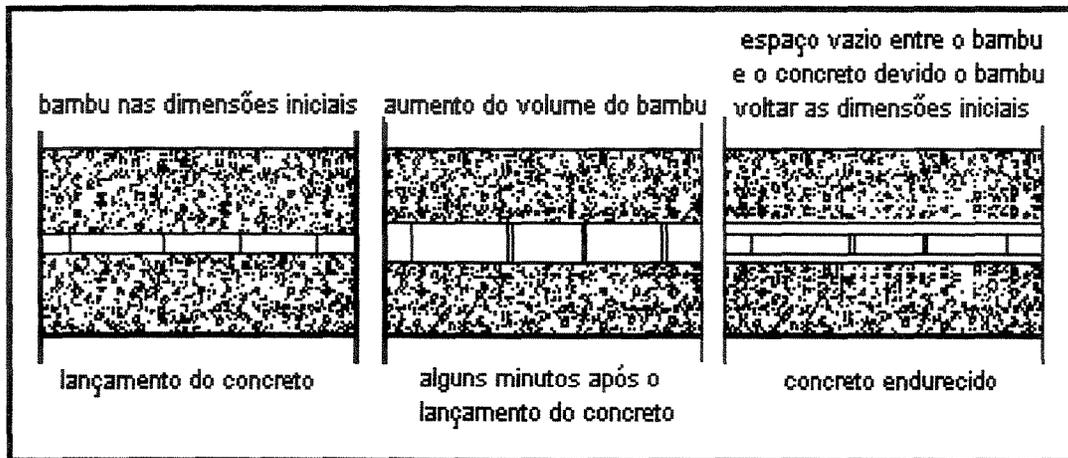
durante 96 horas em água (após ter sido tratado com Negrolin) e apresentou uma taxa de absorção de apenas 4%.

Outros impermeabilizantes que também já foram estudados são a emulsão asfáltica (piche) e algumas tintas e vernizes. Segundo BARMAK (1938), o importante é que o produto a ser empregado satisfaça as seguintes condições:

- a impermeabilização deve ser feita por untamento ou revestimento;
- o impermeabilizante deve ser insolúvel e inalterável na água;
- deve secar o mais rápido possível;
- não deve produzir reações químicas nem com o bambu nem com o concreto.

2.5.2 Variação Dimensional

Variações dimensionais podem ocorrer no bambu devido à rápida absorção e liberação de água, por ser um material higroscópico, isto é, quando em contato com o meio aquoso, o bambu varia de dimensões. Segundo LIMA JR. *et al.* (1999) esta propriedade faz com que o bambu, quando em contato com o concreto fresco, absorva parte da água de amassamento e aumente suas dimensões. Após o endurecimento do concreto, este vai gradativamente liberando a água absorvida e retorna às dimensões iniciais. Com isto, a interação entre os dois materiais fica comprometida conforme mostra a figura 2.5.2. Um bambu verde quando colocado para secar libera água e encolhe, e esta água diminui conforme o bambu atinge a idade adulta (+/- 3 anos). Sabe-se que a umidade natural do colmo de bambu maduro é de 20%.



Fonte: LIMA Jr. et al. (1999)

Figura 2.5.2 - Variação dimensionais do bambu em contato com o concreto fresco

Segundo VIJAY RAJ (1991) o bambu pode encolher aproximadamente 12% do seu diâmetro e 16% da sua espessura aos seis meses de idade. Entretanto, este bambu na idade adulta reduz seu encolhimento para 4 – 7% no diâmetro e 3 – 7% na espessura da parede do colmo. Assim, o bambu quando usado como reforço em peças de concreto pode absorver água do concreto fresco e inchar, encolhendo logo que o concreto secar, fazendo com que o bambu fique completo ou parcialmente isolado da argamassa adjacente, causando fissuras na superfície do concreto.

GEYMAYER e COX (1970) verificaram que a variação linear é 5% na direção radial e 0,5% na direção longitudinal, sendo a mesma variação das madeiras convencionais. Antes de qualquer tentativa para impermeabilização do bambu, é necessário saber se alguma parte dele absorve mais umidade do que a outra e conseqüentemente, requer tratamentos diferentes. Com este objetivo, GEYMAYER e os outros retiraram a parte interna do bambu para determinar separadamente a absorção de umidade de cada uma de suas partes. Esses ensaios mostraram que a absorção de umidade é diferente em cada uma das partes quando submersas por algumas horas. Entretanto, se as partes de bambu ficam submersas por alguns dias a absorção aumenta e fica quase igual nas 2 partes.

Portanto, recomenda-se o uso de impermeabilizantes sobre o bambu, juntamente com um concreto de traço rico e secagem rápida (CPV-ARI), a fim de prevenir as fissuras. Recomenda-se, ainda, que os colmos de bambu seco sejam colocados em água dois a três dias antes da concretagem para evitar a absorção de água do concreto.

2.5.3 Aderência entre o Bambu e o Concreto

Outro problema sério do bambucreto e um dos grandes entraves à sua utilização é a má aderência entre o bambu e o concreto. Essa má aderência depende principalmente do grau de saturação do colmo depois de endurecido o concreto, da extensão e proporção da retração dos colmos, das asperezas ou saliências do colmo, da proporção bambu/concreto e da variação de temperatura.

A adoção de medidas para aumentar essa aderência contribui bastante para maximizar a capacidade de carga do bambucreto. Por essa razão, vários são os estudos a respeito de tratamentos a serem realizados no bambu a fim de obter essa melhoria de aderência.

Entre os tratamentos existentes na literatura, destacam-se:

- a aplicação de piche salpicado com areia ("bambu à milanesa"), que além de propiciar a formação de uma superfície rugosa, funciona como impermeabilizante;
- o arame farpado pregado sobre o colmo ou a talisca;
- grampos de cerca cravados sobre o bambu;
- ranhuras feitas na casca das taliscas;
- a utilização dos próprios nós do bambu para aumentar a superfície de contato com o concreto (o mais natural dos métodos).

LIMA JR. *et al.* (1999) realizaram ensaios de arrancamento (“Pull-out”) com o bambu Gigante, variando os tratamentos de impermeabilização e aderência e tipo de concreto. Com os resultados, concluíram que, contrariamente ao que se esperava, o bambu natural foi o que apresentou maior resistência ao deslizamento, pois os bambus tratados com materiais impermeabilizantes (negrolin e asfalto) mobilizaram pequenas tensões de aderência, pois houve cisalhamento nos próprios bambus. Também observaram que entre os concretos granítico e laterítico, este último, apesar de ter uma resistência à compressão menor, apresentou uma melhor aderência.

FERRÃO e FREIRE (1995) testaram a espécie *Bambusa tuldooides*, em relação à aderência ao concreto, através do teste de arrancamento com 5 tratamentos físicos diferentes em varas de bambu em forma de taliscas, tendo como melhores resultados o “piche/areia” (bambu à milanesa) e “grampos de cerca”. Tanto o grampo de cerca quanto o arame farpado desenvolvem excelente aderência com o concreto, fazendo com que as fibras do bambu fossem arrebetadas pelo arame farpado ou rasgadas pelos grampos. Taliscas de bambu, engastadas a 20 e 30 cm de profundidade no concreto, desenvolveram maior aderência do que aquelas engastadas com apenas 10 cm.

Segundo FERRÃO (1992), no ensaio de vigas armadas com bambu à flexão simples, os tratamentos que possibilitaram uma maior carga de ruptura foram o piche com areia e o arame farpado, sendo que neste último o ganho de resistência pode estar ligado à absorção de esforços por parte do arame.

2.6 Durabilidade do Bambucreto

A vida do bambu no concreto é até certo ponto incerta. O concreto é muito alcalino (pH = 13), sendo tal valor elevado para o bambu. Com o tempo, esta alcalinidade destrói a camada com fibras de celulose do bambu.

Para obter uma maior durabilidade do bambucreto é muito importante considerar a porcentagem da área da seção transversal do bambu em relação à área de concreto da peça. Ensaio realizado por MEHRA *et al.* (1951), que mantiveram as dimensões da peça e variaram a porcentagem de bambu de 5 a 18%, concluíram que a porcentagem ideal de bambu é de 5 a 7,5%, mesmo quando submetido a ciclos de umidescimento e secagem.

O espaçamento correto entre as taliscas de bambu que servem de armadura em peças de concreto é um fator importante para determinar a resistência ao cisalhamento das mesmas. Ensaio indicaram que quando o reforço longitudinal principal é muito espaçado, a resistência à flexão é prejudicada. Também, quando o reforço de bambu principal é usado em linhas verticais e quando o ponto em questão é perto da linha neutra da peça, a área de concreto da seção horizontal de cisalhamento pode ser danificada, causando fissuras na peça devido ao cisalhamento horizontal. Em muitas amostras testadas sob carregamento à flexão, a causa das rupturas foi atribuída ao cisalhamento horizontal.

Segundo LIMA JR. *et al.* (1999), as vigas de concreto-bambu são mais deformáveis que as que usam aço como reforço, devido ao menor módulo de elasticidade do bambu, ocasionando fissuras de grande abertura, levando a peça ao colapso. O reforço de cisalhamento melhora o comportamento das vigas de concreto-bambu.

2.7 Recomendações para o uso do Bambucreto

A seguir, são listadas algumas recomendações feitas pelos diversos cientistas que pesquisaram a questão do uso do bambu como reforço na armação de vigas de concreto:

- Uma vez que são as fibras que conferem resistência à tração, sugere-se o uso da lascas ou taliscas de bambu, cortados longitudinalmente, de forma que a camada mais externa (que concentra de 40 a 70% das fibras) seja melhor aproveitada, dispensando o uso das camadas internas, que são susceptíveis ao ataque de insetos. Peças de concreto armadas com taliscas de bambu mostraram melhor capacidade de carga em relação àquelas armadas com colmos roliços, de acordo com FERRÃO (1992).
- Conforme McCLURE (1967), o bambucreto resistiu a uma carga de quatro a cinco vezes a de uma viga sem qualquer armação, recomendando para projetos valores estimados apenas de duas a três vezes a capacidade de carga a favor da segurança.
- GLENN (1950) propôs, a fim de que as peças de concreto tivessem uma relação ótima de utilização do bambu, uma porcentagem de 3 a 4% da área da seção transversal da viga como área de bambu.
- Devido ao seu baixo valor de módulo de elasticidade (em média 1/10 do valor do aço), GHAVAMI (1992) recomendou que a área de bambu empregada em peças de concreto seja, no mínimo, seis vezes maior do que seria necessária para o aço.
- JANSSEN (1995) também fez algumas recomendações sobre o uso do bambucreto:
 - a limitação da deformação no vão situa-se no intervalo de 1/500 a 1/1000;
 - a altura da viga deve ser da ordem de 10% do vão, de forma que o concreto possa absorver parte dos esforços;

- estudo de outra geometria para a seção transversal da viga, como por exemplo o T invertido, de maneira que se consiga um maior espaço para alojar toda a área de bambu necessária;
- devido a não existência de estudos no que se refere a vida útil do bambu no concreto, o autor recomenda a adoção de valores da ordem de 1,7 como coeficiente de segurança na execução dos cálculos.

2.8 Vantagens e Desvantagens do bambu

2.8.1 Vantagens

Como vantagens da utilização do bambu como material de construção pode-se citar:

- devido ao seu ciclo de crescimento rápido, o bambu pode ser produzido em grande escala em uma pequena área;
- o bambu é considerado um material resistente apesar de sua baixa densidade, pois suporta elevadas solicitações quando tracionado;
- o bambu tem uma estrutura que resiste muito bem a a cargas dinâmicas;
- novos colmos podem ser cortados a cada ano de um mesmo bambuzal.

2.8.2 Desvantagens

Entre as desvantagens, pode-se citar:

- durabilidade natural reduzida, necessitando de tratamento de preservação contra o ataque de insetos;

- o posicionamento paralelo dos internós dos colmos é praticamente impossível, devido à grande diferença no comprimento do colmo entre os nós;
- o fogo é um grande risco para o bambu;
- Um colmo não é completamente liso, devido aos nós que existem, que podem dificultar o manuseio quando o material é trabalhado.

2.9 Colheita e Preservação

Somente colmos adultos devem ser cortados, e com idade em torno de 3 anos de idade, dependendo da espécie. A idade de um colmo pode ser estimada pela coloração, dependendo da espécie botânica. É importante também não cortar muitos colmos de uma só vez, pois a planta poderá morrer.

A colheita deve ser feita na época da seca, pois assim os colmos de bambu terão menos umidade, acarretando um transporte mais fácil e reduzindo o ataque de fungos e insetos.

Dependendo da espécie, os colmos podem ser cortados com um machado ou, para os mais duros, com uma serra. Trabalhando sempre duas pessoas juntas, uma cortando e a outra segurando o colmo, para prevenir trincas na queda.

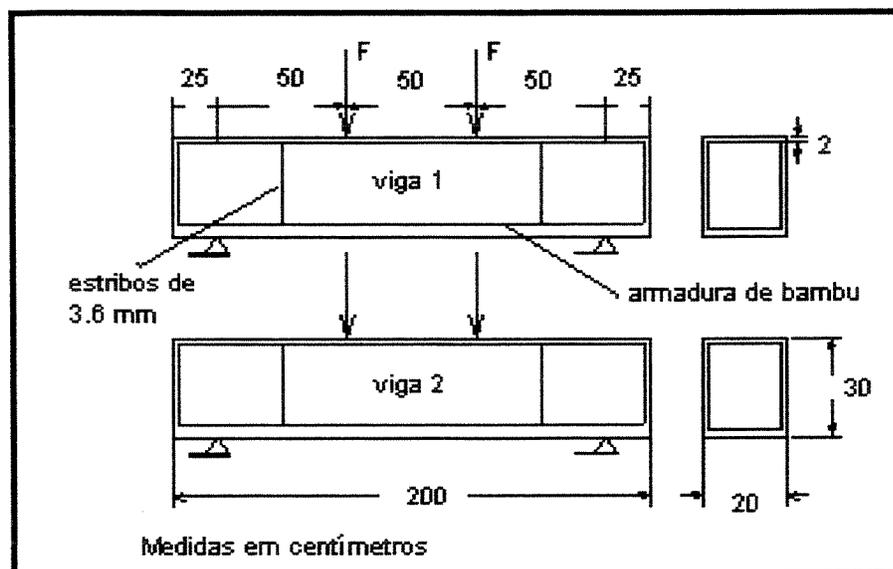
O bambu é bastante susceptível aos ataques dos agentes de deterioração, como os fungos e insetos xilófagos, por isso sua durabilidade natural é pequena, entre 1 e 3 anos, ocasionando inutilização e frequentes substituições do material em serviço. GALVÃO (1967) utilizou amostras de *Bambusa tuldoides* com 2 anos de idade para realizar tratamento preservativo pelo processo do banho frio. Neste tratamento foi preparada uma solução com 5% de Pentaclorofenol dissolvido em óleo queimado, onde as amostras de bambu ficaram imersas durante 8 dias. A absorção no final deste

período foi de 93,84 kg/m³, elevando a vida útil do bambu para aproximadamente 6 anos, quando utilizado no meio agrícola em cercados, abrigos para plantas e pilares.

2.10 Investigações experimentais realizadas

2.10.1 Comportamento de vigas de concreto reforçadas com bambu

GHAVAMI *et al.* (1994) prepararam duas vigas de seção transversal 20 cm x 30 cm e comprimento total de 2 m, sendo que a distância entre os apoios era de 1,5 m. Em uma das vigas (V1), a talisca de bambu foi posicionada de forma que o seu maior lado ficasse paralelo à altura da viga. Na viga V2, a maior dimensão do bambu estava paralela à largura da viga. As duas vigas foram armadas com quatro segmentos de bambu: dois na zona tracionada e dois na comprimida. Além disso, foram utilizados quatro estribos de diâmetro 3,6 mm ao longo do comprimento de cada viga (figura 2.10.1.1).



Fonte: GHAVAMI (1994)

Figura 2.10.1.1 - Dimensões e posição do reforço de bambu nas vigas ensaiadas

O bambu utilizado no ensaio era da espécie Gigante, e foi tratado com uma camada de impermeabilizante IGOL-T. Para garantir a aderência ao concreto, o bambu posicionado na zona tracionada da viga foi encapado com arame. O concreto utilizado apresentou f_{ck} de 11,5 MPa.

O esquema de carregamento consistia em duas cargas concentradas aplicadas no terço do vão entre os apoios. As vigas V1 e V2 foram ensaiadas após 38 e 31 dias respectivamente. Os resultados são dados na tabela 2.10.1.1.

Tabela 2.10.1.1 - Resultados dos ensaios das vigas

VIGA	CARGA NA 1ª. FISSURA (kN)		LINHA NEUTRA (cm)		CARGA DE RUPTURA (kN)	
	TEÓRICO	PRÁTICO	TEÓRICO	PRÁTICO	TEÓRICO	PRÁTICO
V1	10,35	13,00	3,33	3,50	42,50	28,50
V2		13,00	2,87	2,80	31,40	25,00

Fonte: GHAVAMI (1994)

Na Viga 1, a área da armadura correspondia a 1,22% da área da seção. Como pode ser visto na tabela 2.10.1.1, houve uma grande diferença entre a carga de ruptura teórica e a prática. Esse fato pode ser atribuído à posição vertical do bambu localizado na zona tracionada, além do aparecimento de esforços de cisalhamento na viga.

Na Viga 2, a taxa de armadura era de 0,89%. A diferença entre a carga de ruptura teórica e a experimental foi bem menor que no caso da V1. No entanto, o deslocamento no meio do vão dessa viga foi bem grande.

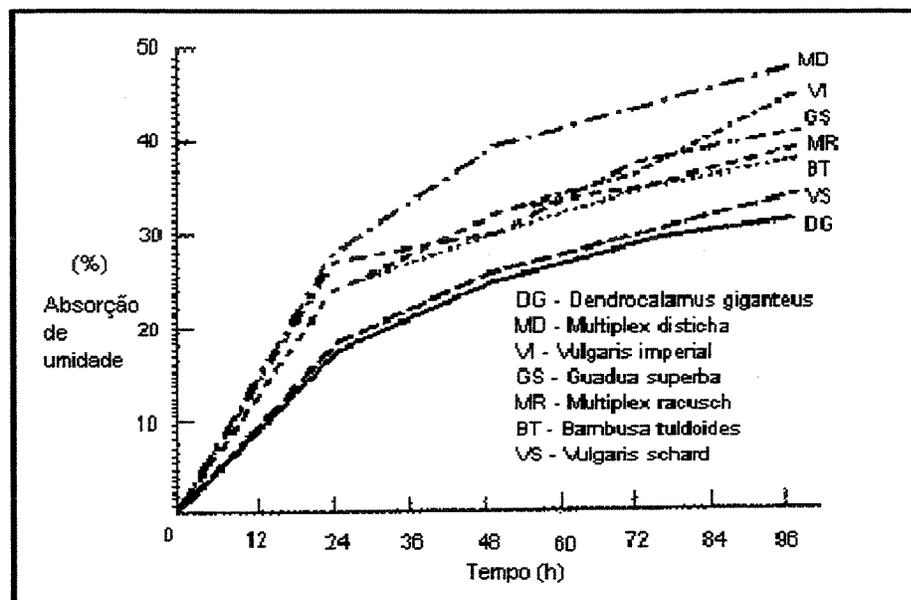
Pode-se concluir desse estudo que embora teoricamente a posição vertical para a talisca de bambu seja melhor (posição de maior inércia), na prática não o é.

2.10.2 Caracterização física e mecânica de espécies de bambu

GHAVAMI (1992) fez um estudo de sete espécies de bambu quanto às propriedades físicas e mecânicas, e quanto ao comportamento em relação à absorção de água, quando os colmos foram tratados com diferentes impermeabilizantes. O pesquisador também realizou ensaios para verificar a aderência entre o bambu e o concreto e o comportamento à flexão de vigas armadas com bambu da espécie gigante.

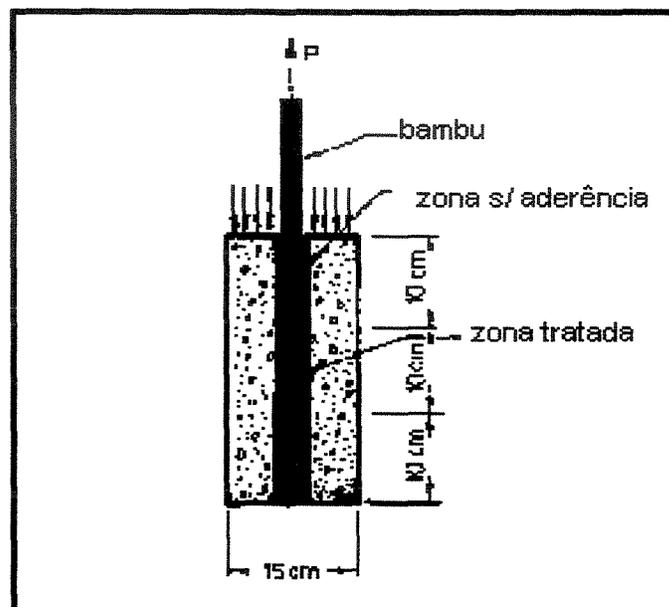
Os valores das propriedades físicas e mecânicas para a espécie *Dendrocalamus giganteus* já foram citados no item 3.4 que trata das características dessa espécie.

Nos testes de absorção de umidade foi a espécie Gigante (DG) que apresentou os melhores resultados (figura 2.10.2.1). Após receber o tratamento a base de Negrolin, o bambu foi imerso em água durante 96 h, apresentando ao final desse período apenas 4% de absorção de água.



Adaptado de: GHAVAMI (1992)
Figura 2.10.2.1 - Absorção de água de sete espécies de bambu estudadas

Para a análise da aderência bambu/concreto foram realizados vários ensaios de arrancamento (figura 2.10.2.2) com bambus sem nenhum tipo de tratamento, tratados com Negrolin e areia, e bambus tratados com Negrolin, areia e arame. Para esse último grupo, obteve-se uma aderência até 90% maior em relação ao bambu sem qualquer tratamento. A tensão de arrancamento, nesse caso, chegou a 1,8 MPa. Por essa razão, nos ensaios de vigas, esse tratamento foi adotado em todo o bambu utilizado como armadura.



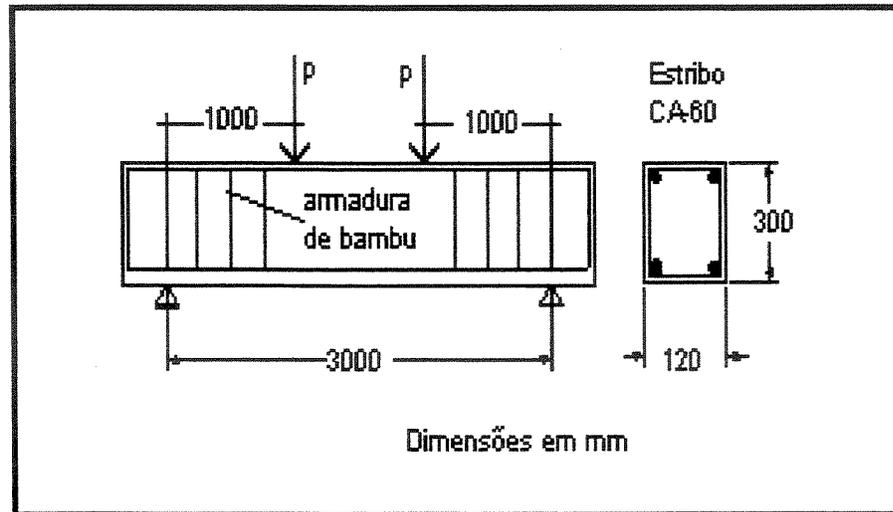
Fonte: GHAVAMI (1992)

Figura 2.10.2.2 - Esquema do corpo-de-prova utilizado no teste de arrancamento

O bambu utilizado no ensaio das vigas era da espécie Gigante, com 3 anos de idade. Foi cortado e deixado secar ao ar, por 20 dias, em um lugar protegido sem receber qualquer tipo de tratamento até esse ponto.

O bambu foi fatiado em taliscas de 30 cm de largura. Sobre a superfície lisa foram feitas ranhuras para melhorar a aderência com o concreto. Foi enrolado arame sobre todo o contorno da talisca, seguido pela aplicação de duas camadas de Negrolin. Logo após a 2ª camada, foi salpicada manualmente areia sobre o bambu.

As vigas ensaiadas tinham 15 x 30 cm de seção e 3 m de vão entre os apoios. Além da armadura de tração e da de compressão, as vigas possuíam estribos de 5 mm de diâmetro, a cada 13 cm, ao longo de todo o comprimento (figura 2.10.2.3).



Fonte: GHAVAMI (1992)

Figura 2.10.2.3 - Dimensões e armaduras das vigas reforçadas com bambu

As especificações das três vigas são dadas na tabela 2.10.2.1.

Tabela 2.10.2.1 - Especificações das vigas ensaiadas

VIGA	MATERIAL	ARMADURA DE TRAÇÃO			ARMADURA DE COMPRESSÃO	
		SEÇÃO (mm)	COMP. (cm)	%	SEÇÃO (mm)	COMP. (cm)
VA	Aço CA 50A	2 Φ 10	338	0,78	2 Φ 5	338
		2 Φ 12,5	240			
VB1	Bambu	2x30x10	338	3,33	2x20x10	338
		2x30x10	250			
VB2	Bambu	2x30x10	338	5,00	2x30x10	338
		2x30x10	250			
		2x30x10	250			

Fonte: GHAVAMI (1992)

O concreto utilizado era de cimento Portland com traço 1:3,22:0,78 e relação água/cimento 0,55. O f_{ck} foi de 15 MPa. O esquema de carregamento foi exemplificado na figura 2.10.2.3.

As vigas foram instrumentadas de forma a se obter as deformações no meio do vão e na extremidade livre durante o carregamento, o que permitiu a construção do diagrama carga x deformação para as três vigas ensaiadas.

Com os resultados dos ensaios concluiu-se que até 5 kN todas as vigas apresentaram comportamento linear. A partir desta carga as deformações das vigas armadas com bambu foram maiores que as da viga armada com aço. Esse fato foi atribuído ao baixo módulo de elasticidade à tração do bambu quando comparado ao do aço, e também à má aderência que existiu entre o concreto e o bambu, mesmo este recebendo tratamento. Analisando as fissuras das vigas ensaiadas, notou-se que a viga VB2, que apresentava maior taxa de armadura em relação a VB1, fissurou menos. Diante disso, o autor recomendou que se utilize uma taxa de armadura em torno de 3% em vigas armadas com bambu.

2.10.3 Boletim da Diretoria de Obras Públicas de São Paulo (1934)

Este artigo foi retirado da revista “Der Bauingenieur”, onde é descrito os procedimentos e os resultados de ensaios realizados visando a aplicação do bambu em construções de concreto. Foram realizados ensaios de caracterização do material e vigas de concreto armadas com bambu.

Foram preparados corpos-de-prova de 20 cm x 3 cm x 1,5 cm com taliscas de bambu secas ao ar, de 19,4 cm x 2,4 cm x 0,9 cm. Depois de 24 horas, os corpos-de-prova apresentaram fissuras na direção longitudinal, devido ao inchamento do bambu. Em seguida, os corpos-de-prova foram aquecidos e, no fim de poucas horas, verificou-se que a armadura de bambu se retraiu tanto que ficou solta dentro da argamassa.

Para estudar a influência do recobrimento e do traço do concreto sobre as fissuras foram preparados corpos-de-prova cúbicos de concreto, sendo dois com 7 cm

de aresta, dois com 10 cm e dois com 12 cm. O bambu utilizado foi antecipadamente seco ao ar e com 2,5 cm de diâmetro e 0,3 cm de espessura. O concreto para dois cubos com 7cm de aresta compunha-se de uma parte em peso de cimento especial e dois de areia. Para os outros cubos, de uma parte em peso de cimento Portland e 6,3 partes de areia. Pouco tempo depois de preparados, observou-se que os cubos em concreto magro com 7 cm de aresta apresentavam fissuras na direção longitudinal da colocação do bambu, o que não se verificou nos outros corpos-de-prova. Quatro semanas depois, todas as taliscas ficaram frouxas dentro do concreto. Concluiu-se, pois, que uma mistura rica ou um recobrimento espesso de concreto poderiam evitar as fissuras devido ao inchamento do bambu.

A capacidade de absorção de água pelo bambu foi determinada pelo ensaio realizado com taliscas de bambu secas ao ar, algumas com a película externa e outras sem. Ficou constatado que os corpos-de-prova sem a película absorviam a água bem mais do que os corpos-de-prova com a mesma. A absorção de água pelo bambu sem película, em 24 horas, foi de 41,8%. Para o bambu com película, o resultado foi de 25% em 24 horas, 33% em 96 horas e 50% em 15 dias.

Outro ensaio de caracterização realizado foi o de inchamento e contração do bambu não impermeabilizado. Para este ensaio foram empregadas taliscas de bambu com forma prismática de 1 cm x 1 cm x 9 cm, pesando cada amostra cerca de 7 g. Constatou-se que até o ponto de saturação, as variações de comprimento, largura e espessura eram proporcionais à absorção de água. A variação do comprimento girou em torno de 0,6% e a espessura exatamente 8% em relação às medidas do bambu seco ao ar. Perdendo a água, o bambu contraiu-se, atingindo as medidas originais.

Dos ensaios anteriores, concluiu-se que o bambu antes de ser concretado deve ser impermeabilizado. Diante disso, foram realizados ensaios com diversos tipos de impermeabilizantes, a maioria à base de verniz. Ficou provado que o melhor impermeabilizante a ser adotado é a massa de Mayorits, à base de alvaiade, que permitiu somente 7% de absorção de água em 72 h.

Para testar a aderência entre o bambu e o concreto foram preparados cubos de concreto de 10 cm de aresta, com taliscas de bambu (impermeabilizadas com duas camadas de massa de Mayorits), algumas das quais apresentando nós e outras não. O concreto compunha-se de uma parte em peso de cimento Portland e seis partes de areia com granulação de 0 a 7 mm, atingindo uma resistência de 20 MPa. Decorridas seis semanas, foram ensaiados os corpos-de-prova, determinando-se a aderência entre o concreto e o bambu pelo arrancamento das taliscas. A aderência entre o bambu sem nós impermeabilizado e o concreto atingiu uma média de 3,5 kgf/cm² (0,35 MPa) e com nós atingiu 82,5 MPa.

Foram feitos vários ensaios com vigas armadas com bambu variando-se: resistência do concreto, porcentagem de bambu na armadura, tipo de tratamento nas taliscas de bambu, posicionamento da armadura e carregamento das vigas. Depois de todos esses ensaios pode-se citar algumas conclusões:

- nos casos em que o bambu venha substituir o aço, sua seção deverá atingir, no mínimo, 12 vezes a seção de ferro necessária, devido seu baixo módulo de elasticidade à tração;
- deve-se utilizar sempre que possível um concreto rico e nunca com resistência inferior a 15 MPa;
- é aconselhável o emprego de estribos de ferro para absorção do esforço de cisalhamento.

Em resumo, o bambu como elemento estrutural apresenta os seguintes problemas:

- baixo módulo de elasticidade em comparação ao aço;
- pouca aderência com o concreto;
- durabilidade limitada;
- falta de definição de um modelo de cálculo para sua utilização como armadura de peças de concreto.

Para tentar resolver estes problemas, o programa experimental deste trabalho apresentou os seguintes ensaios:

- caracterização do bambu: tração paralela às fibras, compressão paralela às fibras, variação dimensional e arrancamento (“ Pull-out”);
- caracterização do concreto
- cálculo teórico de um método de cálculo para vigas de concreto armadas com taliscas de bambu;
- execução e ensaio à flexão de 6 vigas de concreto armadas com bambu.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

Preliminarmente, com o objetivo de caracterizar a espécie de bambu utilizada em relação às propriedades físicas e mecânicas de interesse ao emprego deste material como armadura em vigas de concreto, foram realizados os ensaios de tração paralela às fibras, de compressão paralela às fibras e de variação dimensional.

A seguir, algumas técnicas de incremento de aderência foram avaliadas, comparativamente, através do ensaio de arrancamento ("Pull-out"). Das técnicas avaliadas, a que obteve melhor desempenho foi utilizada na etapa seguinte do trabalho, ou seja, nos ensaios de flexão de vigas de concreto armadas com bambu.

3.2 Ensaio de Caracterização dos Materiais

3.2.1 Ensaio de Tração Paralela às Fibras

A resistência à tração do bambu tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores em todo mundo. Geralmente, a resistência varia com a espécie, idade, condições de crescimento, umidade, número e posicionamento dos nós nos colmos. Quando o bambu é cortado em taliscas na direção longitudinal, sua capacidade de carga é maior do que em colmos inteiros, dependendo da seção transversal das taliscas. Taliscas com larguras maiores do que 2,0 cm podem conduzir a fissuras

horizontais devido ao posicionamento das fibras do bambu serem todas ordenadas. Também devem ser utilizados colmos com diâmetros maiores que 10 cm para eliminar problemas de curvatura da parede do colmo, o que pode causar esmagamento das fibras na compressão normal.

Os objetivos do ensaio de tração paralela foram a obtenção dos valores da Tensão de Ruptura e do Módulo de Elasticidade, nesse caso, da espécie *Dendrocalamus giganteus*. Estes dados foram necessários para o dimensionamento das vigas executadas, determinando a seção transversal da armadura de bambu e sua porcentagem.

A tensão de ruptura foi calculada dividindo-se a carga obtida na ruptura do corpo-de-prova pela área da seção transversal do mesmo. O Módulo de Elasticidade foi definido como sendo o valor do coeficiente angular do gráfico Tensão x Deformação Específica do bambu. Para obter-se este gráfico foi necessário anotar a deformação correspondente a cada incremento de carga, sendo que este foi feito a cada 2 kN. Os valores das cargas aplicadas foram lidos diretamente no manômetro da prensa, enquanto que as deformações foram obtidas através de extensômetros elétricos (figura 3.2.1.1) colados no corpo-de-prova e ligados a um aquisitor de dados (figura 3.2.1.2). Estes extensômetros eram da marca Shinkah, com 100 mm de comprimento e fator 2,02.

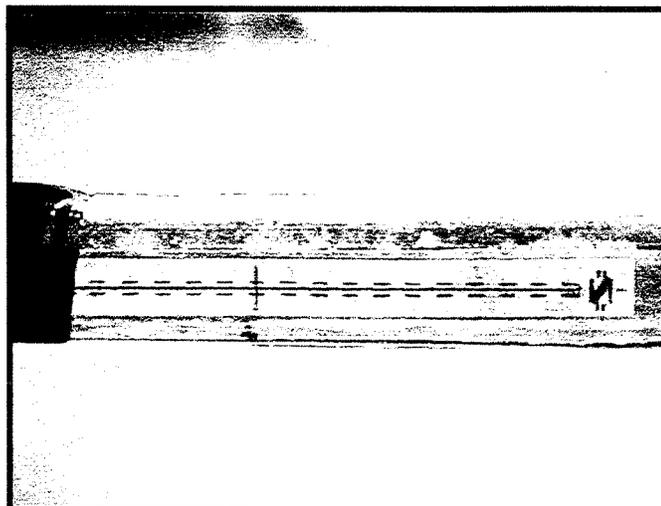


Figura 3.2.1.1 – Detalhe do extensômetro elétrico

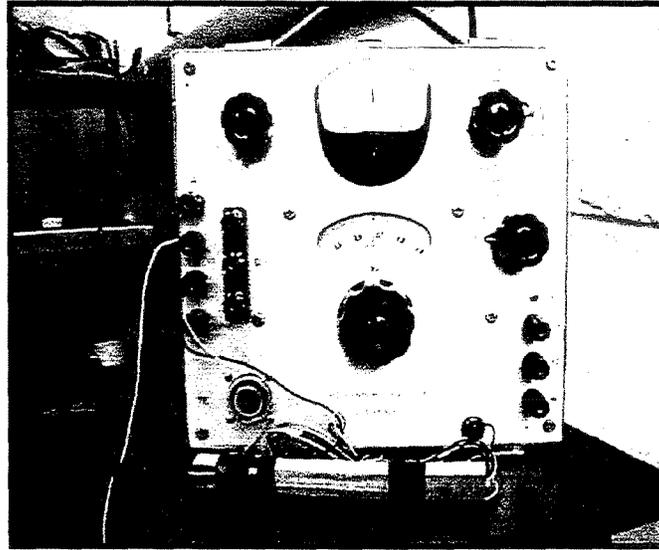


Figura 3.2.1.2 – Aquisitor de Dados

Os colmos colhidos tinham a mesma idade (6 anos), dimensões semelhantes, e pertenciam à porção central do colmo de bambu, que chegava a até 15 m de comprimento. A escolha da parte central do colmo deve-se ao fato de que nessa região a distribuição de fibras é mais uniforme, o diâmetro é praticamente constante e o espaçamento entre nós é eqüidistante.

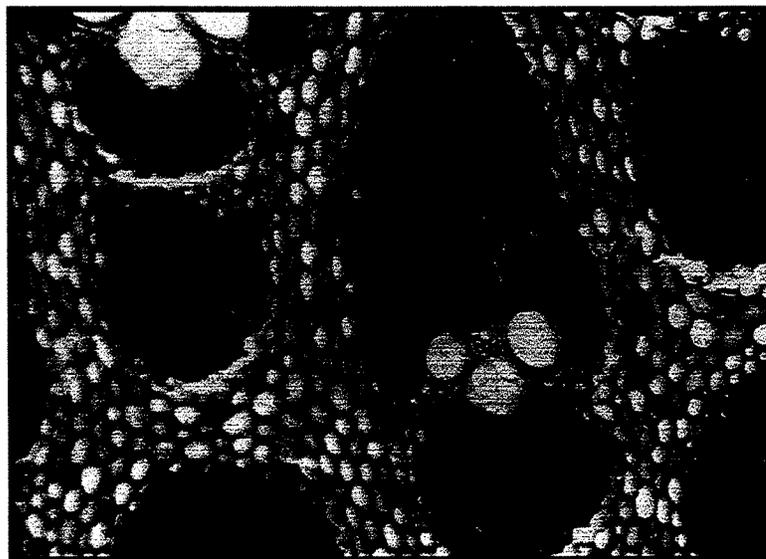
Foi feita a escolha das taliscas a serem utilizadas levando-se em conta o comprimento total do colmo de bambu, distância entre os nós, o diâmetro e a espessura, tendo assim uma padronização média entre as taliscas de bambu utilizadas, devido à heterogeneidade do bambu.

3.2.2 Ensaio de Compressão Paralela às Fibras

O bambu é um material leve quando comparado com madeira de construção, pois seu peso específico varia de 5 a 9 kN/m³. Apesar de sua baixa densidade, a resistência à compressão do bambu pode ser considerada alta. Entretanto, a resistência à compressão do bambu também depende de alguns fatores, tais como,

espécie, idade, umidade e condições de secagem que os colmos foram submetidos após o corte.

O colmo de bambu é formado por fibras e vasos condutores de seiva, que estão distribuídos desuniformemente na sua seção transversal. Estas partes estão embebidas em uma matriz denominada parênquima (figura 3.2.2.1). Dependendo da espécie e da idade do colmo de bambu, eles são formados em média por 40% de células de parênquima, 50% por fibras e 10% por vasos condutores de seiva. Esta composição influencia nas propriedades físicas e mecânicas do colmo, como a resistência à compressão. Pesquisas há realizadas mostraram que utilizando somente a casca do bambu trançada a resistência à tração aumenta consideravelmente.



Fonte: BERALDO (1999)

Figura 3.2.2.1 – Tecido do bambu aumentado 44 vezes

As fibras são formadas por células longas constituídas principalmente por celulose, responsáveis pelas propriedades mecânicas do bambu. Por isso, quanto maior a porcentagem de fibras na composição do colmo, melhor será sua resistência à compressão.

O objetivo do ensaio de compressão paralela às fibras foi determinar um valor médio para a Tensão de Ruptura à Compressão da espécie de bambu estudada neste trabalho. Este ensaio foi adaptado da norma para Estruturas de Madeira (NBR 7190-97).

Para execução deste ensaio foram utilizados corpos-de-prova com a mesma seção transversal daqueles destinados ao ensaio de tração. O comprimento dos corpos-de-prova foi determinado considerando o índice de esbeltez dos mesmos, para não haver flambagem durante a aplicação de carga (figura 3.2.2.2). O comprimento dos corpos-de-prova não influenciou negativamente nos resultados finais do ensaio de compressão porque o mesmo foi proporcional às dimensões da seção transversal.

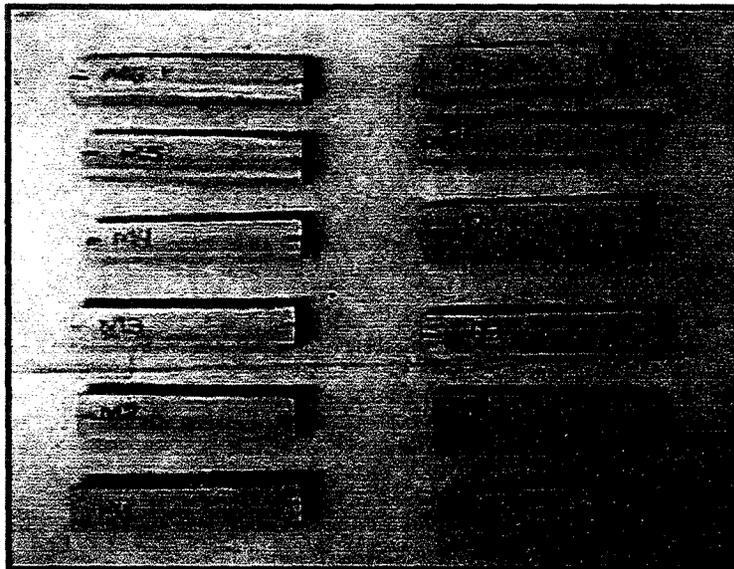


Foto 3.2.2.2 – Dimensões dos corpos-de-prova para o ensaio à compressão

3.2.3 Ensaio de Variação Dimensional

O bambu apresenta um grave problema de variação dimensional devido à sua alta absorção de umidade quando em contato com a mesma. Isto causa a má aderência entre o bambu e o concreto, diminuindo a resistência das peças de concreto

reforçadas com bambu. Portanto, o objetivo deste ensaio foi determinar os valores percentuais de absorção de umidade e de retração da espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Através de amostras retiradas do meio dos colmos selecionados para esta pesquisa os corpos-de-prova foram confeccionados com as mesmas dimensões dos do ensaio de compressão. Para simular as condições à que as taliscas de bambu foram submetidas no interior das vigas de concreto, as amostras de bambu Gigante foram submetidas a condições ambientais diferentes:

- Temperatura ambiente: para determinar a umidade natural dos colmos;
- Estufa (103° C): para determinar a porcentagem de água contida nos colmos;
- Saturado: para determinar a máxima absorção de umidade pelos colmos.

Também foram testados nos corpos-de-prova dois tipos de tratamento de impermeabilização (figura 3.2.3.1) para determinar o melhor tratamento que seria utilizado na armadura de bambu das vigas. Os tratamentos foram:

- recobrimento com piche e areia;
- recobrimento com verniz e areia.

Foram realizadas medições nas três direções anatômicas principais (radial, tangencial e axial), e também foram anotadas as massas dos corpos-de-prova nas três condições de umidade. Com estes dados, foi calculada a retração dos corpos-de-prova subtraindo as dimensões naturais das saturadas e as secas em estufa das naturais, de acordo com a norma para Estruturas de Madeira (NBR 7190-97).



Figura 3.2.3.1 – Tratamentos de impermeabilização

3.2.4 Ensaio de Arrancamento (“Pull-out”)

Este ensaio foi recomendado por RILEM/CEB/FIP (1979) e teve como objetivo determinar a resistência à tração da interface bambu/concreto, obtendo-se o deslocamento para cada acréscimo de carga à tração aplicada na talisca de bambu confinada no concreto endurecido. Assim, foi determinada a resistência de aderência entre o bambu e o concreto. Para tanto, foram confeccionados corpos-de-prova prismáticos de concreto com taliscas de bambu confinadas no seu interior, deixando uma parte das mesmas fora do concreto para serem fixadas na prensa durante o ensaio (figura 3.2.4.1).

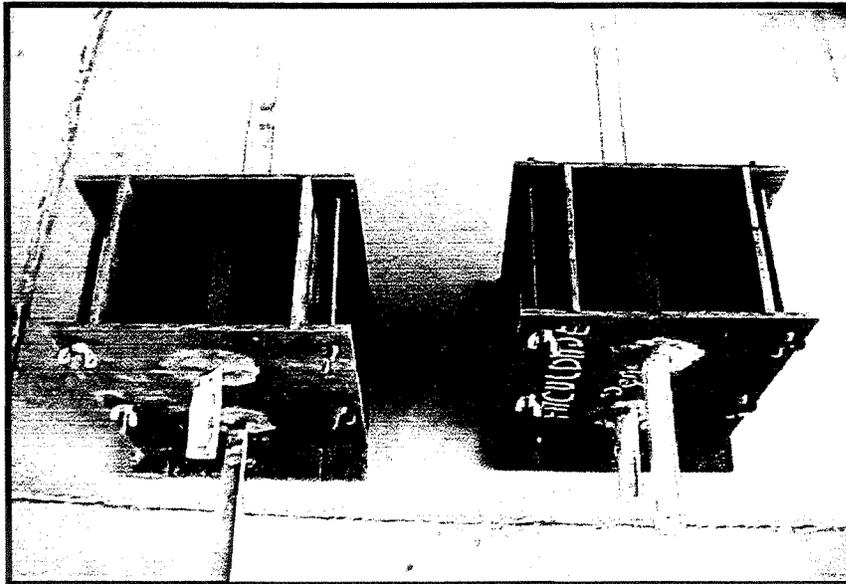


Figura 3.2.4.1 – Posicionamento das taliscas de bambu nas fôrmas para ensaio de arrancamento

Foi testado a talisca de bambu natural e com três tipos de tratamentos de impermeabilização buscando-se o aumento de aderência. O melhor tratamento foi posteriormente utilizado na confecção das armaduras de bambu das vigas de concreto executadas. Os tratamentos eram compostos por:

- piche e areia;
- verniz e areia;
- verniz e arame farpado.

3.3 Detalhes das Vigas e Esquemas de Carregamento

As vigas confeccionadas tinham seção transversal retangular, com base de 15 cm, altura de 20 cm e comprimento de 180 cm. O cobrimento adotado foi de 1,5 cm em todos os lados. Para o estribo foi usado aço CA-60B de diâmetro 4,2 mm. Todas as vigas tiveram armadura transversal super-dimensionada a fim de que não ocorresse

ruptura por cisalhamento (figura 3.3.1). Com isso, todas as vigas apresentavam estribo a cada 10 cm.



Figura 3.3.1 – Armadura das vigas confeccionadas

Para melhorar a aderência bambu/concreto, as vigas 3, 4 e 6 receberam em suas armaduras longitudinais de bambu uma camada de verniz e anéis de arame farpado espaçados a cada 5 cm (figura 3.3.2). Este tratamento foi escolhido após análise dos resultados do Ensaio de Arrancamento, que indicou este método como o que mais aumentou a aderência entre os dois materiais. Portanto, estas vigas foram definidas somente após encerrados os ensaios de caracterização. Também pode-se observar que a parte externa do bambu foi posicionada para baixo devido a sua maior resistência à flexão.

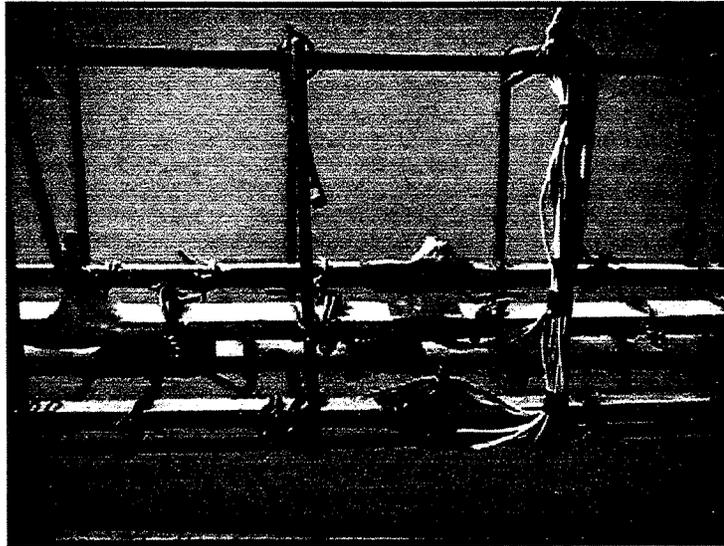


Figura 3.3.2 – Armadura de bambu com tratamento de verniz e arame

A armadura longitudinal de cada viga executada e ensaiada foi disposta da seguinte maneira:

- **VIGA 1** - executada somente com armadura longitudinal dupla de barras de aço, semelhante à armadura tradicional em vigas de concreto armado (figura 3.3.3).

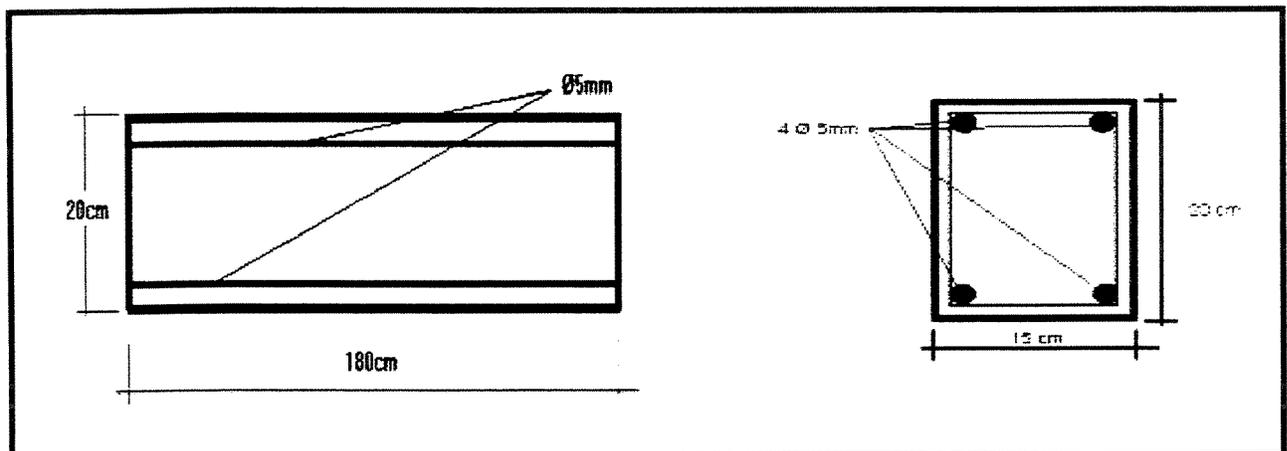


Figura 3.3.3 – Armadura da Viga 1

- **VIGA 2** – mesma armadura longitudinal de V1, acrescida de taliscas de bambu sem tratamento de impermeabilização posicionada na parte inferior (tracionada) da viga (figura 3.3.4).

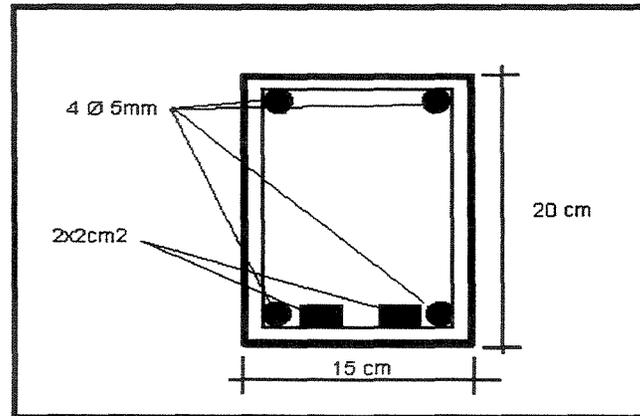


Figura 3.3.4 – Seção transversal da Viga 2

- **VIGA 3** – mesma armadura longitudinal de V2, acrescida do tratamento de impermeabilização e acréscimo de aderência de verniz com anéis de arame farpado (idem figura 3.3.4).
- **VIGA 4** – mesma armadura de V3, porém com mais uma camada de taliscas de bambu distante 5 cm da camada inferior, também com tratamento de verniz e anéis de arame farpado (figura 3.3.5).

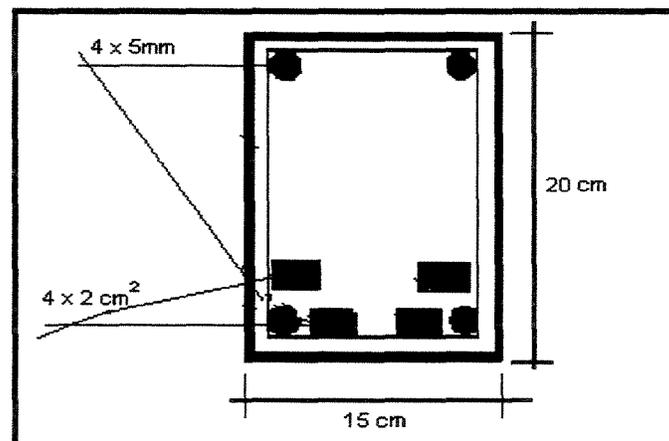


Figura 3.3.5 – Seção transversal da Viga 4

VIGA 5 – mesma armadura da Viga 2 e sem tratamento, mas o comprimento das taliscas de bambu foi apenas de 100 cm localizada na parte inferior e central da mesma. Isto foi feito para se determinar aderência do bambu ao concreto sem ancoragem da armadura (figura 3.3.6).

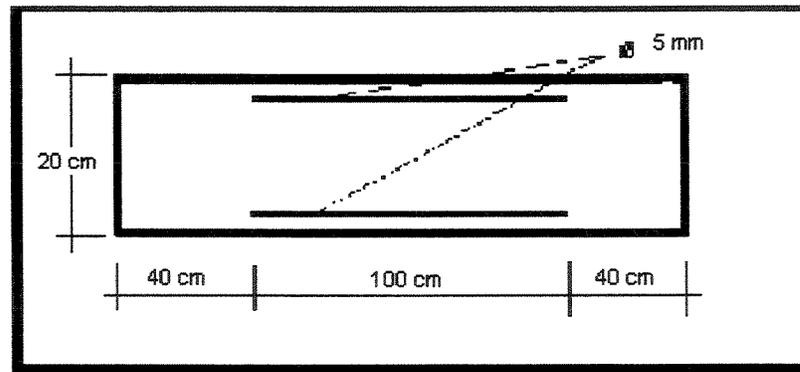


Figura 3.3.6 – Posicionamento da armadura de bambu na Viga 5

- **VIGA 6** - mesma armadura e posicionamento da V5, porém com tratamento de impermeabilização com verniz e anéis de arame farpado.

O carregamento das vigas foi realizado nos terços do vão com acréscimo de carga de 2 kN (figura 3.3.7). Todas as figuras estão sem escala para melhor visualização dos detalhes das armaduras das vigas.

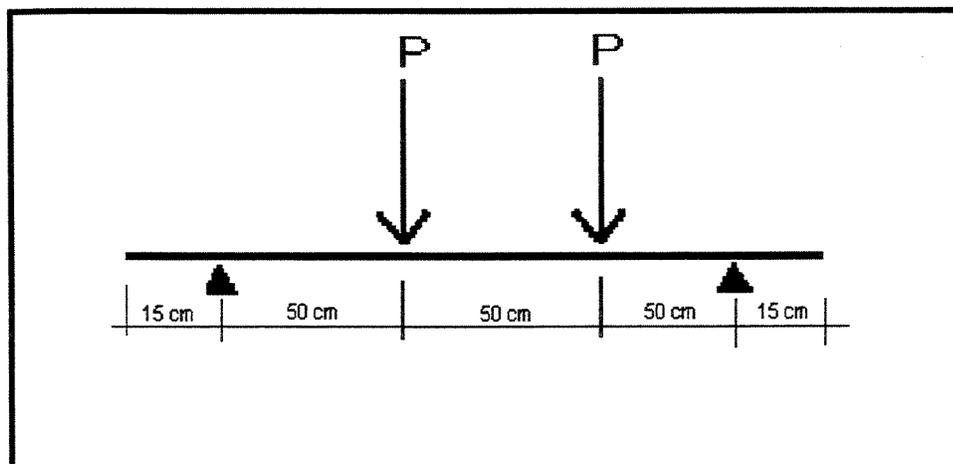


Figura 3.3.7 – Posicionamento das cargas no carregamento das vigas

3.3 Instrumentação

Foram colados extensômetros elétricos da marca Kyowa, com 5 mm de comprimento e fator 2,11. A finalidade deles foi medir as deformações nas armaduras longitudinais de aço e bambu. Estes extensômetros foram ligados a um aquisitor de dados. Deste modo, foram traçados os gráficos de tensão x deformação das armaduras longitudinais.

A instrumentação da armadura foi realizada somente na região tracionada das vigas ensaiadas, sendo colocados extensômetros na mesma posição tanto para a armadura de aço como para a de bambu. O concreto também foi instrumentado na região comprimida (meio do vão) para determinar sua tensão de ruptura no carregamento da viga. Na viga 1 foram colados 4 extensômetros em sua armadura de aço (figura 3.4.1).

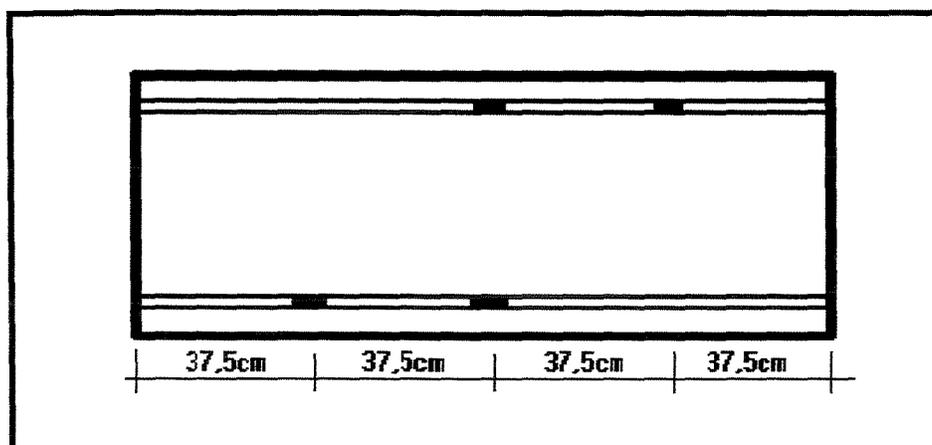


Figura 3.4.1 – Disposição dos extensômetros na Viga 1

Nas Vigas 2 e 3 a disposição o número de extensômetros foram iguais, sendo colados no total 10 extensômetros nas armaduras de bambu e aço (figura 3.4.2).

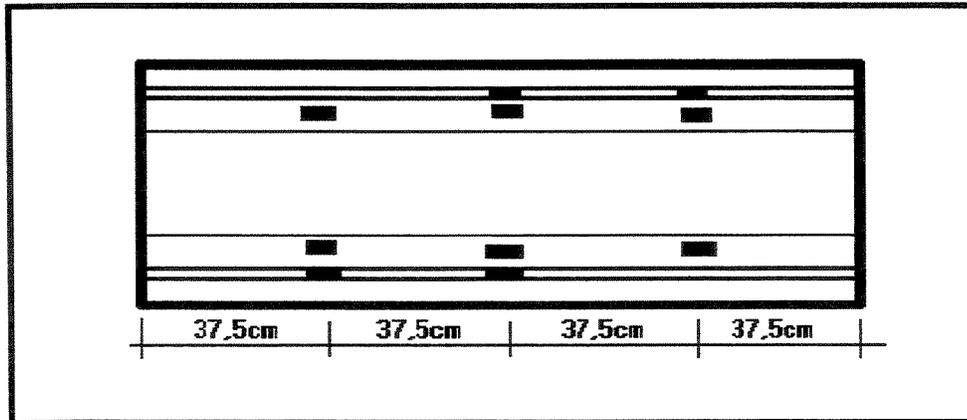


Figura 3.4.2 – Disposição dos extensômetros nas Vigas 2 e 3

A viga 4 tem a mesma disposição das Vigas 2 e 3, acrescida apenas de uma segunda camada de armadura de bambu, posicionada 5 cm acima da primeira, sendo colados mais 6 extensômetros, totalizando 16 em toda armadura.

Nas vigas 5 e 6 o comprimento da armadura longitudinal de bambu foi reduzido para 100 cm, sendo posicionadas na parte central e inferior das vigas para se determinar a aderência do bambu com o concreto sem ancoragem da armadura. Em cada viga foram colados 10 extensômetros (figura 3.4.3).

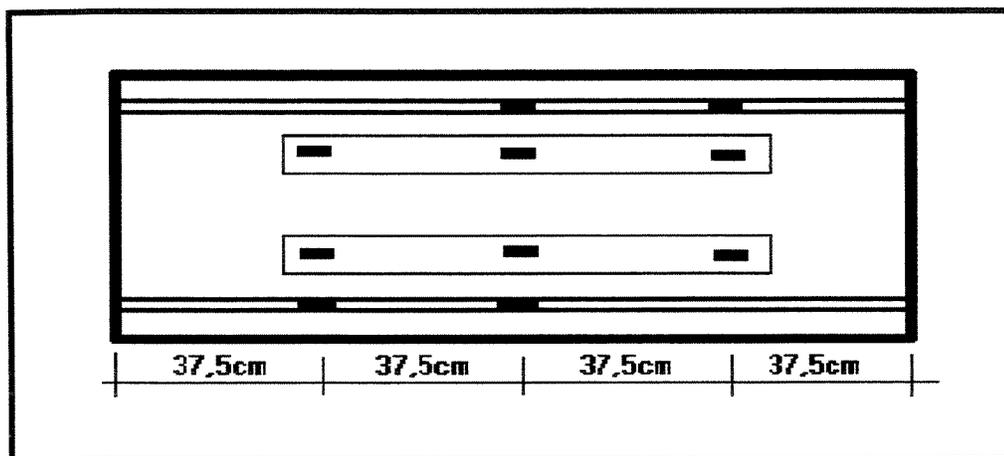


Figura 3.4.3 – Disposição dos extensômetros nas Vigas 5 e 6

As deformações no concreto foram medidas na parte superior (área comprimida) de uma das faces de cada viga. Essas deformações foram medidas com o auxílio de extensômetros elétricos conectados ao aquisitor de dados. Para se obter o deslocamento máximo de cada viga submetida ao carregamento foi utilizado um relógio comparador na parte central e inferior (área tracionada) de cada uma delas.

3.5 Ensaio de Flexão de Vigas de Concreto Armadas com Bambu

Este ensaio teve o objetivo de determinar a tensão nas armaduras de aço e de bambu, o deslocamento máximo no meio do vão e a Tensão de ruptura das vigas. Os valores teóricos calculados foram comparados com os resultados das vigas que foram ensaiadas.

Depois de serem caracterizados os materiais utilizados nesta pesquisa foram executadas as vigas de concreto reforçadas com bambu. Foram realizadas seis vigas de concreto, sendo uma delas armada apenas com aço (testemunho) e as demais armadas com aço e taliscas de bambu. As vigas foram posicionadas em um pórtico, no qual foi aplicado as cargas até a ruptura das mesmas (figuras 3.5.1 e 3.5.2).

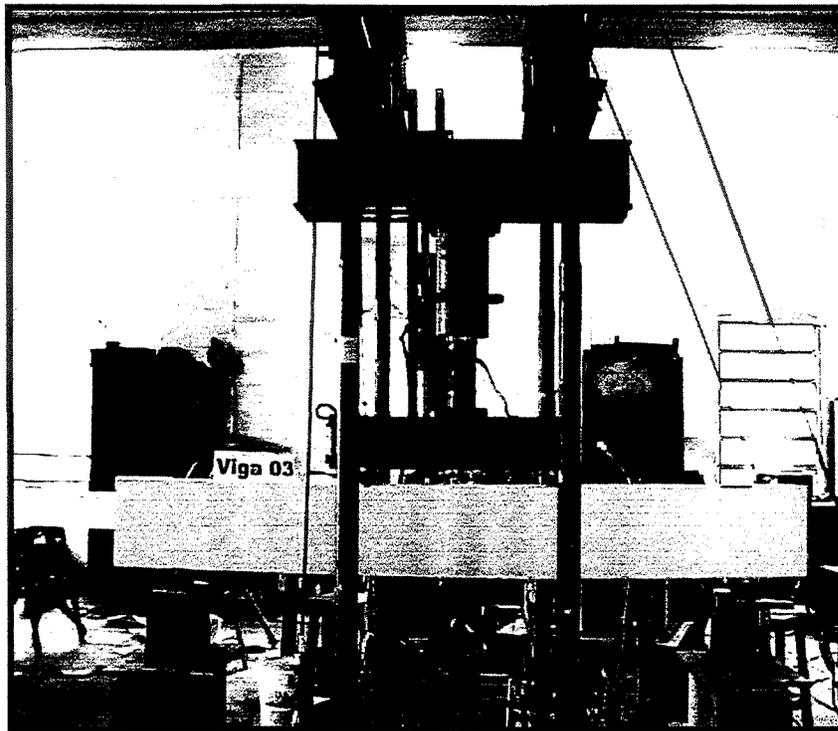


Figura 3.5.1 – Viga 3 antes da aplicação de carga



Figura 3.5.2 – Detalhe da viga 3 posicionada no pórtico para ensaio de flexão

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Bambu

4.1.1 Procedimentos de colheita e armazenagem do bambu

Todo o bambu utilizado como armadura longitudinal pertencia à espécie *Dendrocalamus giganteus*, de uma mesma plantação localizada na fazenda Santa Elisa, do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), situado na cidade de Campinas, Estado de São Paulo (figura 4.1.1.1).



Fonte: Beraldo (2000)

Figura 4.1.1.1 – Moita de bambu Gigante no IAC- Campinas

Após a colheita, os colmos foram cortados em talos de dois metros de comprimento e colocados para secarem ao ar livre durante 30 dias. Decorridos os 30 dias, os colmos foram fatiados em seis taliscas, com o auxílio de um dispositivo circular de corte (figura 4.1.1.2), confeccionado especialmente para este fim.

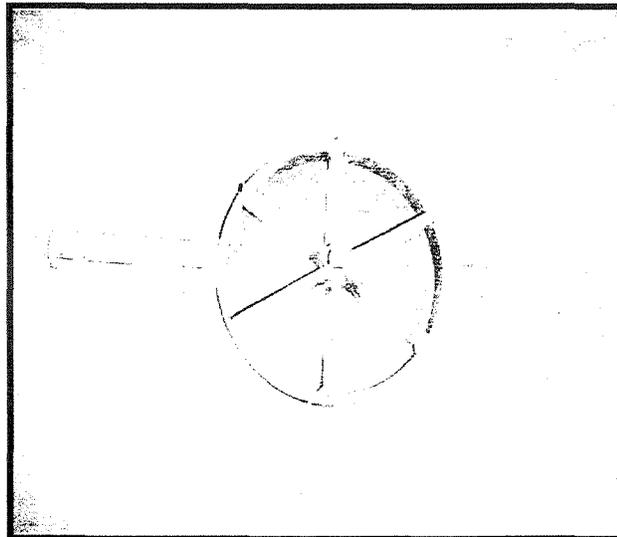


Figura 4.1.1.2 – Dispositivo circular com lâminas

Sobre as taliscas foi aplicado, com pincel, uma camada de defensivo, dissolvido em água, com a finalidade de impedir o ataque de insetos, como o *Dinoderus minutus*, que constrói galerias na parede interna do bambu (rica em amido), enfraquecendo-o.

Em seguida, as taliscas foram colocadas para secar por um dia ao ar livre (figura 4.1.1.3) para que o defensivo pudesse penetrar no bambu e, assim, inibir a ação dos insetos.

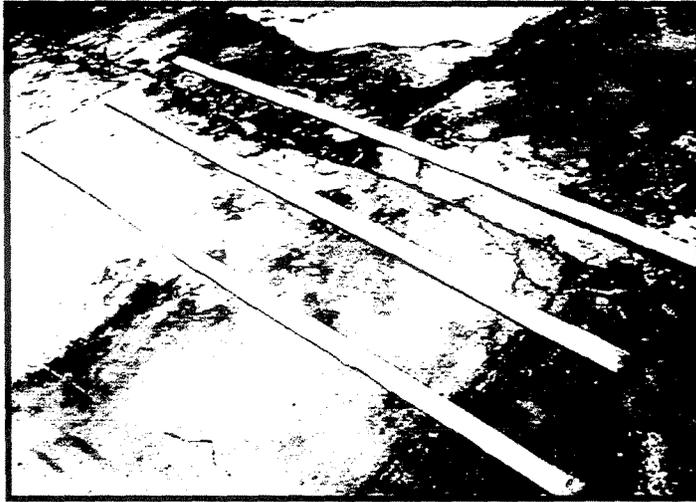


Figura 4.1.1.3 - Taliscas de bambu secando ao ar

Após o tratamento, todo o bambu foi colocado em um tanque com água (figura 4.1.1.4), pois os insetos não o atacam se ele estiver ainda úmido. Dessa forma, garantiu-se que o bambu utilizado nos ensaios não estaria enfraquecido pela ação dos insetos.

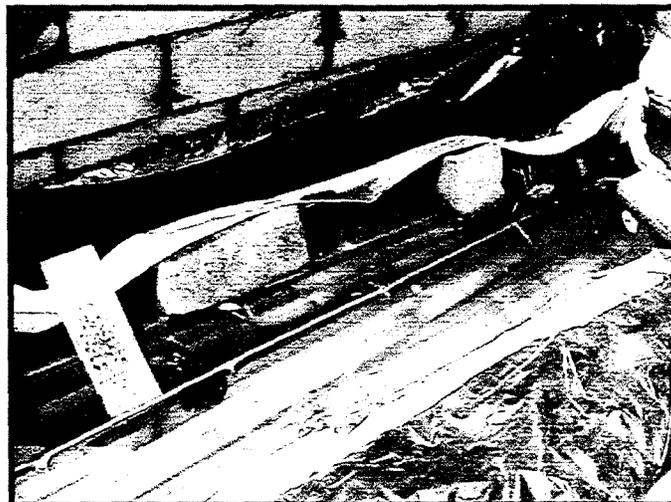


Figura 4.1.1.4 - Taliscas de bambu imersas em água

Uma semana antes da realização dos ensaios, as taliscas selecionadas foram retiradas do tanque e colocadas para secar, sendo assim, ensaiadas na umidade ambiente.

4.2 Ensaio de Tração Paralela às Fibras

Para a realização desse ensaio, foram preparados corpos-de-prova (figura 4.2.1) a partir de taliscas selecionadas aleatoriamente do tanque de água contendo os bambus. Essas taliscas foram partidas ao meio longitudinalmente, de forma a apresentarem uma seção transversal retangular de, aproximadamente, $2,0 \text{ cm}^2$ de área, comprimento médio de 60 cm e sempre com 2 nós, localizados cada um nas extremidades dos corpos-de-prova.

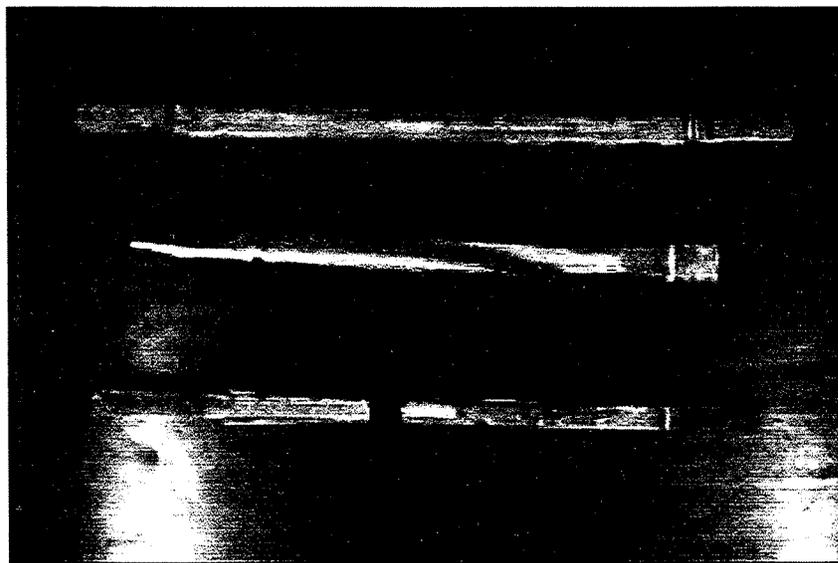


Figura 4.2.1 – Taliscas de bambu para Ensaio de tração

O principal obstáculo a ser vencido para a realização desse ensaio foi ausência de normas. Primeiramente, tentou-se adaptar este ensaio à norma de Tração de

Madeira (NBR 7190-97). Isto não deu certo porque as tensões se concentraram na parte do corpo-de-prova onde há a mudança de seção transversal, desviando a ruptura da parte central do corpo-de-prova para esta região (figura 4.2.2).

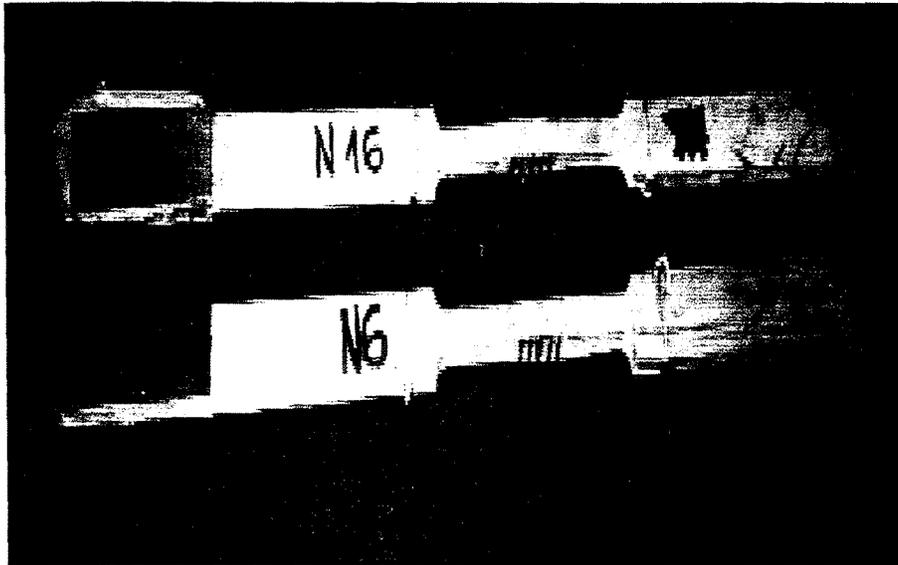


Figura 4.2.2 – Corpo-de-prova com redução da área transversal central para ensaio de tração

Outra tentativa foi utilizar a norma para ensaio de tração em barras de aço (NBR 6349-91). Entretanto, houve dificuldades, pois as características físicas do bambu são diferentes daquelas do aço.

Várias tentativas foram feitas com o intuito de melhorar a aderência entre o corpo-de-prova e as garras da prensa. A primeira delas foi inverter a posição do corpo-de-prova na garra. O usual é a maior dimensão do bambu ficar paralela às garras. Com a inversão, estas foram presas à menor dimensão do CP, aparentando maior firmeza. No entanto, no momento do ensaio, a seção do CP acabava sendo esmagada pelas garras, antes que as fibras rompessem por tração. Portanto, a inversão do CP não podia ser feita.

Em seguida, a idéia foi “encapar” a porção do CP em contato com as garras da prensa com um pedaço de borracha, a fim de proporcionar maior aderência (figura 4.2.3). Essa tentativa também falhou, pois chegado um certo estágio do carregamento,

a força de esmagamento transmitida pela garra acabava descolando a borracha que havia sido fixada com cola do tipo *SUPERBONDER*

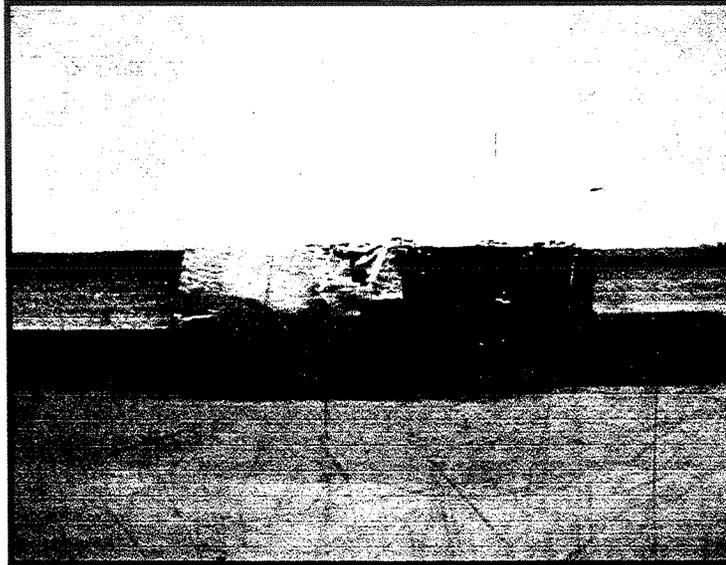


Figura 4.2.3 - Aspecto da borracha após a tentativa de ensaio

Com o objetivo de melhorar a aderência entre as garras da prensa e o bambu, sem esmagar este último, tentou-se fixar um pedaço de tubo metálico com nata de cimento na porção de bambu que estaria em contato com as garras (figura 4.2.4). A tentativa não deu resultado, pois o bambu foi facilmente arrancado do tubo logo no início do carregamento devido à superfície lisa do bambu, solta-se das garras.

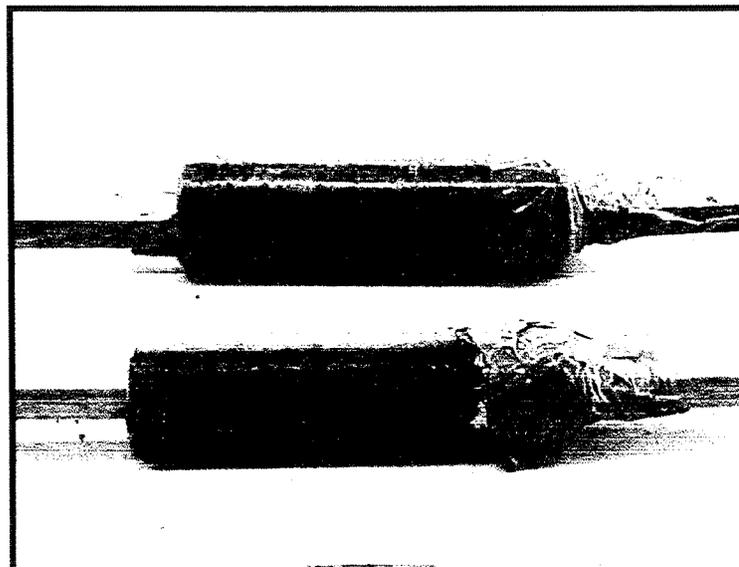


Figura 4.2.4 - Bambu "cimentado" ao cano de ferro fundido

A alternativa foi partir para a confecção de um tipo de braçadeira que prendesse melhor ao bambu e não deixasse que este escorregasse das garras da prensa durante o ensaio. Com esse intuito, foram usinadas duas peças de metal (figura 4.2.5) que foram presas ao bambu com fita adesiva.

Nas primeiras tentativas com esse novo dispositivo, o CP continuava escorregando quando a carga era aplicada. A fim de evitar esse deslizamento, o CP foi posicionado de forma que os nós servissem como uma espécie de apoio para as garras (superiores e inferiores).

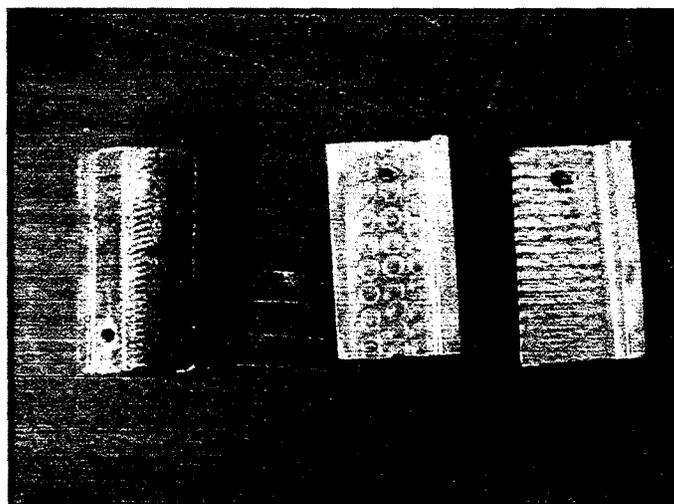


Figura 4.2.5 - Braçadeiras de metal

Diante disso, a idéia foi tornar a parte interna da braçadeira de metal mais rugosa, ou seja, criar uma superfície cheia de ranhuras que, em contato com o bambu, aumentasse a aderência. Os nós foram mantidos para servirem como apoio para as garras. Assim, os CPs não escorregavam mais durante a aplicação de carga, porém, rompiam na região das garras por esmagamento, antes de romperem à tração. Ao analisá-los, notava-se que as ranhuras internas haviam trabalhado como pequenas “serras” (figura 4.2.7), que estavam penetrando no bambu e enfraquecendo a seção na qual as garras seguravam o CP.

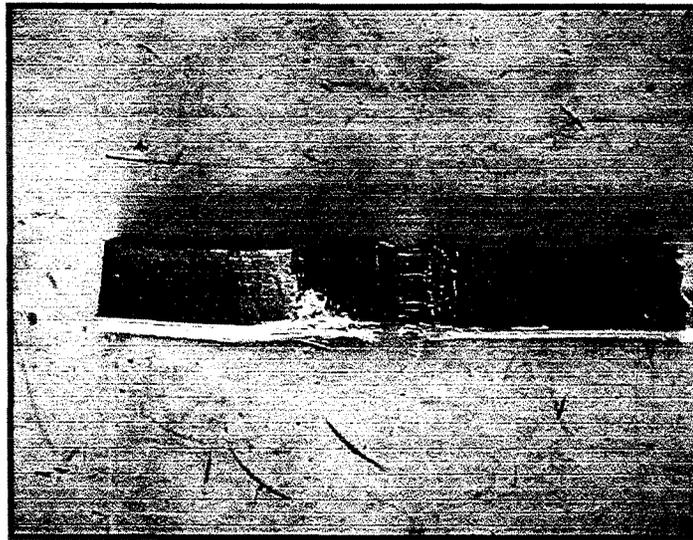


Figura 4.2.6 - Ruptura "serrada" da seção próxima ao nó do corpo de prova

Sem o auxílio das ranhuras (que foram retiradas da parte interna das braçadeiras), era preciso encontrar alguma outra forma de impedir o escorregamento do CP pelas garras. A primeira idéia foi fazer um furo em cada par de braçadeira de forma que um pequeno parafuso atravessasse o bambu, na parte superior e na inferior, e impedisse que as braçadeiras escorregassem pelo CP. Esse arranjo não funcionou, pois os parafusos rasgavam o bambu na direção axial quando a carga era aplicada.

Foi então que surgiu a solução que acabou viabilizando a realização do ensaio. Foram colocadas pequenas tiras de lixa grossa (n° 80) nas duas partes das braçadeiras em contato com o bambu (figura 4.2.7). Os corpos-de-prova foram então tracionados até a ruptura e esta ocorreu na porção central do CP (o que era esperado neste tipo de ensaio). O atrito gerado pelo contato da lixa com o bambu e da lixa com a braçadeira foi o suficiente para que as fibras dos CPs rompessem por tração, sem que faltasse aderência para manter o bambu preso às garras da prensa até o final do ensaio.

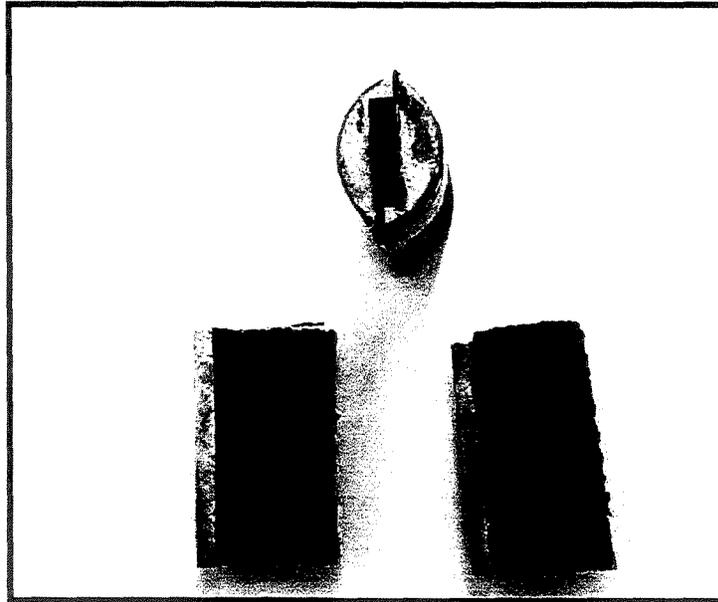


Figura 4.2.7 - Braçadeiras de metal encapadas com lixa

4.3 Ensaio de Compressão Paralela às Fibras

Para este ensaio foram preparados 6 corpos-de-prova, sem qualquer tratamento de impermeabilização, com as dimensões da seção transversal igual às do ensaio de tração. Na direção longitudinal os corpos-de-prova tiveram suas dimensões reduzidas devido sua forma delgada, que poderia ocasionar flambagem do CP antes da ruptura. Estes CPs foram lixados em uma politriz de madeira, modelo DP-10, fabricada pela Panambra – Produtos Industriais (figura 4.3.1) para que suas superfícies ficassem todas regulares. Depois, colocados para secar no ambiente do laboratório até que suas massas estabilizassem, durante 15 dias.

O valor da tensão de ruptura foi obtido dividindo-se o valor da carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova. Devido às dimensões reduzidas dos corpos-de-prova não foi possível obter as deformações, portanto, o valor do módulo de elasticidade à compressão não foi encontrado.

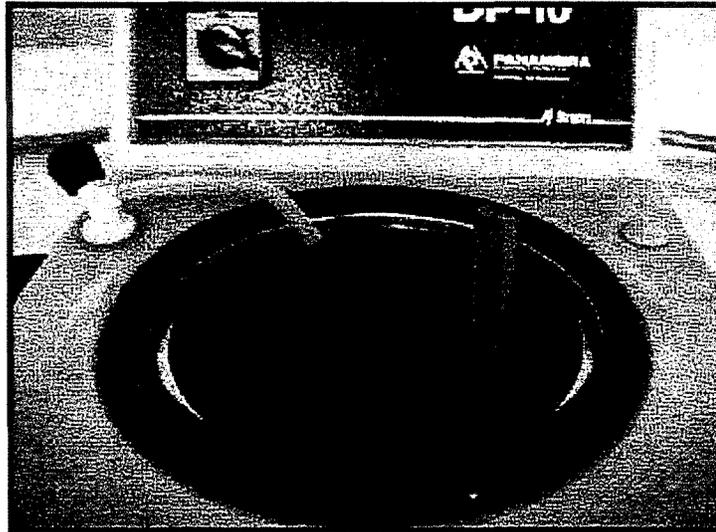


Figura 4.3.1 – Lixadeira de madeira

O ensaio de Compressão foi realizado aplicando-se uma carga axial paralela à direção longitudinal de cada amostra até seu rompimento (figura 4.3.2). Esta carga, dividida pela área da seção transversal da amostra, determinou a resistência à compressão das mesmas.

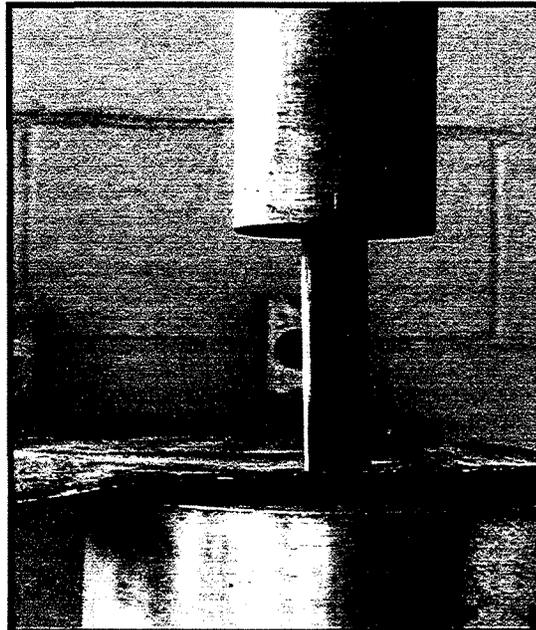


Figura 4.3.2 – Corpo-de-prova apos a ruptura

As amostras foram ensaiadas em uma prensa com aplicação de carga manual, cuja carga máxima era de 50 kN e sensibilidade de 0,01 mm (figura 4.3.3).

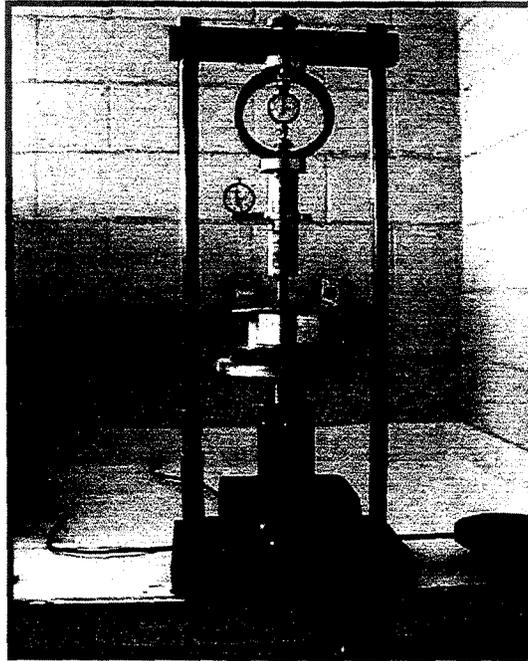


Figura 4.3.3 – Prensa usada no ensaio de compressão

4.4 Ensaio de Variação Dimensional

Os colmos foram cortados transversalmente em serra circular e foram escolhidas 9 amostras do meio dos colmos utilizados nesta pesquisa para realizar o ensaio de estabilidade dimensional, sendo 3 no estado natural (testemunho) e 6 com tratamentos de impermeabilização. Suas dimensões médias eram: 7 mm na direção radial, 15 mm na direção tangencial e 66 mm na direção longitudinal (figura 4.4.1)

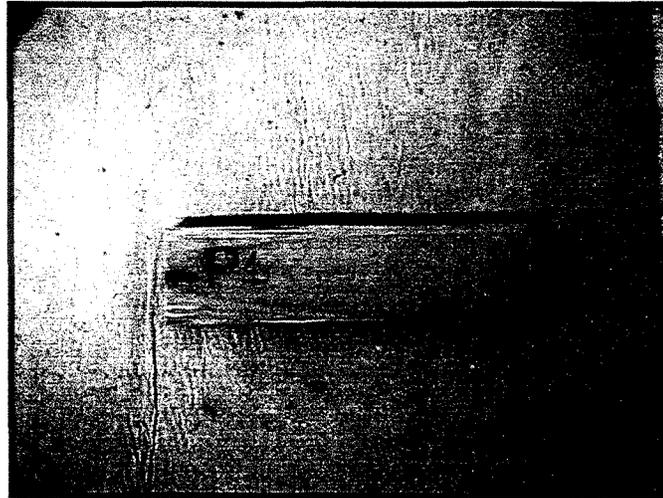


Figura 4.4.1 – Dimensões dos corpos-de-prova

As amostras de bambu receberam dois tipos de tratamentos de impermeabilização:

- 3 corpos-de-prova receberam uma camada fina de piche e imediatamente após foram passados em areia grossa;
- 3 corpos-de-prova receberam uma camada fina de verniz marítimo e também foram passados em areia grossa.

Cada amostra também foi lixada em uma polítrix especificada anteriormente (figura 4.3.1), para que suas superfícies ficassem suficientemente uniformes para serem medidas com paquímetro digital (Starret – 300 mm) nas 3 direções de elasticidade:

- radial: correspondente à direção centro-periferia do colmo;
- tangencial: referente à direção paralela às camadas externas do colmo;
- axial: é a medida correspondente ao comprimento da amostra do colmo.

As amostras foram submetidas a três ambientes distintos:

- secas ao ar: considerou-se as dimensões e a massa dos corpos-de-prova após estabilização em temperatura e umidade ambiente após 30 dias do corte dos colmos de bambu;
- saturado: depois de efetuadas as primeiras medições as amostras foram imersas em água por 120 h (figura 4.4.2). Passado este período, as amostras foram retiradas da água e colocadas para escorrer, para retirar o excesso de água. Logo em seguida, foram pesadas e medidas novamente;
- secas em estufa: após a saturação as amostras ficaram secando em temperatura ambiente durante 24 h (para que não houvesse alterações estruturais nas amostras) e, em seguida, foram colocadas na estufa a 103 °C (figura 4.4.3) até estabilização da massa e das dimensões e, em seguida, foram pesadas e medidas da mesma forma descrita anteriormente.



Figura 4.4.2 – Amostras de bambu saturadas

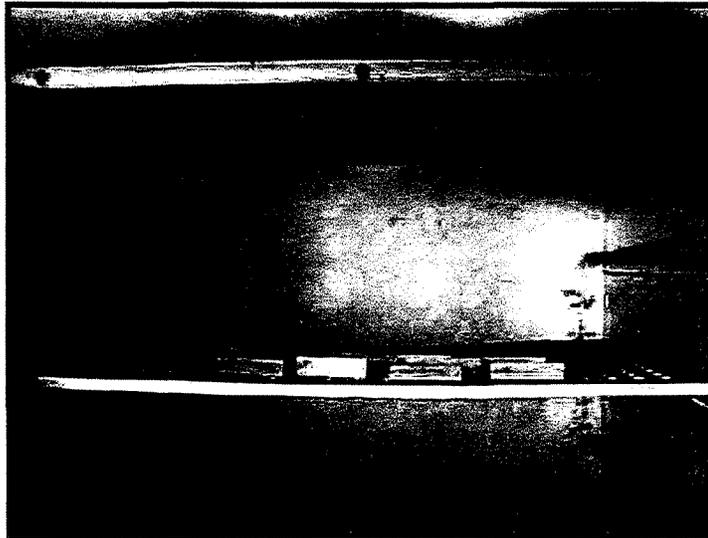


Figura 4.4.3 – Amostras de bambu em estufa

4.5 Ensaio de Arrancamento (“Pull-out”)

Para o ensaio de arrancamento foram preparados 16 CPs, sendo 4 para cada tipo de tratamento adotado e 4 CPs na condição natural, que serviu como base de comparação (testemunho). Os tratamentos de impermeabilização foram os seguintes:

- a) Bambu com uma camada de piche e areia grossa (figura 4.5.1): o objetivo foi o de que o piche trabalhasse como impermeabilizante e, ao mesmo tempo, como base para a areia, que aumentaria a aderência do bambu com o concreto;
- b) Bambu com uma camada de verniz e areia grossa (figura 4.5.2): o objetivo foi o mesmo do tratamento anterior, mas com a vantagem do verniz ser mais fácil de trabalhar;
- c) Bambu com uma camada de verniz e anéis de arame farpado (figura 4.5.3): o verniz continuaria desempenhando o papel de impermeabilizante, mas o aumento da aderência seria realizado pelo arame farpado.

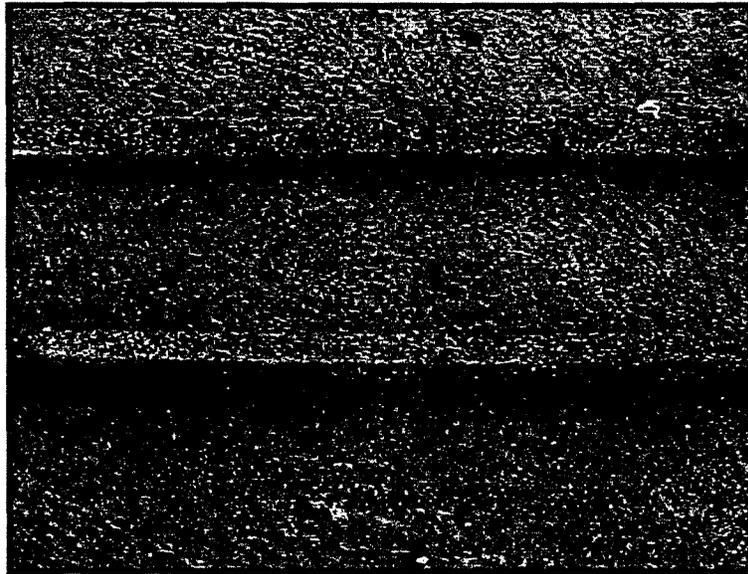


Figura 4.5.1 – Tratamento de piche/areia

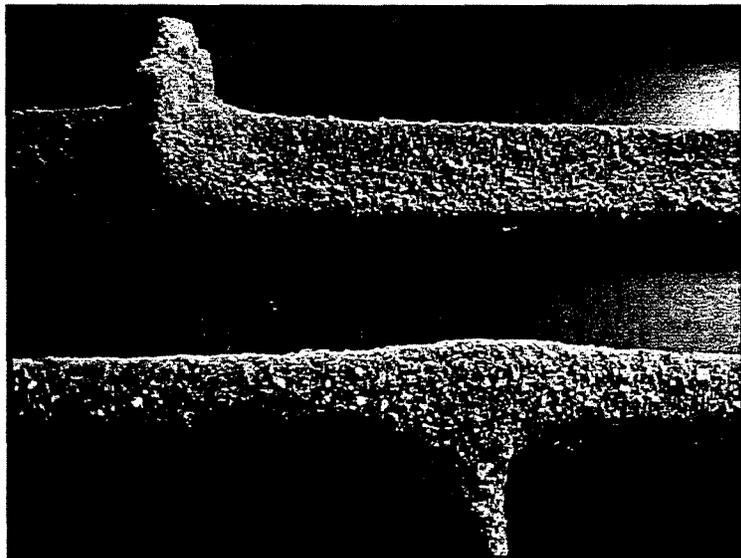


Figura 4.5.2 – Tratamento de verniz/areia

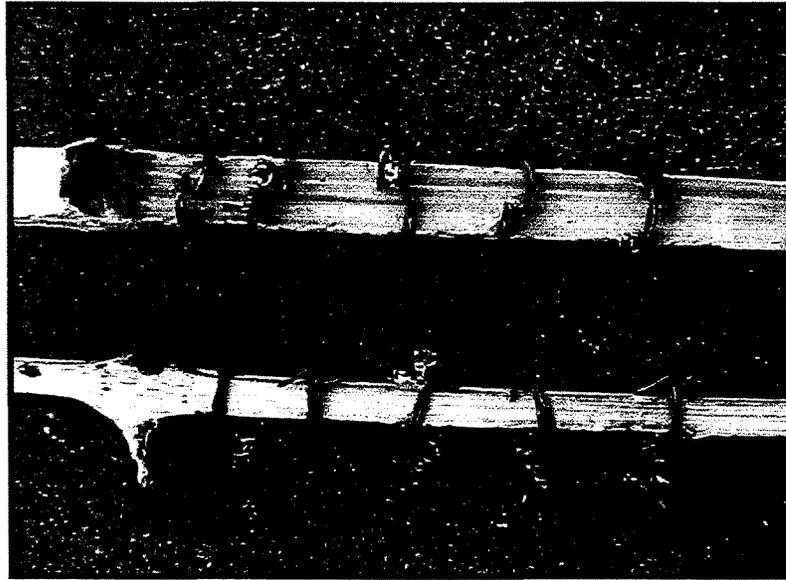


Figura 4.5.3 – Tratamento de verniz/aramé

Os tratamentos com piche/areia e arame farpado foram adotados por serem sempre usados em trabalhos já realizados sobre o assunto. Mas, a maioria dos autores enrolam o arame farpado no bambu, fato que inevitavelmente influi nos resultados dos ensaios, pois o arame enrolado acaba por absorver parte dos esforços, pois é um material mais resistente que o bambu. No caso dos anéis de arame, essa influência se torna quase desprezível.

Além do arame farpado, também foi aplicada uma camada de verniz para impermeabilizar a talisca de bambu, pois de acordo com o ensaio de absorção, realizado anteriormente, o bambu sofre grande variação volumétrica quando em condição natural, prejudicando assim, a aderência bambu/concreto.

O tratamento envolvendo verniz e areia foi utilizado devido a maior facilidade de obtenção e manuseio do verniz em relação ao piche, o qual necessita de aquecimento antes de ser utilizado.

Os corpos-de-prova apresentavam formato cúbico (15 cm de aresta), com a talisca de bambu posicionada no centro de uma das faces do cubo. Cada amostra de

bambu recebeu seu tratamento de impermeabilização e aderência somente na parte que ficou imersa no concreto (Figura 4.5.4).

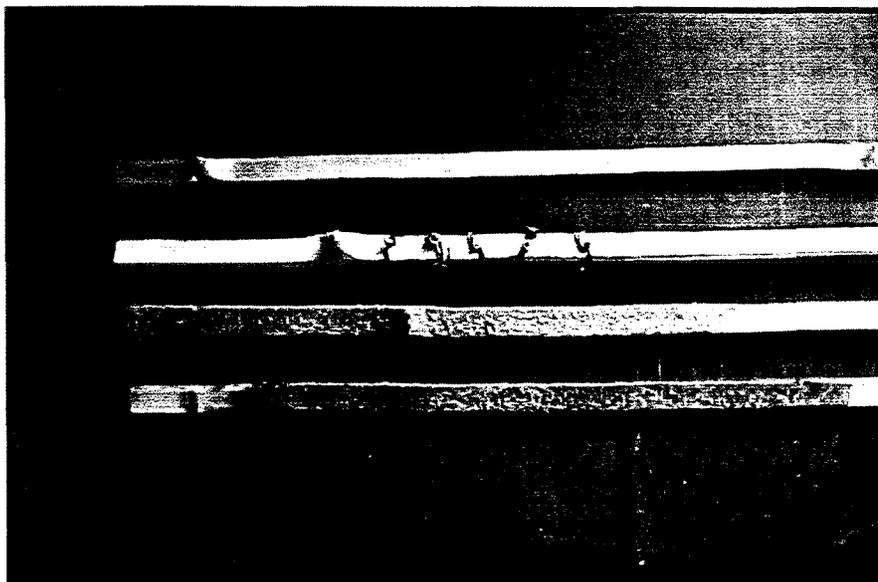


Figura 4.5.4 – Corpos-de-prova com tratamentos para o ensaio de arrancamento (“Pull-out”)

Para a confecção dos corpos-de-prova utilizou-se um concreto com o traço 1:3:3 e relação água/cimento de 0,6, que foi o mesmo utilizado na concretagem das vigas. Os mesmos foram vibrados em mesa vibratória localizada no laboratório e ensaiados com idade de 14 dias. Para caracterização do concreto utilizado nos corpos-de-prova de arrancamento foram moldados 6 CPs cilíndricos de 15 x 30 cm para cada tipo de tratamento (NBR 5739). Com estes CPs foram realizados ensaios para determinação da resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral. Esses ensaios foram realizados na mesma data do ensaio de arrancamento. A prensa utilizada neste ensaio foi uma Versa Tester com capacidade máxima de 150 t e sensibilidade de 125 kgf. A mesma foi adaptada para o ensaio de arrancamento (figura 4.5.5).

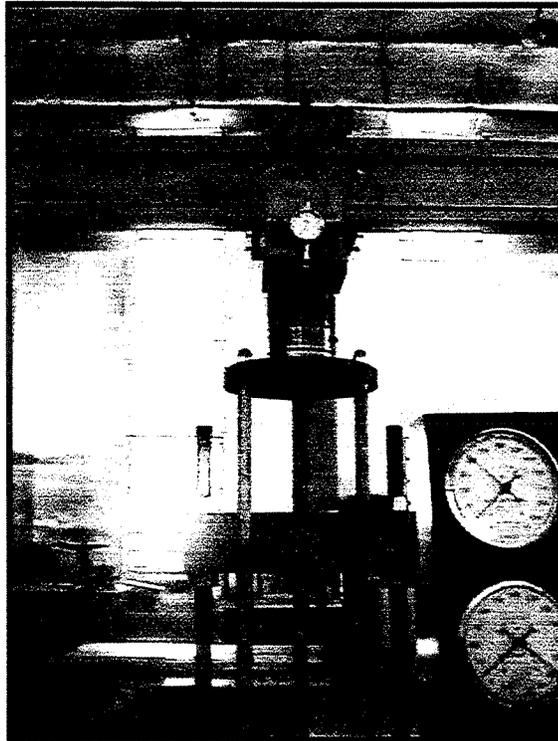


Figura 4.5.5 – Prensa adaptados para ensaio de Arrancamento (“Pull-out”)

Para determinar a aderência do bambu com o concreto foram construídos gráficos de tensão x deslocamento para cada tratamento. A tensão foi obtida dividindo-se o valor da carga lida na prensa pela área de aderência da talisca de bambu com o concreto. Estes valores foram avaliados através da média das leituras de dois relógios comparadores fixados no corpo-de-prova com auxílio de uma haste metálica (figura 4.5.6).

Do mesmo modo que no ensaio de tração paralela houve dificuldade para prender a talisca de bambu às garras da prensa, sendo utilizadas as mesmas braçadeiras metálicas confeccionadas para aquele ensaio.

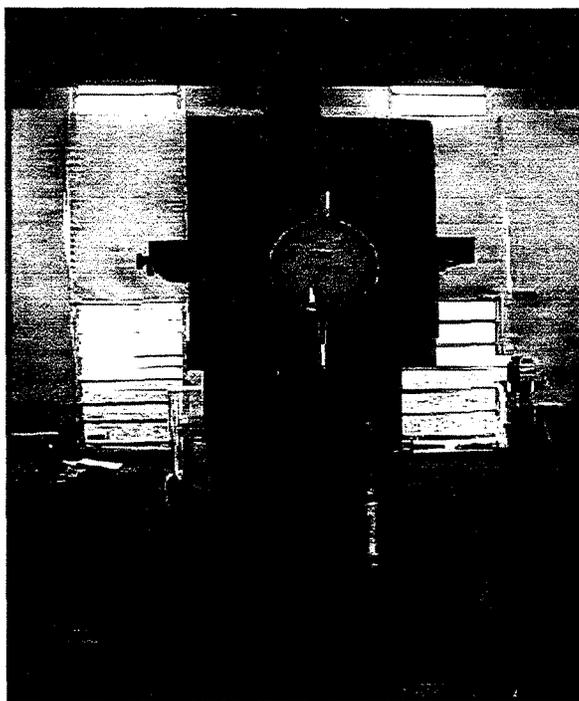


Figura 4.5.6 – Posicionamento dos relógios comparadores

4.6 Concreto

A escolha do traço empregado foi baseada no uso convencional, ou seja, traço 1:3:3 (cimento:areia:brita), com fator água/cimento 0.6, para se obter trabalhabilidade suficiente em betoneira. Este concreto foi usado na concretagem dos corpos-de-prova de arrancamento das vigas e na concretagem das vigas reforçadas com taliscas de bambu.

A trabalhabilidade da mistura foi determinada através do ensaio de abatimento do tronco de cone (NBR-NM-67/98), para facilitar o adensamento do concreto nas formas.

O controle da resistência à compressão do concreto foi feito através da moldagem de corpos-de-prova cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, sendo realizados os seguintes ensaios:

- Compressão axial (figura 4.6.1): determinar a resistência à compressão do concreto (f_{ck}) e o módulo de elasticidade com 28 dias de idade através da norma NBR 5739/94. Para se obter o módulo de elasticidade foram colados extensômetros elétricos na superfície do CP e conectados a um aqisitor de dados;
- Compressão diametral (figura 4.6.2): avaliar a resistência à tração do concreto com 28 dias de idade pela norma NBR 12142.

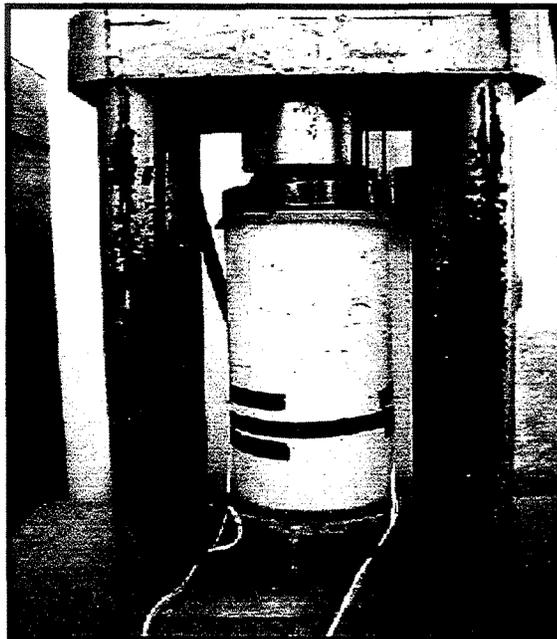


Figura 4.6.1 – Ensaio de compressão axial

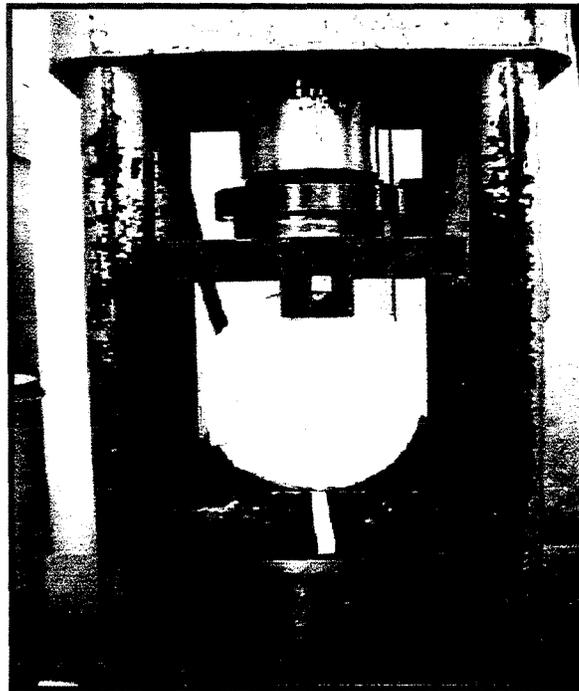


Figura 4.6.2 – Ensaio de Compressão Diametral

Os materiais componentes do concreto utilizado nesta pesquisa foram os disponíveis em laboratório, cujo fornecimento regular foi mantido ao longo do programa dos experimentos. Os agregados foram utilizados em temperatura e umidade ambiente. Também foram realizados ensaios para determinar a curva granulométrica dos agregados.

4.6.1 Cimento

O cimento Portland de alta resistência inicial CP-V-ARI – PLUS (NBR 5733) da Cimentos Nacionais de Minas S.A- CIMINAS foi utilizado, pois sua elevada resistência inicial e endurecimento rápido diminui a incompatibilidade química entre o bambu e o concreto. O cimento ARI também favorece na redução do tempo de desmolde das peças e na absorção da água de amassamento pelas taliscas de bambu imersas no concreto.

Este cimento tem como características relativas à finura um resíduo na peneira 200 de, aproximadamente, 1% e uma superfície específica Blaine de 400 m²/kg. Estes dados foram obtidos através de ensaios realizados segundo a norma NBR 11579/91.

4.6.2 Agregados

Foi utilizado como agregado graúdo brita com dimensão máxima de 19 mm e módulo de finura igual a 6,82 mm, devido à variabilidade da largura das taliscas de bambu, sendo que o recobrimento dos mesmos seria de 2 cm. Sua curva granulométrica foi obtida segundo a norma NBR 7217/87 e pode ser vista no gráfico 4.6.2.1.

O agregado miúdo utilizado foi constituído de areia fina com módulo de finura igual 2,14 mm e sua curva granulométrica é dada no gráfico 4.6.2.2. Esta areia utilizada estava estocada no Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia Civil.

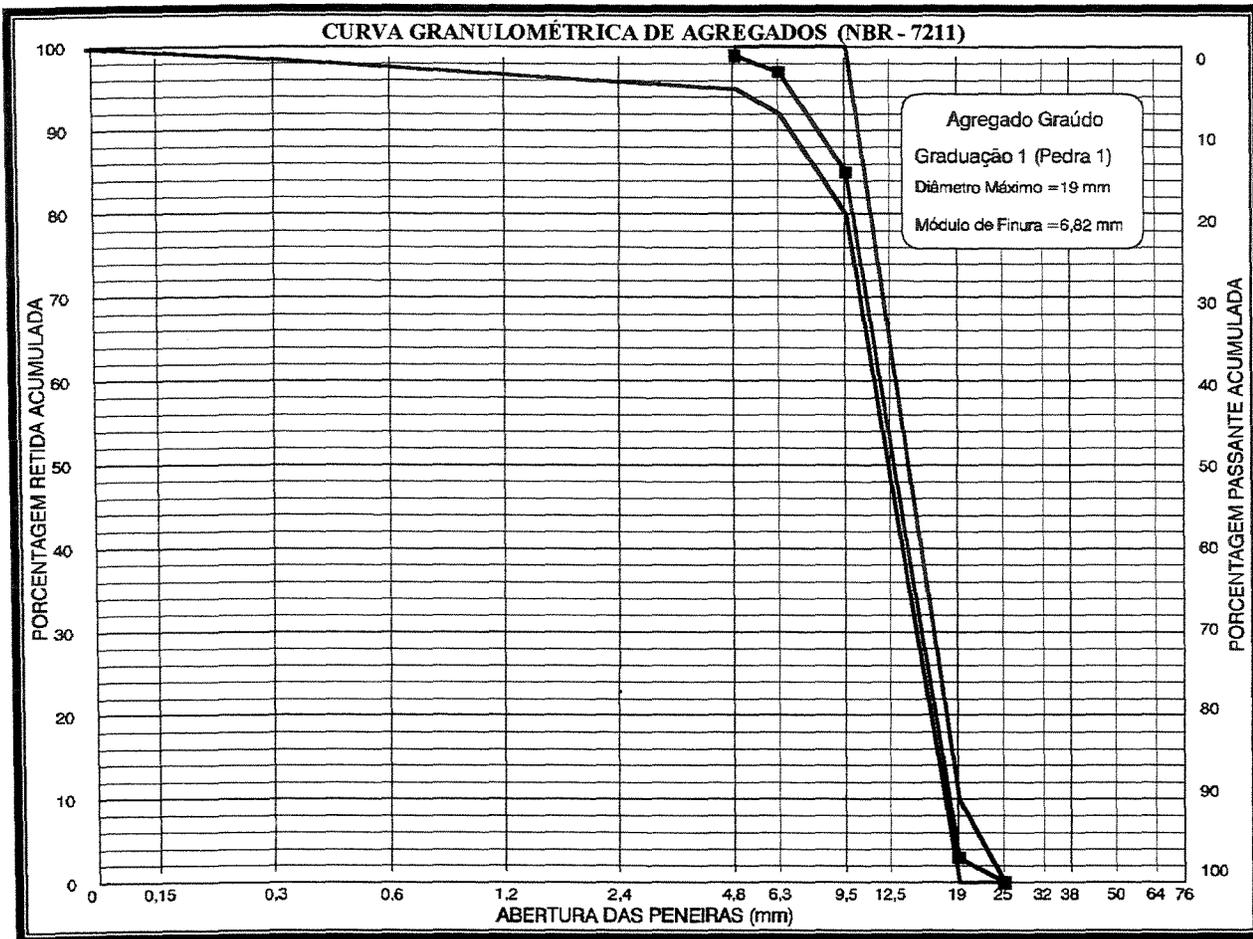


Gráfico 4.6.2.1 – Curva granulométrica do agregado graúdo

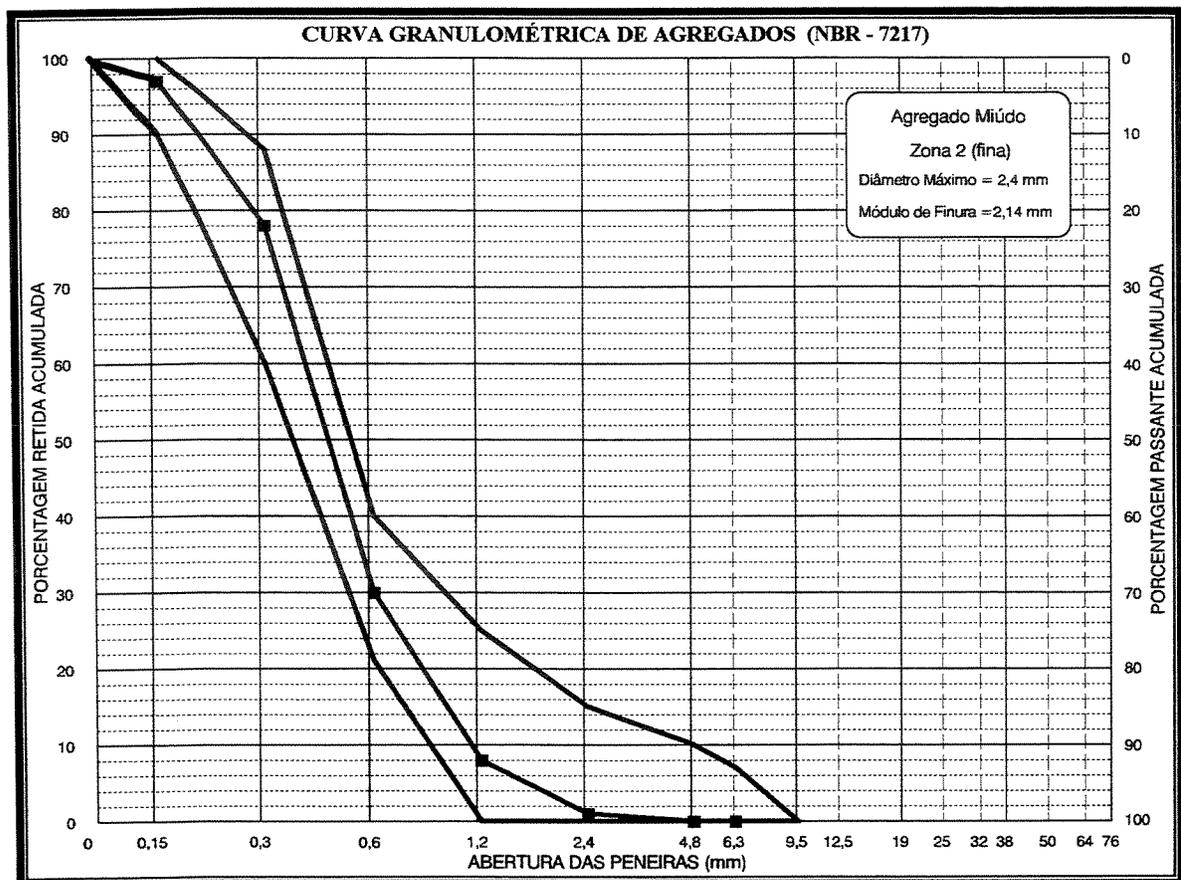


Gráfico 4.6.2.2 - Curva granulométrica do agregado miúdo

4.6.3 Aço

Para caracterização mecânica do aço a ser utilizado como armadura longitudinal (porta-estribos) e estribos das vigas armadas com bambu foram realizados ensaios de tração paralela para se determinar a tensão de escoamento do aço, importante para o cálculo do módulo de elasticidade e da armadura de bambu das vigas que serão realizadas posteriormente. Para este ensaio foi utilizada a norma NBR 6152.

O aço utilizado foi CA-60B com diâmetro de 5 mm, no qual também foram colados extensômetros elétricos para determinar suas propriedades mecânicas, como mostra o gráfico 4.6.3.1. A resistência de ruptura à tração deste aço foi de 736,8 MPa e

o módulo de elasticidade de 209,4 GPa. Uma viga armada apenas com barras de posicionamento e estribos foi concretada para serem comparados os seus resultados com as vigas armadas com bambu.

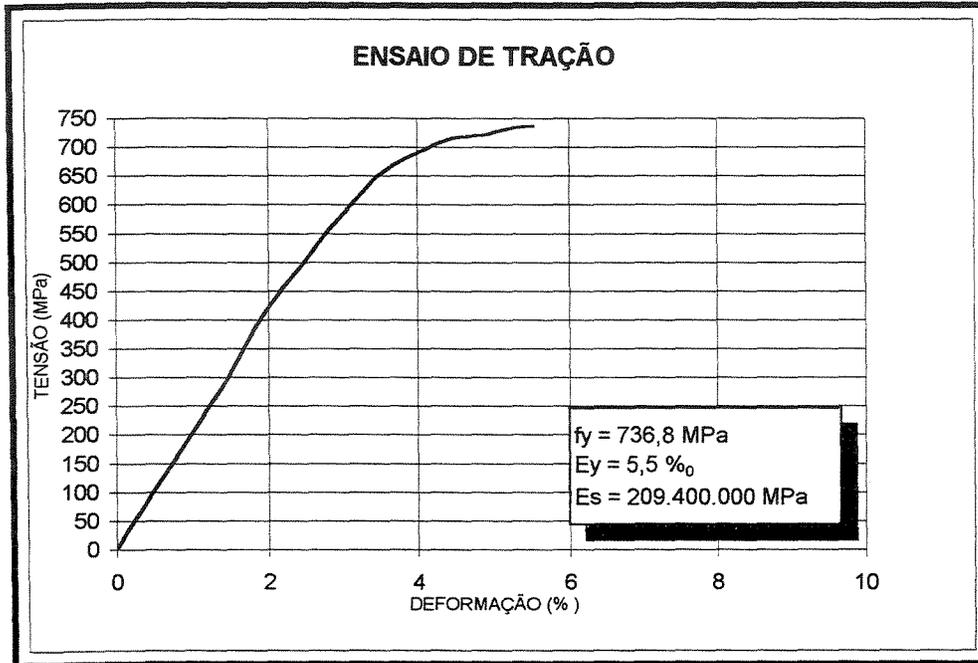


Gráfico 4.6.3.1 – Propriedades mecânicas do aço CA-50B

4.7 Vigas

Foram realizadas e ensaiadas 6 vigas em concreto, com 15 cm de largura, 20 cm de altura e 180 cm de comprimento. Nos estribos foi usado aço de 4,2 mm de diâmetro. O cobrimento das vigas foi de 1,5 cm em todos os lados e as armaduras longitudinais de posicionamento dos estribos tinha 5 mm de diâmetro.

A Viga 1 foi realizada para comparação de dados (testemunho) e teve sua armadura somente com aço, portanto, não havia talisca de bambu (figura 4.7.1)

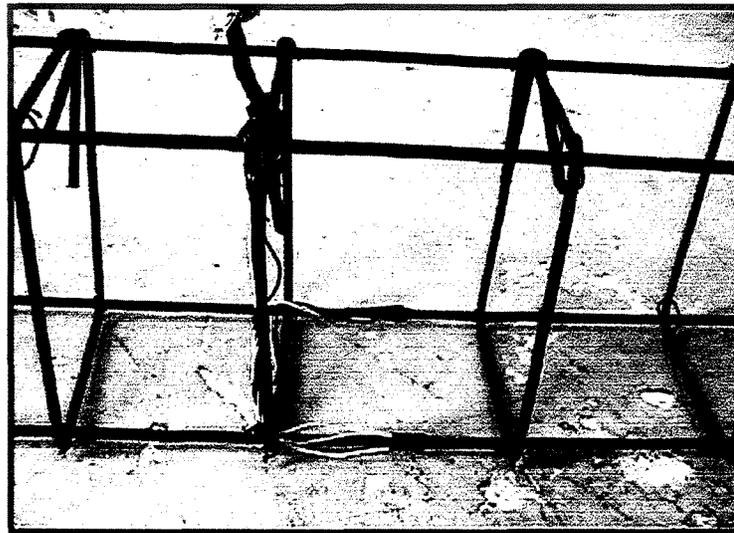


Figura 4.7.1 – Detalhe da armadura da Viga 1

A Viga 2 apresentava armadura longitudinal de bambu na região tracionada da peça, sendo que as taliscas não tinham nenhum tipo de tratamento, para ser comparada com a armadura que recebeu tratamento (Viga 3). Na figura 4.7.2 é demonstrado a armadura da Viga 2.

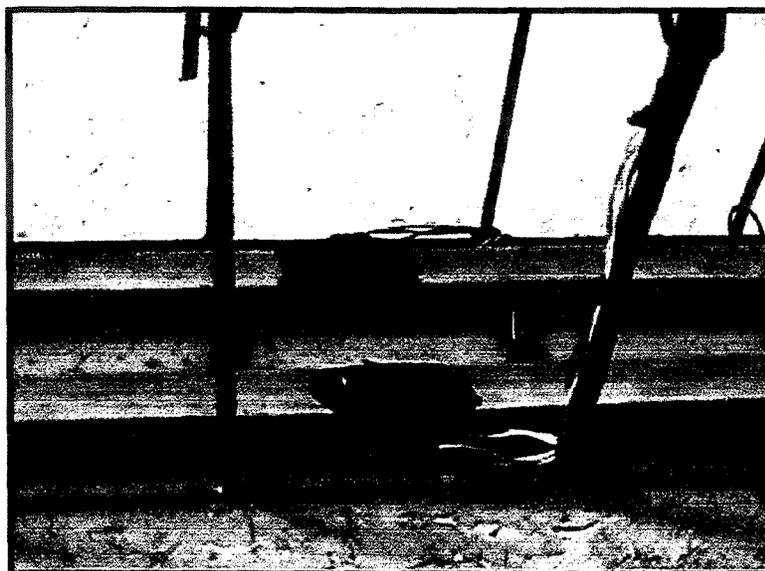


Figura 4.7.2 – Detalhe da armadura da Viga 2

A Viga 3 apresentava a mesma armadura da Viga 2, mas nesta foi aplicado um tratamento de impermeabilização que foi pré-determinado no ensaio de arrancamento (figura 4.7.3)

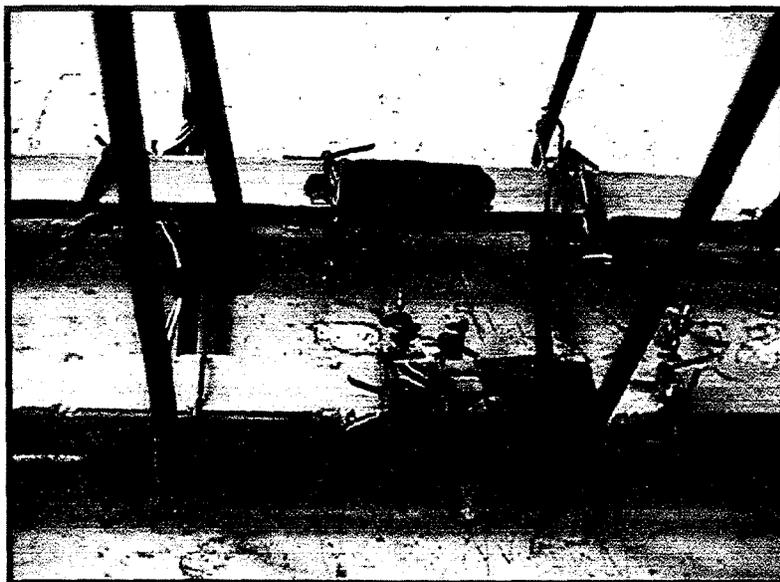


Figura 4.7.3 – Detalhe da armadura da Viga 3

Na armadura da Viga 4 também foi aplicado o tratamento da Viga 3 e foi acrescentada uma segunda camada de armadura de bambu disposta 5 cm acima da inferior (figura 4.7.4). Esta viga foi realizada para verificar se a porcentagem de armadura de bambu influenciava a tensão última da viga.



Figura 4.7.4 – Detalhe da armadura da Viga 4

O comprimento da armadura das Vigas 5 e 6 foi diferente para se verificar a aderência do bambu com o concreto sem a ancoragem da armadura. Para tanto, a armadura tinha apenas 100 cm de comprimento posicionada na região central e inferior das vigas (figura 4.7.5). A diferença entre elas foi que somente a Viga 6 recebeu o tratamento de verniz e anéis de arame farpado.

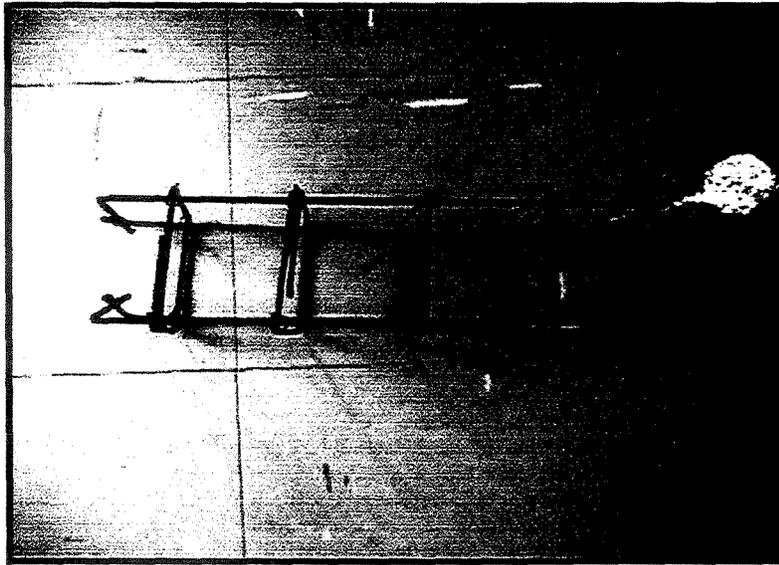


Figura 4.7.5 – Detalhe da armadura de bambu da Viga 5

Todas as vigas foram instrumentadas com extensômetros elétricos para determinar as deformações ocorridas ao longo do carregamento das mesmas até a ruptura. Antes de serem colados os extensômetros, as superfícies das armaduras, onde os mesmos seriam posicionados, foram lixadas e limpas para não haver interferências nas leituras realizadas durante o ensaio. Depois de colados, estes extensômetros foram soldados a fios elétricos e isolados com fita isolante para não serem danificados durante o transporte e a concretagem das vigas (figura 4.7.6).



Figura 4.7.6 – Detalhe dos extensômetros colados nas taliscas de bambu

Depois de soldados os fios para serem conectados ao aquisitor de dados, estes foram isolados com papel alumínio para não haver contato com o concreto e serem danificados. As armaduras foram posicionadas no interior das fôrmas das vigas e posicionadas para concretagem, sendo observado o espaço pré-determinado para o cobrimento das armaduras. Antes disso, as fôrmas receberam uma camada fina de desmoldante para facilitar a posterior desmoldagem das vigas (figura 4.7.7).

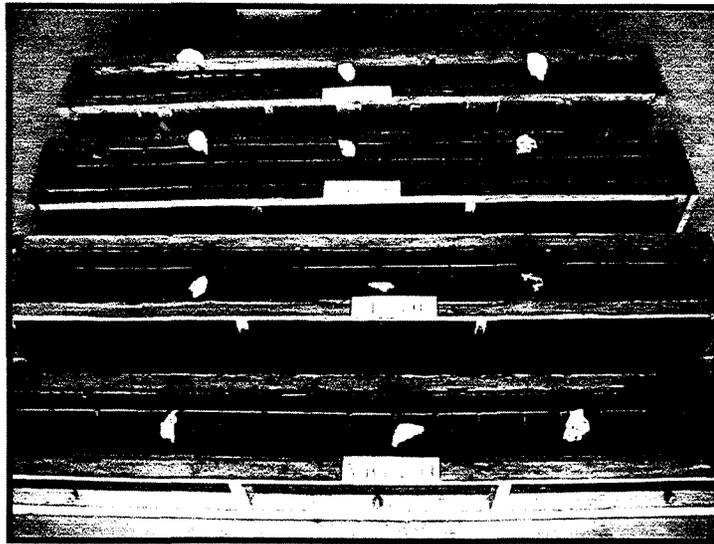


Figura 4.7.7 – Fôrmas das vigas

O concreto utilizado na concretagem das vigas foi misturado em uma betoneira elétrica localizada no Laboratório de Estruturas. Para o controle tecnológico do concreto foi feito o Ensaio de Abatimento e foram moldados corpos-de-prova de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura que foram ensaiados com a mesma idade das vigas, isto é, aos 28 dias (figura 4.7.8).

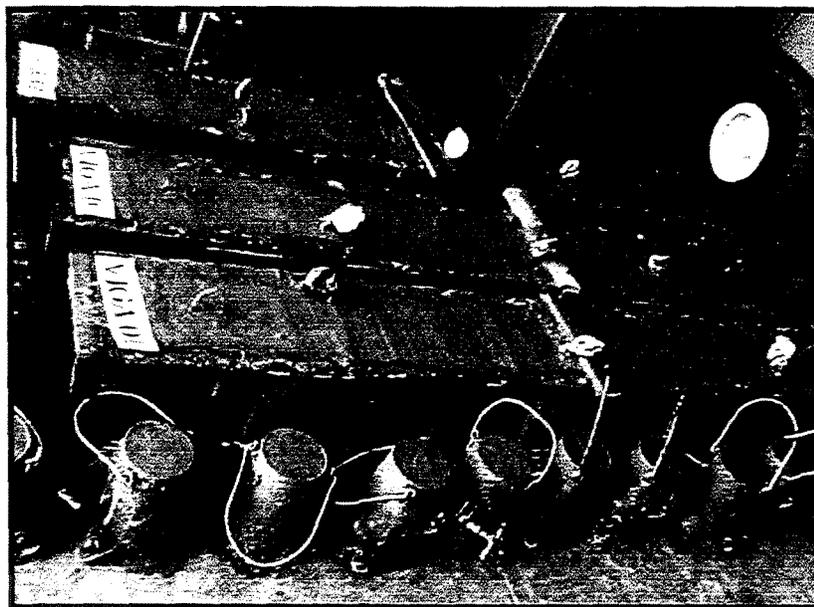


Figura 4.7.8 – Concretagem das vigas

Após a concretagem as vigas foram colocadas na câmara úmida do Laboratório para haver uma cura perfeita do concreto, obtendo-se assim uma melhor resistência final.

Antes de serem colocadas no pórtico, as vigas foram pintadas com tinta branca para se obter melhor nitidez das fissuras que surgiriam durante o carregamento das mesmas (figura 4.7.9).

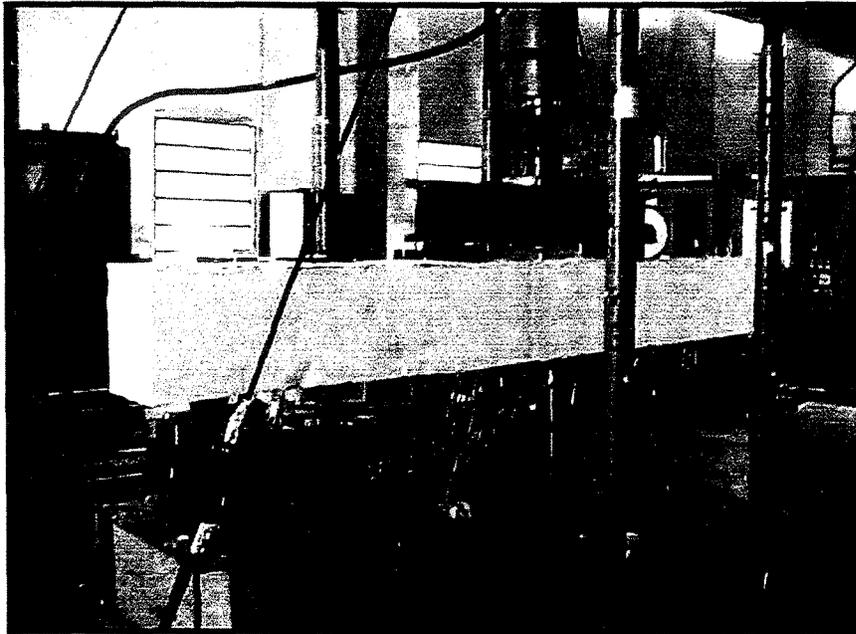


Figura 4.7.9 – Posicionamento da viga no pórtico

As fissuras foram marcadas com suas respectivas cargas a cada incremento de carga que foi efetuado com um macaco hidráulico conectado a uma célula de carga com capacidade de 50 t (figura 4.7.10).

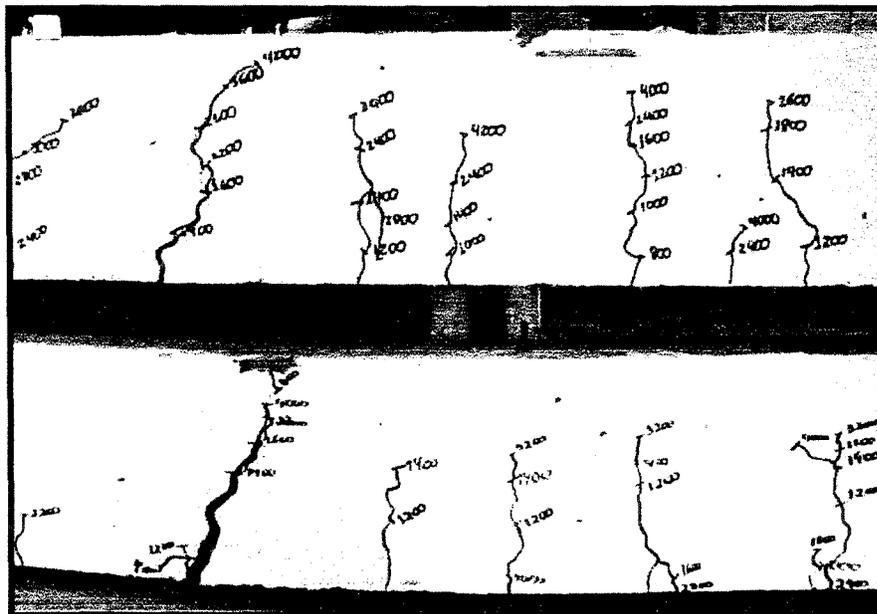


Figura 4.7.10 – Detalhe das fissuras

As deformações das armaduras (aço e bambu) foram coletadas através dos extensômetros durante todo o carregamento. Também foi colado um extensômetro na superfície superior da viga para obter o comportamento da área comprimida do concreto. Já os deslocamentos verticais foram medidos com o auxílio de um defletômetro mecânico KAEFER, com capacidade máxima de 50 mm e sensibilidade de 0,01 mm. Ele foi instalado na parte inferior e central da viga para se obter o deslocamento máximo no momento da ruptura da viga.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização do bambu

5.1.1 Ensaio de Tração Paralela às Fibras

Neste ensaio pode-se avaliar os valores de tensão de ruptura e módulo de elasticidade para a espécie de bambu estudada, sendo estes valores indispensáveis para o cálculo da armadura de bambu das vigas que foram realizadas posteriormente.

A tabela 5.1.1.1 apresenta as características físicas e mecânicas de cinco corpos-de-prova ensaiados e seus respectivos valores de tensão de ruptura e módulo de elasticidade à tração. Os valores médios destes resultados foram adotados para o cálculo das vigas. A umidade média (U) dos corpos-de-prova foi de 13,65% porque eles foram ensaiados 10 dias após o corte dos colmos.

Tabela 5.1.1.1 – Características físicas e mecânicas dos corpos-de-prova ensaiados à tração

CP	ÁREA (mm ²)	COMPRIMENTO (mm)		RUPTURA (kN)	σ_{rup} (MPa)	E (MPa)	U (%)
		Entre-nós	Total				
1	151,24	520	745	28,20	186,46	21.183	13,53
2	173,05	550	800	38,00	219,59	23.733	12,71
3	126,75	520	620	23,50	185,40	21.891	13,13
4	148,95	540	650	29,60	198,72	22.169	13,21
5	195,43	540	730	30,00	153,51	22.000	15,68
				Média	188,74	22.195	13,65

Para obtenção do módulo de elasticidade de cada corpo-de-prova foram construídos gráficos tensão x deformação específica. Os valores das cargas aplicadas aos CPs foram lidos diretamente na prensa, enquanto que as deformações foram obtidas através da leitura de extensômetros elétricos colados na parte central dos CPs (figura 5.1.1.1). A deformação específica é a divisão das leituras do extensômetro dividido pelo comprimento do mesmo (75 mm). O módulo de elasticidade é o valor do coeficiente angular da reta aproximada do gráfico tensão x deformação específica.

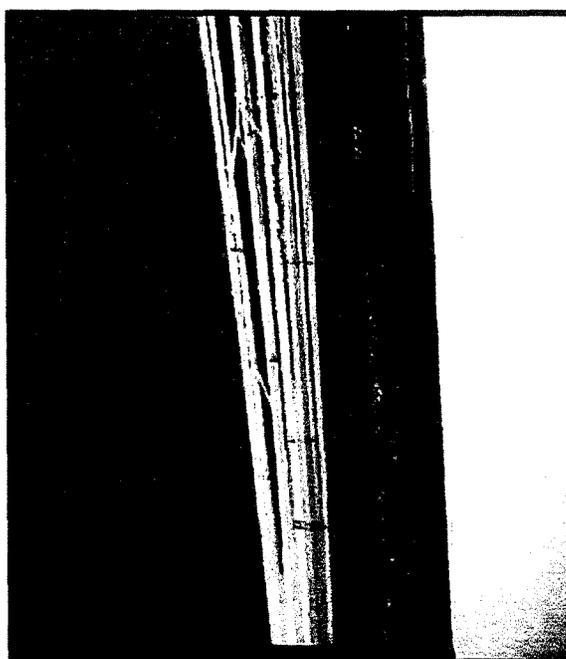


Figura 5.1.1.1 – Detalhe do extensômetro após a ruptura do CP

Os gráficos 5.1.1.1 a 5.1.1.5 demonstram o comportamento de cada CP ensaiado à tração paralela.

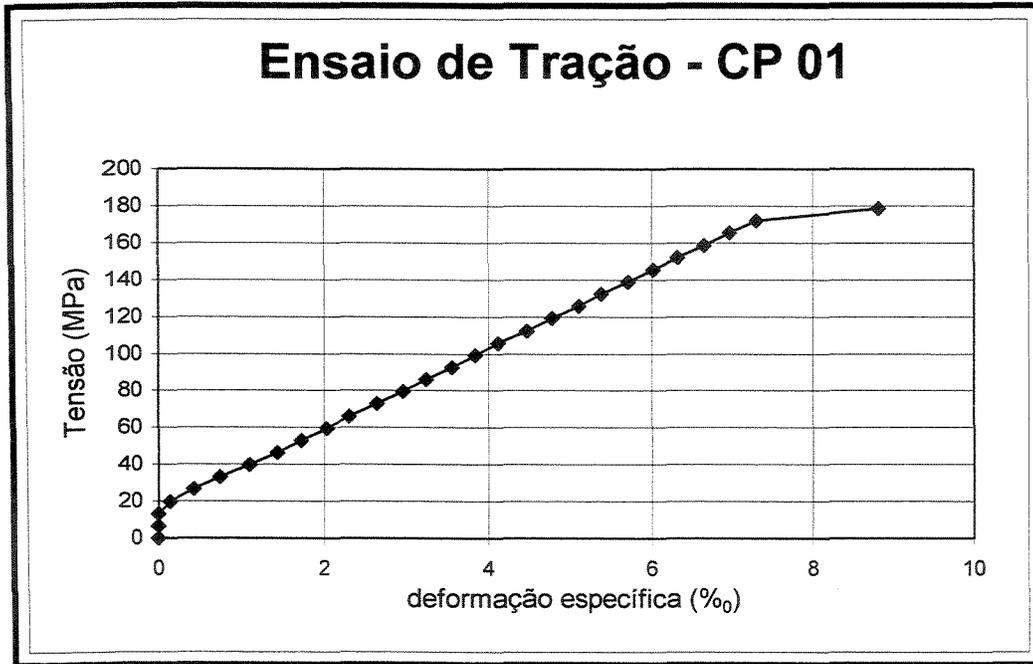


Gráfico 5.1.1.1 – Tensão x Deformação - CP 01

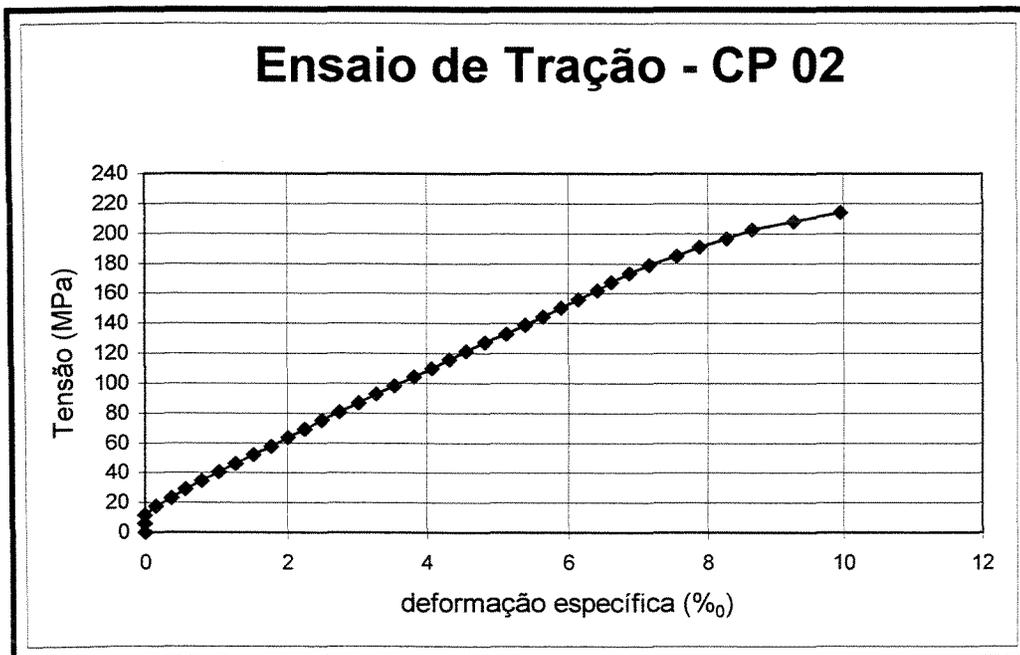


Gráfico 5.1.1.2 - Tensão x Deformação - CP 02

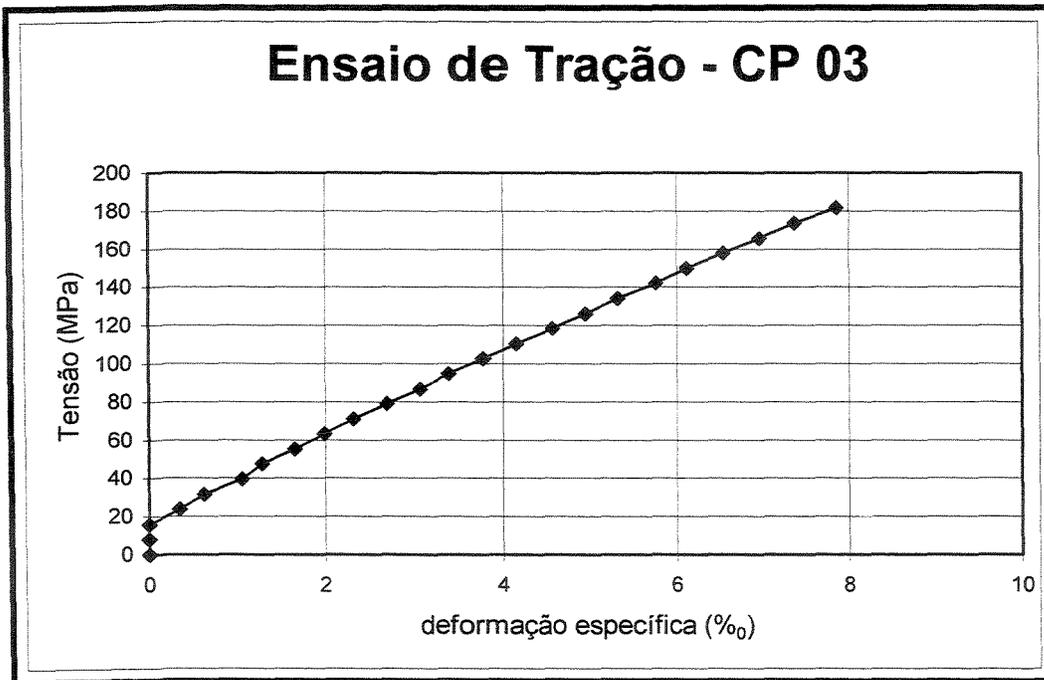


Gráfico 5.1.1.3 - Tensão x Deformação - CP 03

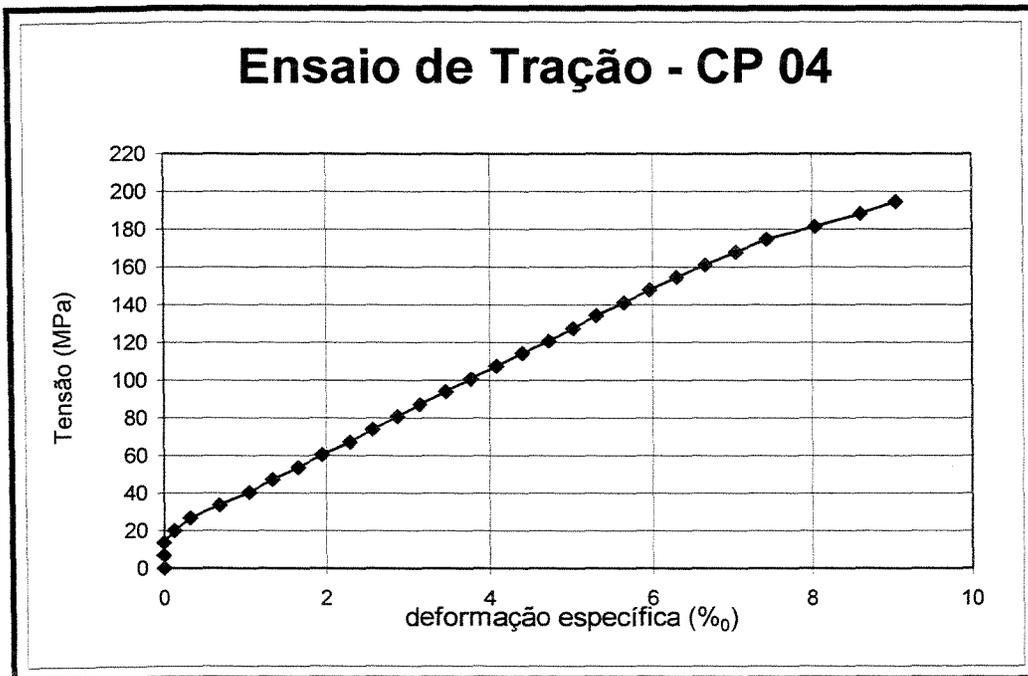


Gráfico 5.1.1.4 - Tensão x Deformação - CP 04

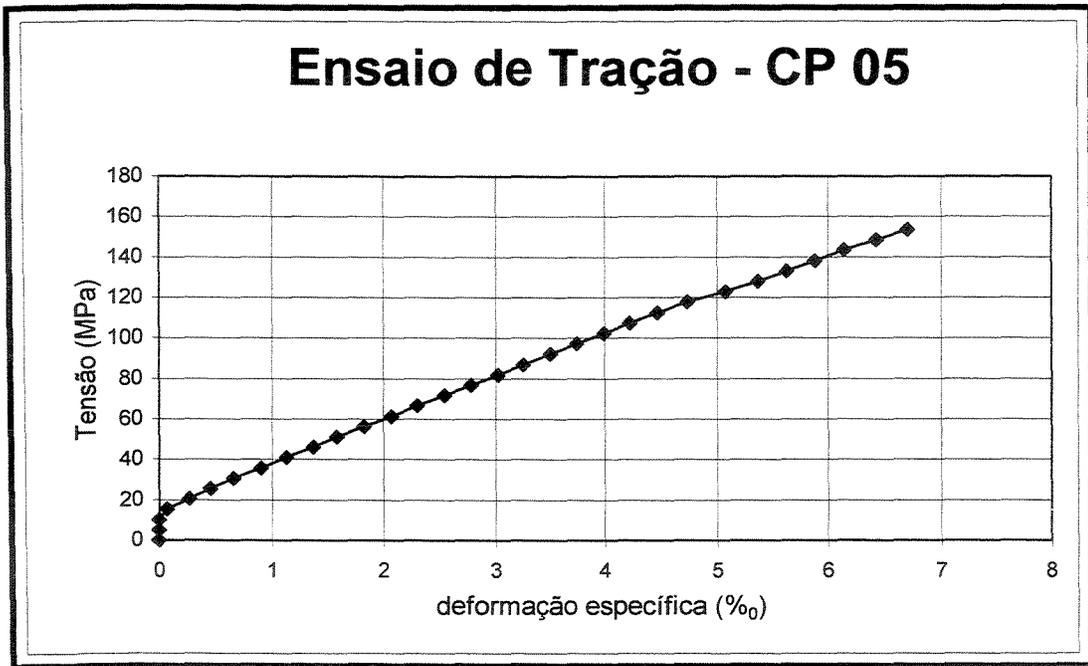


Gráfico 5.1.1.5 – Tensão x Deformação - CP 05

5.1.2 Ensaio de Compressão Paralela às Fibras

Para este ensaio foram realizados 5 corpos-de-prova com a seção transversal de 2 cm^2 em média e comprimento médio de 7 cm. A tensão de ruptura foi obtida pela carga aplicada dividida pela área da seção transversal do corpo-de-prova. Os CPs romperam na direção axial (figura 5.1.2.1).

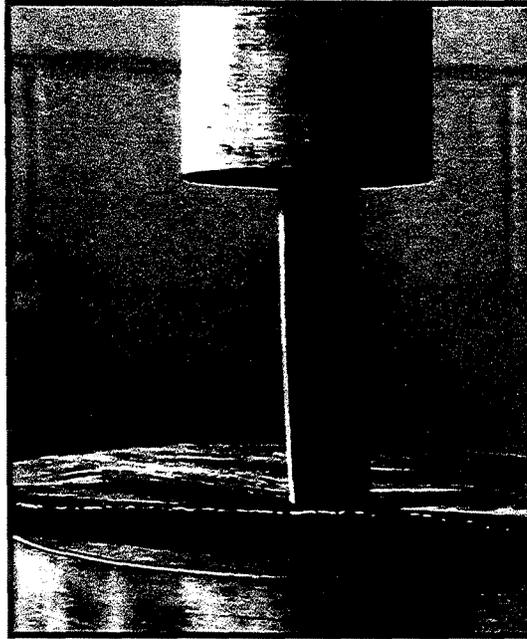


Figura 5.1.2.1 – Detalhe da ruptura do CP de bambu à compressão

Na tabela 5.1.2.1 são apresentadas as dimensões dos cinco corpos-de-prova ensaiados, a umidade no momento do ensaio, além dos valores da carga de ruptura para cada CP e sua correspondente tensão de ruptura à compressão paralela. O valor utilizado para o cálculo das vigas foi o valor médio de tensão de ruptura, também apresentado na tabela.

Tabela 5.1.2.1 – Características físicas e mecânicas dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela

CP	ÁREA (mm ²)	COMP. (mm)	RUPTURA(kN)	σ_{rup} (MPa)	U (%)
1	136,09	67,61	10,532	77,39	14,44
2	118,12	65,03	9,130	77,30	13,66
3	112,25	66,66	8,587	76,50	13,05
4	112,26	71,26	8,804	78,43	13,26
5	123,83	67,14	9,782	79,00	13,28
			Média	77,72	13,54

5.1.3 Ensaio de Variação Dimensional

As tabelas e gráficos a seguir indicam o comportamento dos corpos-de-prova, nas três direções anatômicas (axial, tangencial e radial) e nas três situações descritas anteriormente (seco ao ar, saturado e seco em estufa), com os tratamentos de impermeabilização descritos anteriormente. Foram utilizadas 9 amostras neste ensaio, sendo obtidos os dados percentuais de umidade ao ar, umidade saturada e retração total da espécie de bambu *Dendrocalamus giganteus*.

Na tabela 5.1.3.1 são apresentados os resultados de retração total nas direções axial, tangencial e radial; do teor de umidade saturada e ao ar e da densidade básica ou massa específica da espécie de bambu utilizada nesta pesquisa sem tratamento (in natura). A densidade foi obtida pela divisão da massa seca pelo volume saturado de cada corpo-de-prova (NBR 7190/97).

Tabela 5.1.3.1 – Resultados do ensaio do bambu Gigante natural

DIREÇÃO	RETRAÇÃO TOTAL (%)	UMIDADE SATURADA (%)	UMIDADE AO AR (%)	DENSIDADE BÁSICA (g/cm ³)
AXIAL	1,04	30,00	7,44	0,70
RADIAL	12,84			
TANG	11,60			

Na tabela 5.1.3.2 são apresentados os resultados dos mesmos ensaios relativos ao bambu Gigante, porém com tratamento de impermeabilização de piche e areia.

Tabela 5.1.3.2 – Resultados do ensaio de absorção do bambu Gigante com piche/areia

DIREÇÃO	RETRAÇÃO TOTAL (%)	UMIDADE SATURADA (%)	UMIDADE AO AR (%)	DENSIDADE BÁSICA (g/cm ³)
AXIAL	0,60	24,82	9,00	0,73
RADIAL	5,56			
TANG	6,34			

Por último, tem-se na tabela 5.1.3.3 os resultados obtidos com as amostras de bambu Gigante com o verniz e areia. Os resultados de ambos os tratamentos confirmaram o esperado, a absorção de umidade foi bem menor do que no bambu natural.

Tabela 5.1.3.3 – Resultados do ensaio do bambu gigante com verniz/areia

DIREÇÃO	RETRAÇÃO TOTAL (%)	UMIDADE SATURADA (%)	UMIDADE AO AR (%)	DENSIDADE BÁSICA (g/cm ³)
AXIAL	0,82	25,37	8,45	0,72
RADIAL	7,35			
TANG	8,46			

Com os resultados apresentados anteriormente, pode-se observar, nos gráficos a seguir, que os tratamentos de impermeabilização utilizados neste trabalho tiveram excelente desempenho para evitar absorção de umidade pela espécie de bambu *Dendrocalamus giganteus*.

O gráfico 5.1.3.1 apresenta a retração total nas três direções anatômicas das amostras de bambu Gigante.

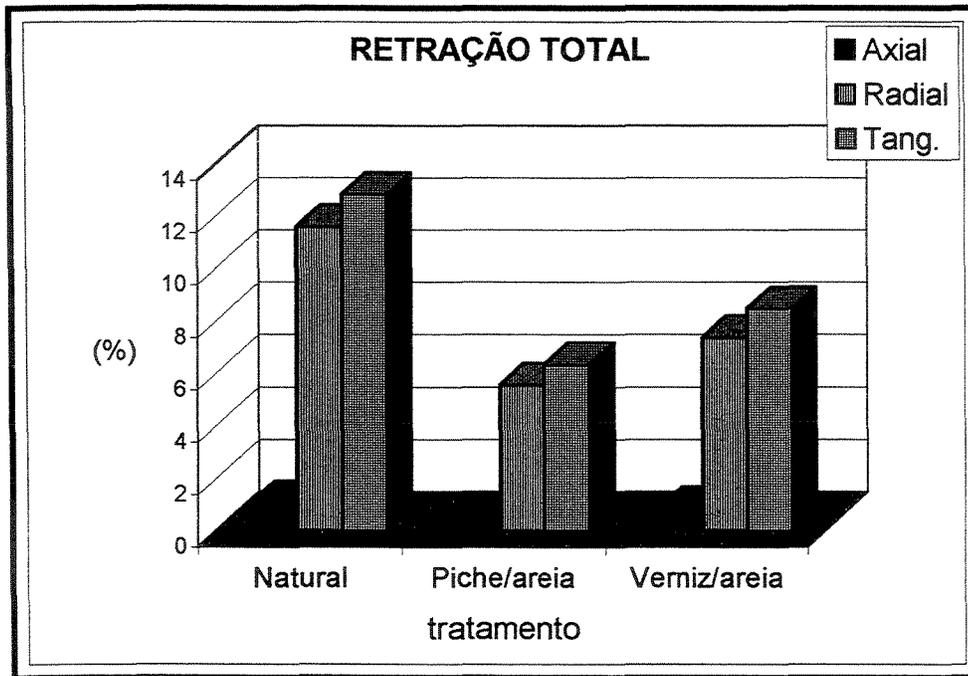


Gráfico 5.1.3.1 – Retração total no bambu Gigante (*D. giganteus*)

Os gráficos 5.1.3.2 e 5.1.3.3 apresentam os resultados em relação à umidade saturada e ao ar da espécie de bambu estudada na condição natural e com tratamentos de impermeabilização utilizados nesta pesquisa. A variação volumétrica foi obtida subtraindo-se o volume de cada corpo de prova saturado com o seco, dividindo-os novamente, pelo volume saturado.

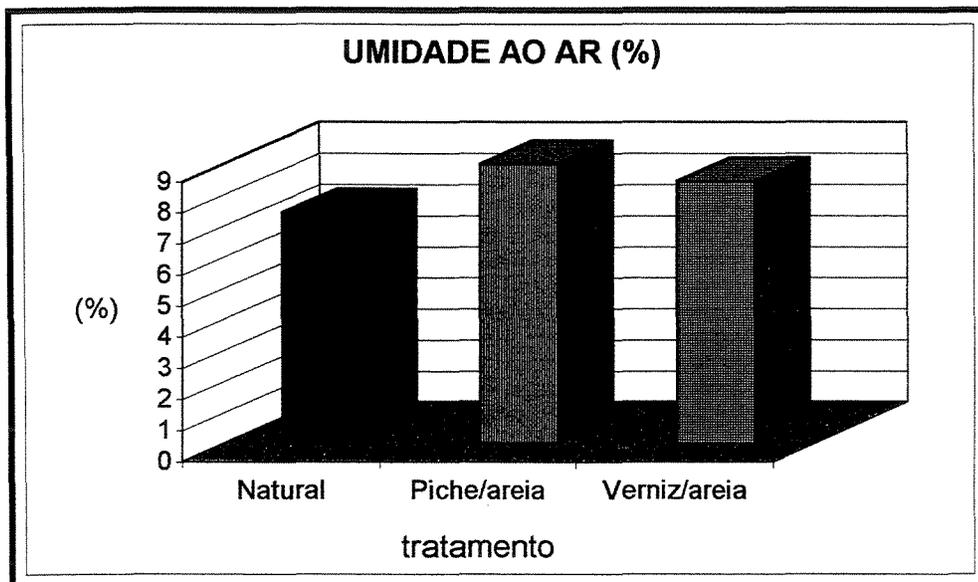


Gráfico 5.1.3.2 – Umidade ao Ar no bambu Gigante (*D. giganteus*)

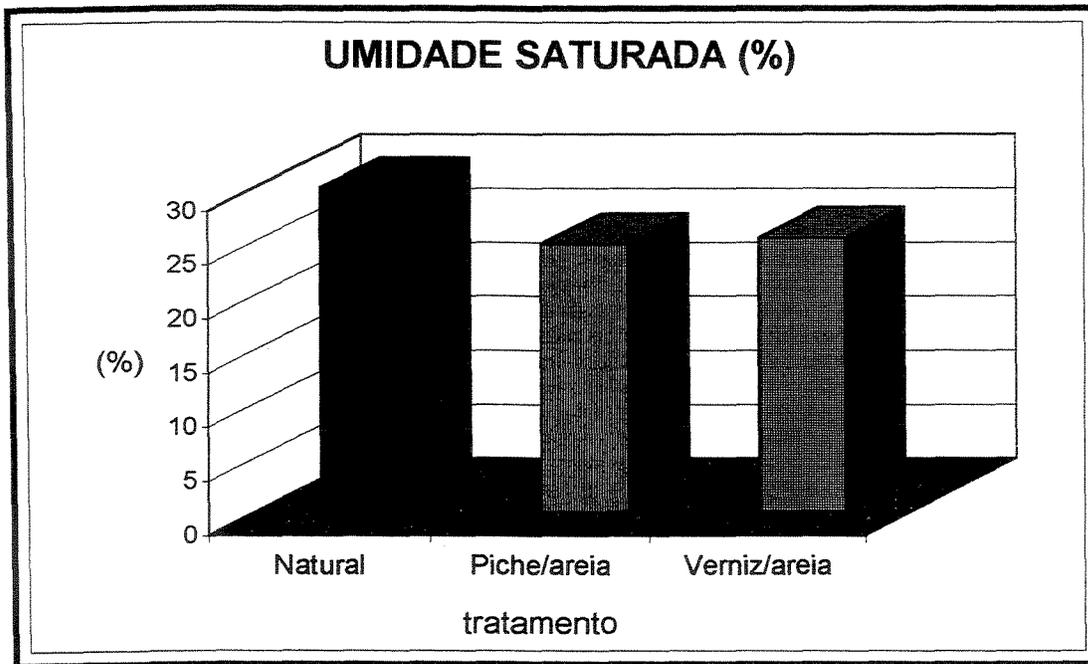


Gráfico 5.1.3.3 – Umidade Saturada no bambu Gigante (*D. giganteus*)

Com estes resultados pode-se observar que a variação volumétrica é considerável nas três direções anatômicas do bambu, sendo necessário impermeabilizar o bambu antes de utilizá-lo como reforço em peças de concreto.

5.1.4 Ensaio de Arrancamento (“Pull-out”)

Os resultados deste ensaio de caracterização foram considerados fundamentais para definição das armaduras de bambu das vigas a serem realizadas. No ensaio de arrancamento foram obtidos resultados dos diferentes métodos de incremento de aderência bambu/concreto utilizados nesta pesquisa, determinando o deslocamento das taliscas de bambu dentro do concreto quando submetidas à tração. Para tanto foram posicionados dois relógios comparadores para medir o deslocamento da talisca de bambu (figura 5.1.4.1). Este ensaio foi importante para identificar qual tratamento de impermeabilização seria mais eficaz para, posteriormente, ser aplicado na armadura de bambu das vigas.

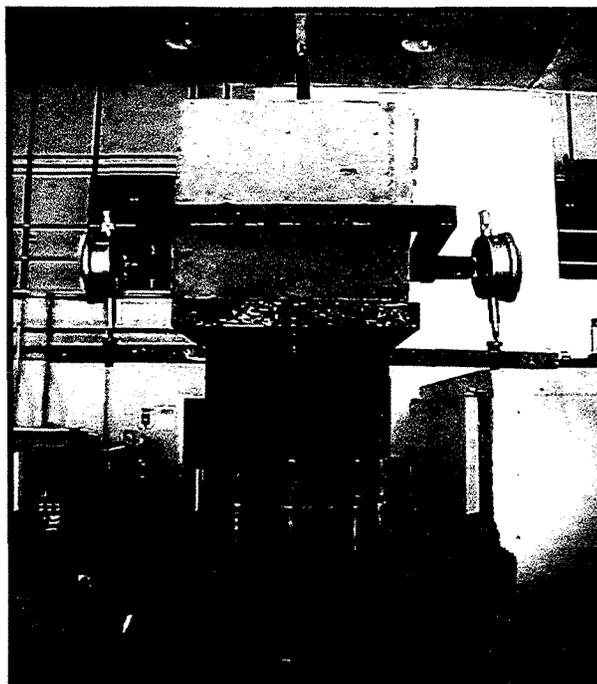


Figura 5.1.4.1 – Detalhe do posicionamento dos relógios no ensaio de arrancamento

Para cada método de incremento (tratamento), foram ensaiados quatro corpos-de-prova. As propriedades mecânicas do concreto utilizado na confecção dos CPs de arrancamento são apresentadas na tabela 5.1.4.1.

As características geométricas dos CPs são apresentados nas tabelas 5.1.4.2 a 5.1.4.4. e os resultados dos ensaios são apresentados no gráfico de tensão x deformação 5.1.4.1

Tabela 5.1.4.1 – Propriedades mecânicas do concreto utilizado no Ensaio de arrancamento

TRATAMENTO	IDADE (dias)	f_c (Mpa)	f_t (Mpa)
S/ TRATAMENTO	14	35,08	2,70
PICHE C/ AREIA	14	37,12	3,04
VERNIZ C/ AREIA	14	32,76	2,67
VERNIZ C/ ARAME	14	35,14	2,99

Tabela 5.1.4.2 – Características geométricas dos CPs de bambu sem tratamento

CP	LARG. (cm)	ESP. (cm)	SEÇÃO (cm ²)	ÁREA DE ADERÊNCIA (cm ²)
1	2,21	1,20	2,65	102,30
2	2,19	1,10	2,41	98,70
3	2,22	0,93	2,06	94,50
4	2,10	0,90	1,89	90,00

Tabela 5.1.4.3 – Características geométricas dos CPs de bambu com piche/areia

CP	LARG. (cm)	ESP. (cm)	SEÇÃO (cm ²)	ÁREA DE ADERÊNCIA (cm ²)
1	2,23	1,32	2,94	106,50
2	2,24	1,25	2,80	104,70
3	2,21	1,38	3,05	107,70
4	2,22	1,30	2,89	105,60

Tabela 5.1.4.4 – Características geométricas dos CPs de bambu com verniz/areia

CP	LARG. (cm)	ESP. (cm)	SEÇÃO (cm ²)	ÁREA DE ADERÊNCIA (cm ²)
1	2,27	1,18	2,68	103,50
2	2,23	1,23	2,74	103,80
3	2,22	1,16	2,58	101,40
4	2,27	1,23	2,79	105,00

Tabela 5.1.4.5 - Características geométricas dos CPs de bambu com verniz/arame

CP	LARG. (cm)	ESP. (cm)	SEÇÃO (cm ²)	ÁREA DE ADERÊNCIA (cm ²)
1	2,19	1,15	2,52	100,20
2	2,03	0,86	2,75	86,70
3	2,14	0,93	1,99	92,10
4	2,10	0,90	1,89	90,00

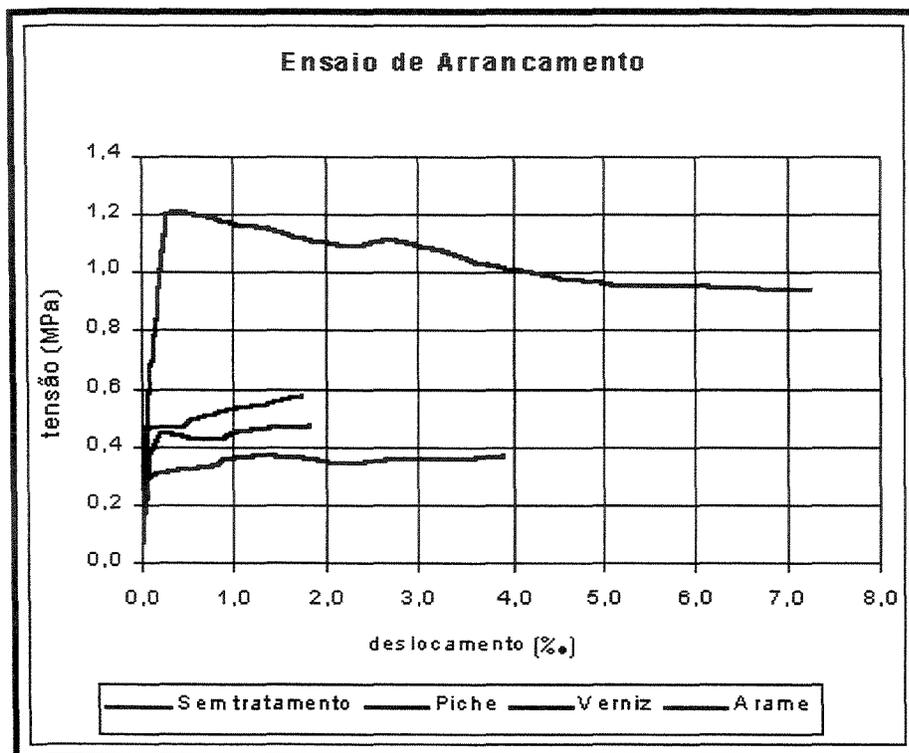


Gráfico 5.1.4.1 – Tensão-deslocamento do ensaio de arrancamento

Analisando-se o gráfico 5.1.4.1, pode-se observar que a tensão suportada pelo bambu com tratamento de verniz e anéis de arame farpado foi superior. Também pode-se observar que o tratamento de piche e areia forneceu resultados inferiores aos do bambu sem tratamento. Isto pode ser atribuído à temperatura elevada do concreto devido às reações exotérmicas que ocorrem durante sua cura, alterando a viscosidade do piche, causando o deslizamento da talisca de bambu dentro do concreto.

5.2 Dimensionamento à flexão, teórico, para vigas armadas com bambu

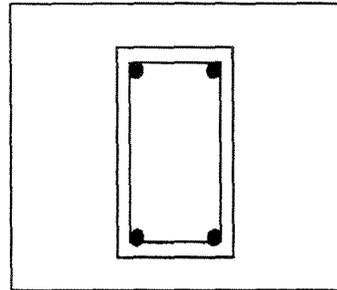
O dimensionamento proposto foi feito considerando-se o concreto no Estádio II. Os cálculos foram feitos em função da geometria da seção, da taxa de armadura e da característica do carregamento. Todos os valores característicos do aço, do concreto e do bambu foram obtidos dos ensaios de caracterização dos respectivos materiais.

A seguir, são apresentados os cálculos de verificação da máxima carga que pode ser aplicada para cada uma das vigas previstas.

5.2.1 VIGA 1 (TESTEMUNHO)

Seção transversal: 15x20 cm

Aço CA-60: $f_y = 736,8 \text{ MPa}$
 $E_s = 209.400 \text{ MPa}$
 $\epsilon_y = 0,0055$



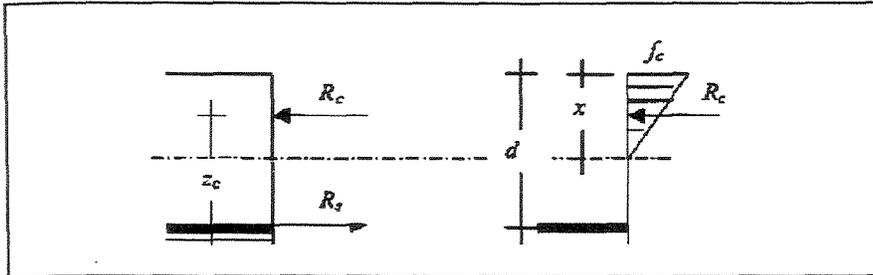
Concreto: $f_c = 20,6 \text{ MPa}$

Armadura: 4 barras de aço de $\theta 5 \text{ mm} \rightarrow A_s = 0,4 \text{ cm}^2$

Estribo: 4,2 mm

$d = 20 - 1,5 - 0,42 - 0,25 = 17,83 \text{ cm}$

Para V1, tem-se o seguinte sistema de equações:



$$R_C - R_S = 0 \text{ (I)}$$

$$R_C = (b_w \cdot x \cdot f_c) / 2$$

$$R_C \cdot Z_C = R_S \cdot Z_C = M_r \text{ (II)}$$

$$R_S = A_s \cdot \sigma_s$$

$$Z_C = d - (1/3)x$$

$$\text{(I): } (b_w \cdot x \cdot f_c) / 2 = A_s \cdot \sigma_s$$

$$x = (2 \cdot A_s \cdot \sigma_s) / (b_w \cdot f_c)$$

Cálculo no Estádio II do concreto:

Hipótese: Ruptura no início do escoamento da armadura de aço

$$\epsilon_c \leq 0,0035$$

Adotando:

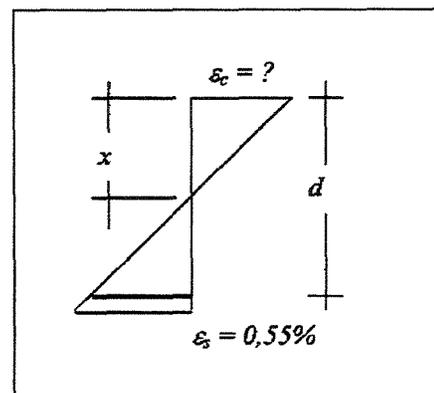
$$\sigma_s = f_y = 736,8 \text{ MPa (tensão de escoamento)}$$

$$\epsilon_s = \epsilon_y = 0,0055$$

Tem-se que:

$$x = (2 \cdot A_s \cdot \sigma_s) / (b_w \cdot f_c)$$

$$x = (2 \cdot 0,4 \cdot 736,8) / (15 \cdot 20,6) = 1,91 \text{ cm}$$



Verificação:

$$(\epsilon_c / 1,73) = (0,0055 / 17,83 - 1,73)$$

$$\epsilon_c = 0,00034 < 0,0035$$

Momento Resistente (M_r)

$$(II) M_r = R_c \cdot Z_c = ((15 \cdot 1,91 \cdot 206) / 2) \cdot (17,83 - 1,91 / 3) = 50,75 \text{ kN/cm}$$

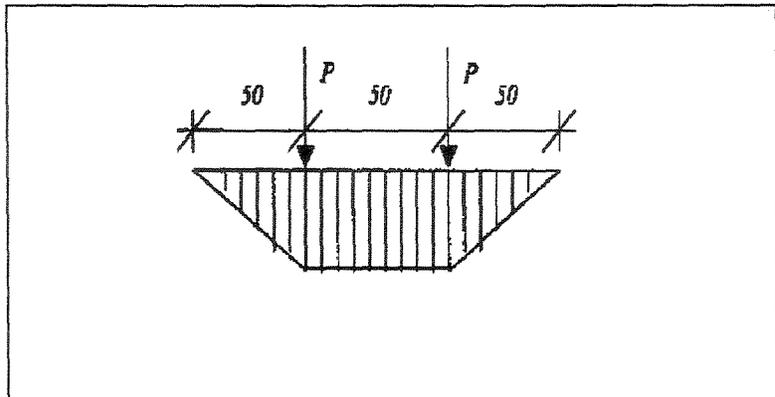
Momento máximo ($M_{m\acute{a}x}$)

$$M_{m\acute{a}x} = 50 \cdot P$$

$$50,75 = 50 \cdot P$$

$$P = 10,15 \text{ kN}$$

$$F = 2P = 20,3 \text{ kN}$$



5.2.2 Viga 2, 3, 5 e 6 – Bambu como armadura longitudinal

Seção transversal: 15x20 cm

Aço CA-60: $f_y = 736,8 \text{ MPa}$

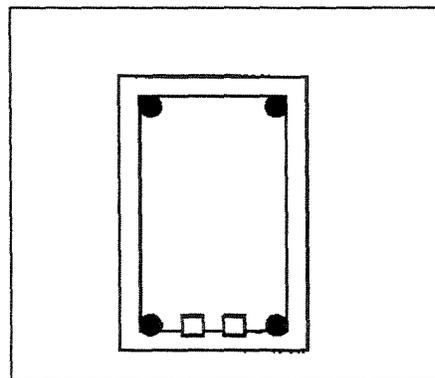
$E_s = 209400 \text{ MPa}$

$\epsilon_y = 0,0055$

*Bambu: $f_B = 188,7 \text{ MPa}$ (ruptura)

$E_B = 22195 \text{ kN/c m}^2$

$\epsilon_B = 0,0085$



Concreto: $f_c = 20,6 \text{ MPa}$

Armadura: Aço: 4 barras de $\theta 5 \text{ mm} \rightarrow A_s = 0,4 \text{ cm}^2$

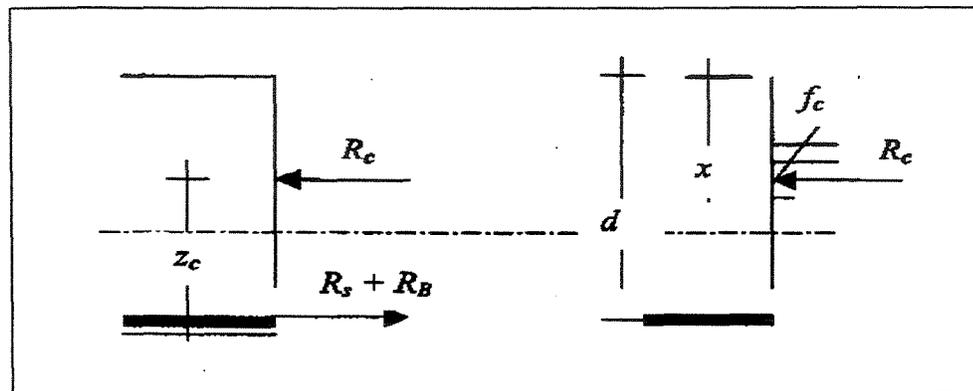
Bambu: 2 taliscas de $2 \text{ cm}^2 \rightarrow A_B = 4,0 \text{ cm}^2$

Estribo: 4,2 mm

$d = 20 - 1,5 - 0,42 - 0,25 = 17,83 \text{ cm}$

*Valores obtidos do Ensaio de Tração do bambu

Para V2, tem-se o seguinte sistema de equações:



$$R_C - (R_S + R_B) = 0 \text{ (I)}$$

$$R_C \cdot Z_C = (R_S + R_B) \cdot Z_C = M_r \text{ (II)}$$

$$Z_C = d - (1/3)x$$

$$R_C = (b_w \cdot x \cdot f_c) / 2$$

$$R_S = A_s \cdot \sigma_s$$

$$R_B = A_B \cdot \sigma_B$$

$$\text{(I): } (b_w \cdot x \cdot f_c) / 2 = A_s \cdot \sigma_s$$

$$x = (2 \cdot A_s \cdot \sigma_s) / (b_w \cdot f_c)$$

$$\text{(I): } (b_w \cdot x \cdot f_c) / 2 = A_s \cdot \sigma_s + A_B \cdot \sigma_B$$

$$x = (2 \cdot A_s \cdot \sigma_s + A_B \cdot \sigma_B) / (b_w \cdot f_c)$$

Cálculo no Estádio II do Concreto:

Hipótese: Ruptura no início do escoamento da armadura de aço

$$\varepsilon_c \leq 0,0035$$

Adotando:

$$\sigma_s = f_y = 736,8 \text{ MPa (tensão de escoamento)}$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_y = 0,0055$$

*Supondo que o aço e o bambu terão a mesma deformação pois estarão trabalhando juntos, temos neste momento:

$$\varepsilon_B = \varepsilon_y = 0,0055$$

$$\sigma_B = E_B \cdot \varepsilon_B = 221.950 \cdot 0,0055 = 122,1 \text{ MPa}$$

Tem-se que:

$$x = 2 (A_s \cdot \sigma_s + A_B \cdot \sigma_B) / (b_w \cdot f_c)$$

$$x = 2 (0,4 \cdot 736,8 + 4,0 \cdot 122,1) / (15 \cdot 206) = 5,07 \text{ cm}$$

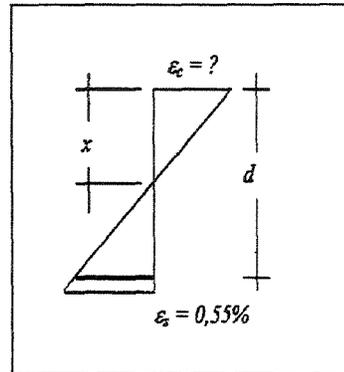
Verificação:

$$(\varepsilon_c / 5,07) = (0,0055 / 17,83 - 5,07)$$

$$\varepsilon_c = 0,00043 < 0,0035$$

Momento Resistente (M_r)

$$(II) M_r = R_c \cdot Z_c = ((15 \cdot 5,07 \cdot 206) / 2) \cdot (17,83 - 5,07 / 3) = 1264,27 \text{ kN/cm}$$



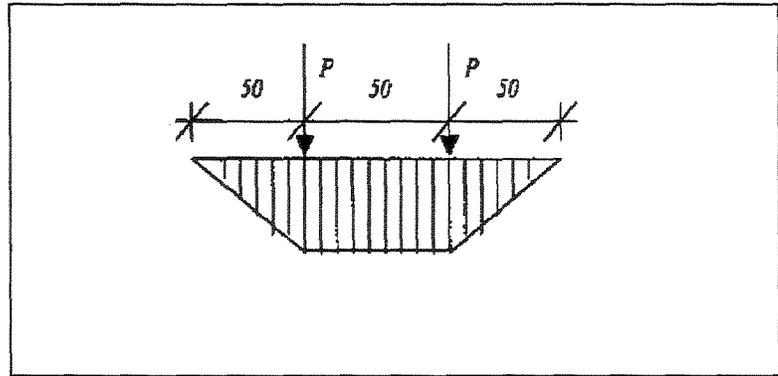
Momento Máximo ($M_{m\acute{a}x}$)

$$M_{m\acute{a}x} = 50 \cdot P$$

$$1264,27 = 50 \cdot P$$

$$P = 25,30 \text{ kN}$$

$$F = 2P = 50,60 \text{ kN}$$



5.2.3 Viga 4 (armadura longitudinal dupla de bambu)

Seção transversal: 15x20 cm

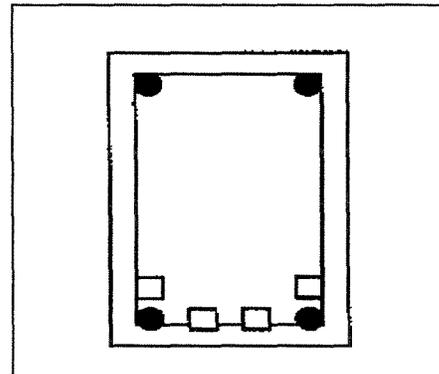
Aço CA-60: $f_y = 736,8 \text{ MPa}$
 $E_s = 209.400 \text{ MPa}$

$$\epsilon_y = 0,0055$$

*Bambu: $f_B = 188,7 \text{ MPa (ruptura)}$
 $E_B = 22.195 \text{ MPa}$

$$\epsilon_B = 0,0085$$

Concreto: $f_c = 20,6 \text{ MPa}$



Armadura: Aço: 4 barras de $\theta 5 \text{ mm} \rightarrow A_s = 0,4 \text{ cm}^2$

Bambu: 2 taliscas de $2 \text{ cm}^2 \rightarrow A_B = 4,0 \text{ cm}^2$

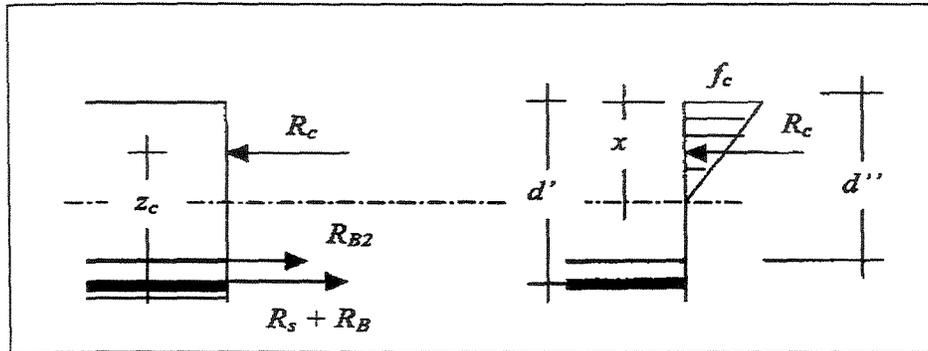
Segunda camada de bambu: 2 taliscas de $2 \text{ cm}^2 \rightarrow A_{B2} = 4,0 \text{ cm}^2$

Estribo: 4,2 mm

$$d' = 20 - 1,5 - 0,42 - 0,25 = 17,83 \text{ cm}$$

$$d'' = d' - 5,0 = 12,83 \text{ cm}$$

Para V3 e V4, tem-se o seguinte sistema de equações:



$$R_C = (R_S + R_B + R_{B2}) = (I)$$

$$R_C = (b_w \cdot x \cdot f_c) / 2$$

$$(R_S + R_B) \cdot Z_C + R_{B2} (Z_C - 5) = M_r \text{ (II)}$$

$$R_S = A_s \cdot \sigma_s$$

$$Z_C = d - (1/3)x$$

$$R_B = A_B \cdot \sigma_B$$

$$(I): (b_w \cdot x \cdot f_c) / 2 = A_s \cdot \sigma_s$$

$$x = (2 \cdot A_s \cdot \sigma_s) / (b_w \cdot f_c)$$

$$(I): (b_w \cdot x \cdot f_c) / 2 = A_s \cdot \sigma_s + A_B \cdot \sigma_B + A_{B2} \cdot \sigma_{B2}$$

$$x = 2 (A_s \cdot \sigma_s + A_B \cdot \sigma_B + A_{B2} \cdot \sigma_{B2}) / (b_w \cdot f_c)$$

Cálculo no Estádio II do Concreto:

Hipótese: Ruptura no início do escoamento da armadura de aço

$$\epsilon_c \leq 0,0035$$

Adotando:

$$\sigma_s = f_y = 736,8 \text{ MPa (tensão de escoamento)}$$

$$\epsilon_s = \epsilon_y = 0,0055$$

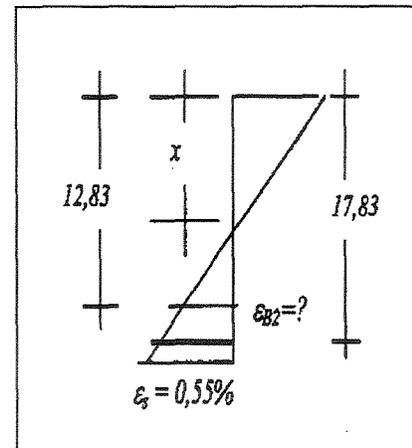
*Supondo que o aço e o bambu terão a mesma deformação pois estarão trabalhando juntos, tem-se neste momento:

$$\epsilon_B = \epsilon_y = 0,0055$$

$$\sigma_B = E_B \cdot \epsilon_B = 221.950 \cdot 0,0055 = 122,1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{B2} = E_B \cdot \epsilon_{B2}$$

$$\epsilon_{B2} = 0,0055 (12,83 - x) / (17,83 - x)$$



Tem-se que:

$$x = 2 (A_s \cdot \sigma_s + A_B \cdot \sigma_B + A_{B2} \cdot \sigma_{B2}) / (b_w \cdot f_c)$$

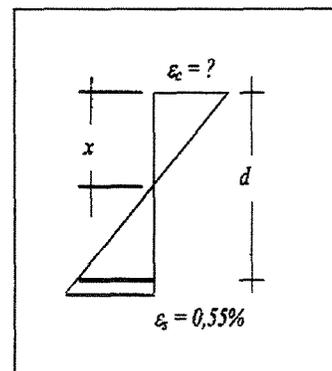
$$x = 2 (0,4 \cdot 7368 + 4,0 \cdot 1221 + 4,0 \cdot 221950 (0,0055 (12,83 - x) / (17,83 - x))) / (15 \cdot 206) = 6,80 \text{ cm}$$

Verificação:

$$(\epsilon_c / 5,47) = (0,0055 / 17,83 - 5,47)$$

$$\epsilon_c = 0,0030 < 0,0035$$

Portanto, a hipótese está satisfeita



Momento Resistente (M_r)

$$(II) M_r = (R_s + R_B) \cdot Z_C + R_{B2} (Z_C - 5)$$

$$M_r = (0,4 \cdot 7368 + 4 \cdot 1221) \cdot (17,83 - 6,8/3) + 4 \cdot 221950 \cdot 0,0033((17,83 - 6,8/3) - 5)$$

$$M_r = 1532 \text{ kN/cm}$$

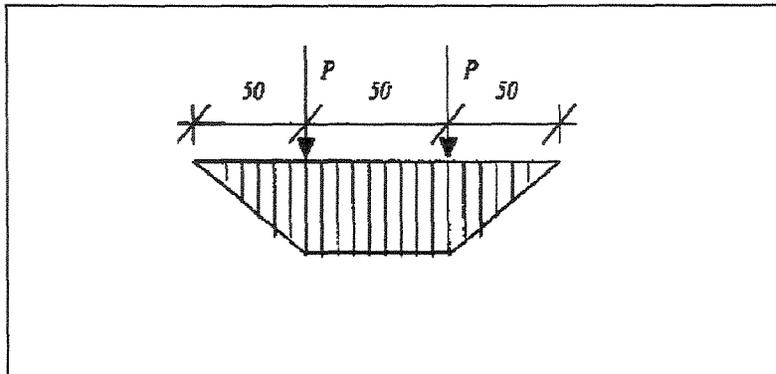
Momento Máximo ($M_{\text{máx}}$)

$$M_{\text{máx}} = 50 \cdot P$$

$$1532 = 50 \cdot P$$

$$P = 30,64 \text{ kN}$$

$$F = 2P = 61,30 \text{ kN}$$



5.3 Ensaio à Flexão das Vigas Armadas com Bambu

Na tabela 5.3.1 são apresentados, para cada viga ensaiada, alguns valores que retratam o comportamento das mesmas até o momento do início do escoamento da armadura longitudinal de aço, de acordo com as hipóteses de cálculo estrutural adotadas.

Tabela 5.3.1 – Resultados obtidos para as vigas ensaiadas

VIGA	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Taxa de armadura (%)	0,13	1,47	1,47	2,80	1,40	1,40
Carga última, teórica (kN) – [I]	20,3	50,60	50,60	61,30	50,60	50,60
Carga última (kN) – [II]	17,7	38,00	40,40	60,00	_____	_____
Carga ruptura (kN) – [III]	18,7	42,30	40,75	74,40	26,40	30,40
Relação – [II] / [I]	0,87	0,76	0,80	0,98	_____	_____
Relação – [III] / [I]	0,92	0,83	0,80	1,21	0,52	0,60
ϵ_C última (‰)	0,22	0,98	0,97	0,96	0,48	0,55
ϵ_S última (‰)	5,5	5,5	5,5	5,5	3,04	2,93
ϵ_B última (‰)	_____	4,58	4,92	5,23	2,95	5,52
Desl. vertical último (mm)	6,5	10,20	8,50	13,50	_____	_____
Desl. vertical máximo (mm)	_____	13,60	_____	20,70	7,00	8,50
Ruptura teórica	escoamento	escoamento	escoamento	escoamento	escoamento	escoamento
Ruptura experimental	escoamento	escoamento	escoamento	escoamento	fendilhamento	fendilhamento

A evolução das tensões na armadura longitudinal, tanto para o aço como para o bambu, estão representadas nos gráficos seguintes. Os extensômetros foram colados em pontos pré-determinados como estão representados nas figuras do capítulo 3. Portanto, os extensômetros foram colados tanto na armadura de aço como na armadura de bambu. Estes foram posicionados no meio e quartos dos vãos das vigas, e distribuídos à esquerda e direita da seção transversal das mesmas.

5.3.1 Viga 1

A viga 1 foi realizada apenas com armadura de aço para seus resultados serem utilizados como parâmetros em relação às vigas armadas com bambu. A figura 5.3.1.1 mostra o aspecto da Viga 1 após sua ruptura por escoamento da armadura.

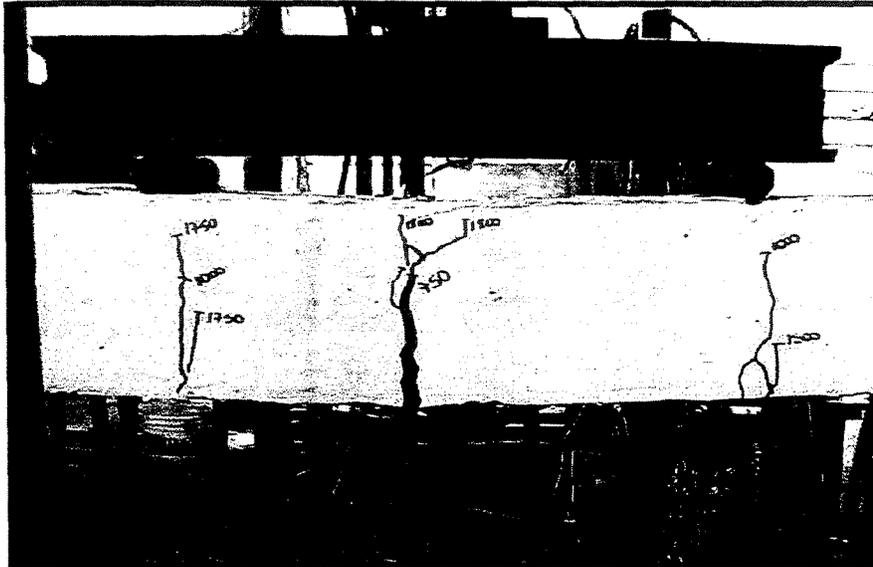


Figura 5.3.1.1 – Detalhe da ruptura da Viga 1

O gráfico 5.3.1.1 apresenta as deformações no meio e nos quartos do vão na armadura da Viga 1

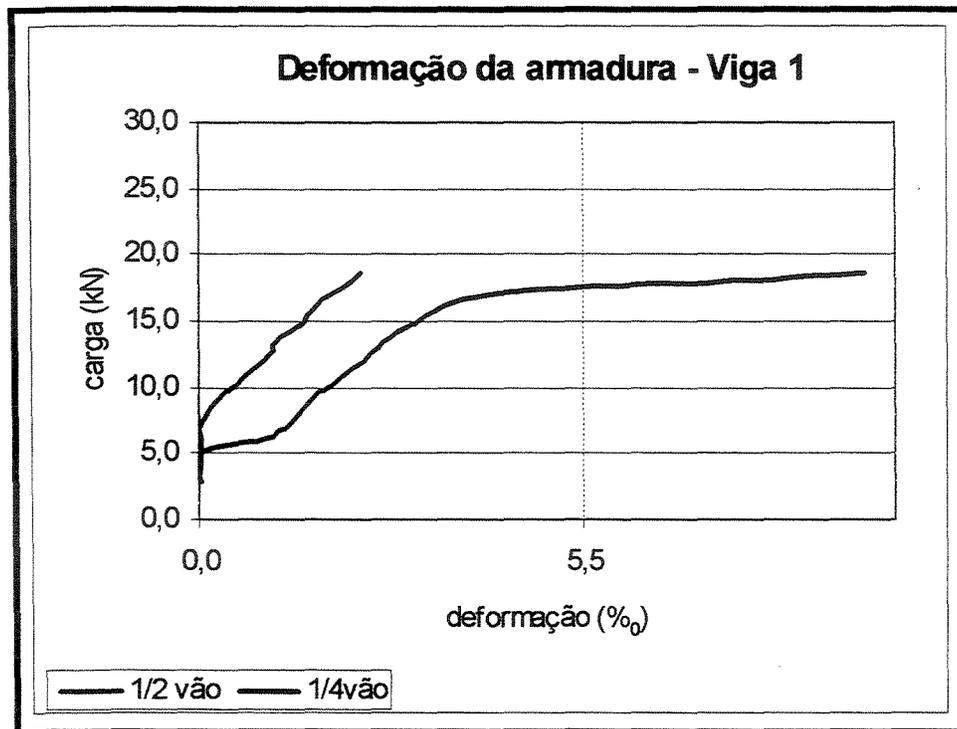


Gráfico 5.3.1.1 – Deformação na armadura de aço da Viga 1

5.3.2 Viga 2

Na Viga 2 foi utilizada a armadura de bambu natural, isto é, sem tratamento de impermeabilização, como explica o capítulo 3. As figuras 5.3.2.1 e 5.3.2.2 apresentam as fissuras e a ruptura do concreto da Viga 2 antes do escoamento das armaduras de aço e de bambu, respectivamente.

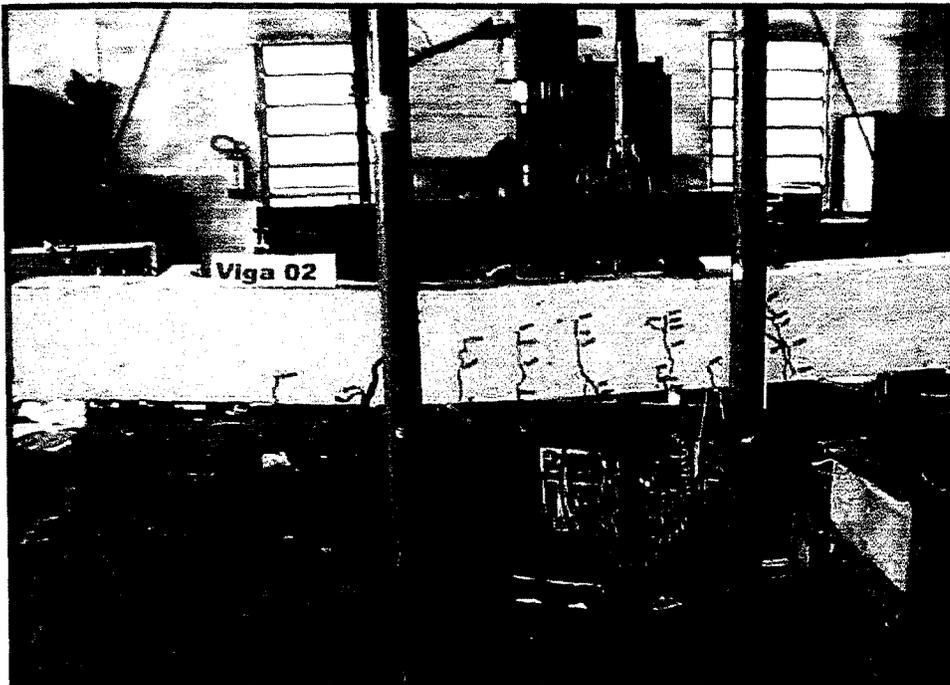


Figura 5.3.2.1 – Fissuras na viga 2 durante o ensaio à flexão

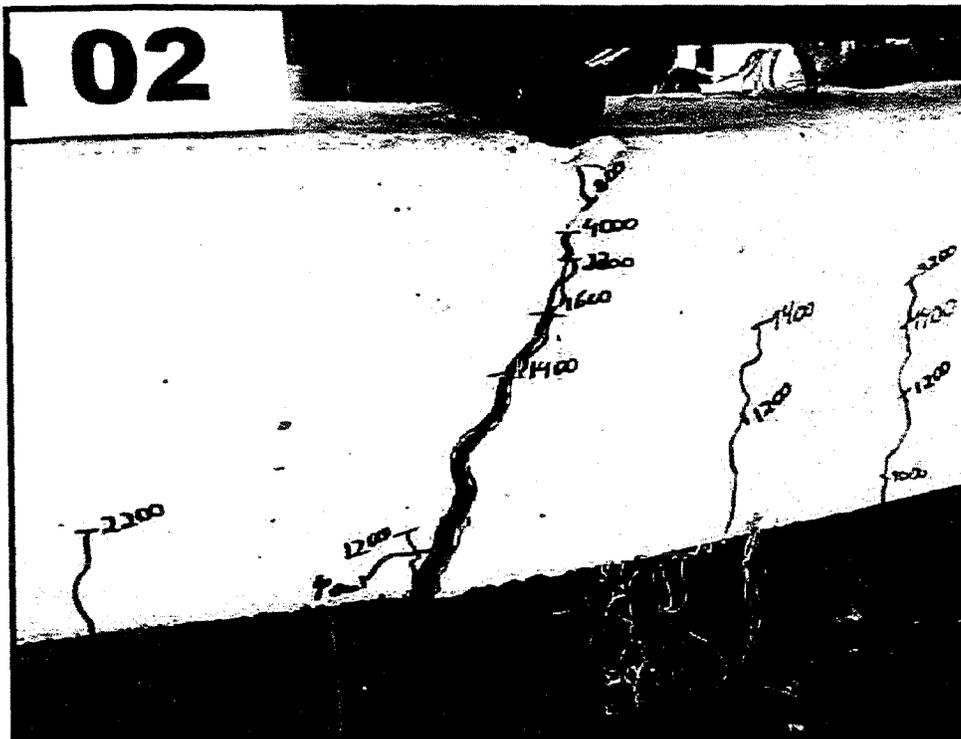


Figura 5.3.2.2 – Detalhe da ruptura do concreto da viga 2 no ensaio à flexão

Os gráficos 5.3.2.1 a 5.3.2.4 representam as tensões e deformações na armadura da Viga 2.

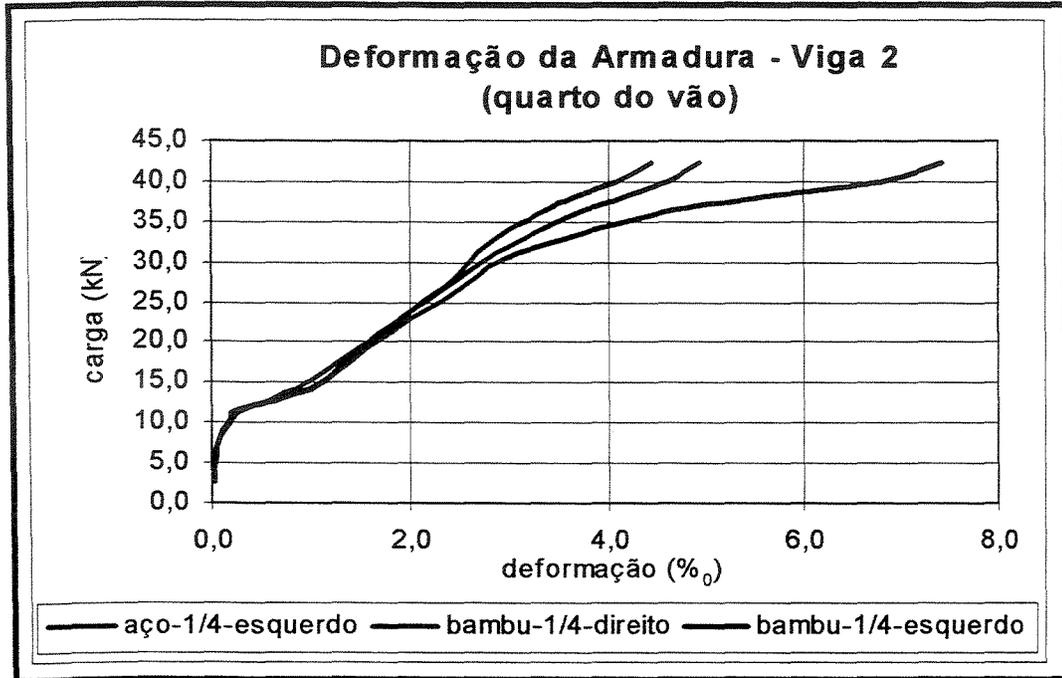


Gráfico 5.3.2.1 – Deformação da armadura da viga 2 no quarto do vão

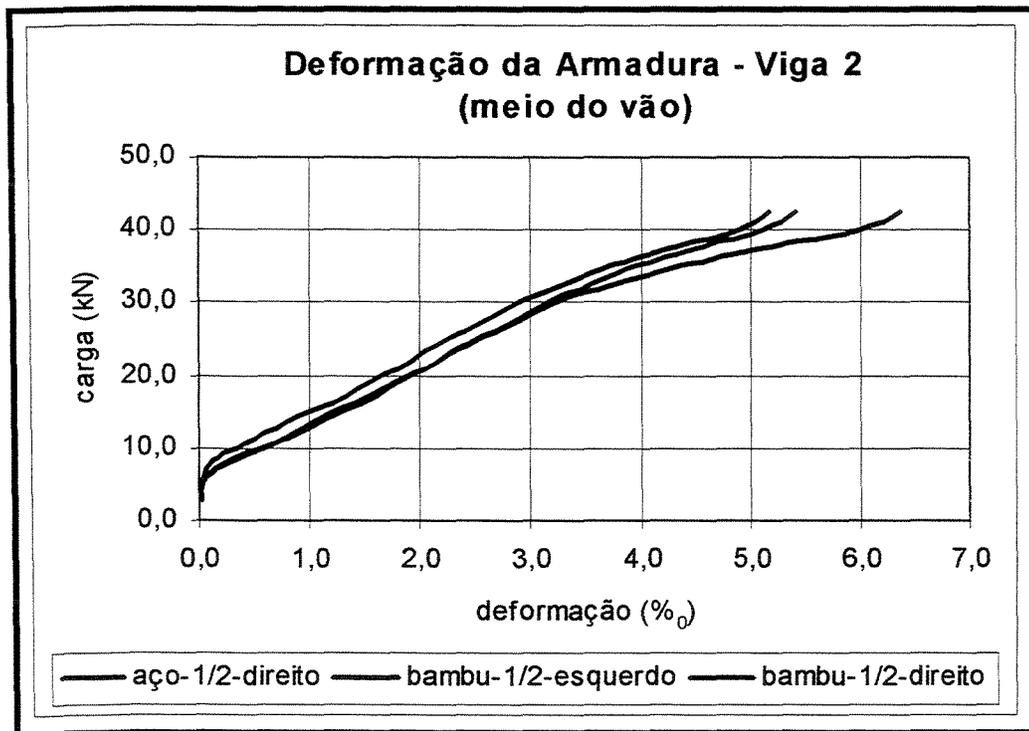


Gráfico 5.3.2.2 – Deformação da armadura da viga 2 no meio do vão

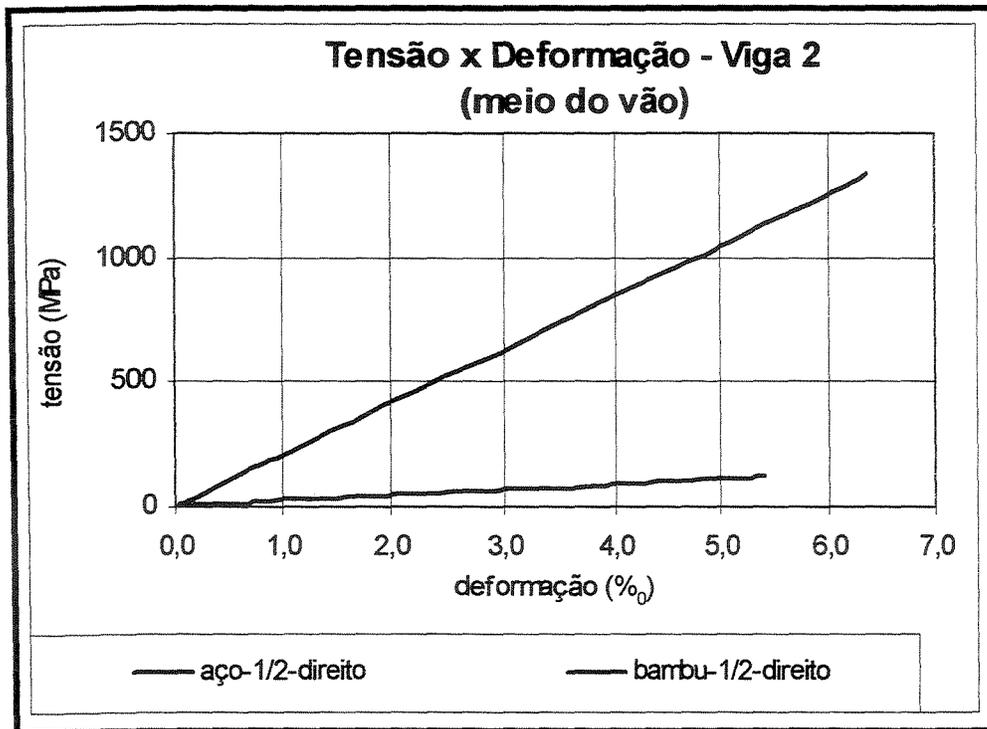


Gráfico 5.3.2.3 – Tensão x Deformação da armadura da viga 2 no meio do vão

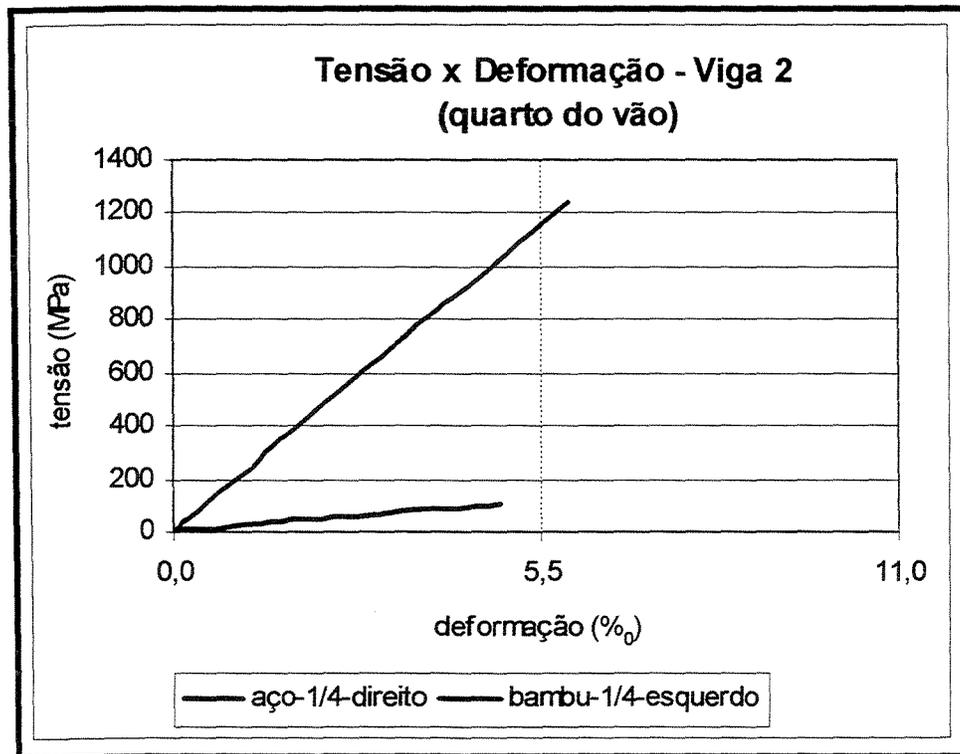


Gráfico 5.3.2.4 – Tensão x Deformação no quarto do vão da viga 2

5.3.3 Viga 3

A Viga 3 recebeu a mesma armadura da Viga anterior, entretanto esta recebeu um tratamento de impermeabilização e aumento de aderência de verniz e anéis de arame farpado escolhido devido os resultados do ensaio de arrancamento. A figura 5.3.3.1 caracteriza a ação do incremento de aderência utilizado, pois o número de fissuras aumentaram durante o carregamento e ruptura desta viga.



Figura 5.3.3.1 – Detalhe das fissuras da Viga 3 durante seu carregamento

Os gráficos 5.3.3.1 a 5.3.3.4 demonstram as deformações que ocorreram nas armaduras de aço e de bambu durante a aplicação de carga na mesma.

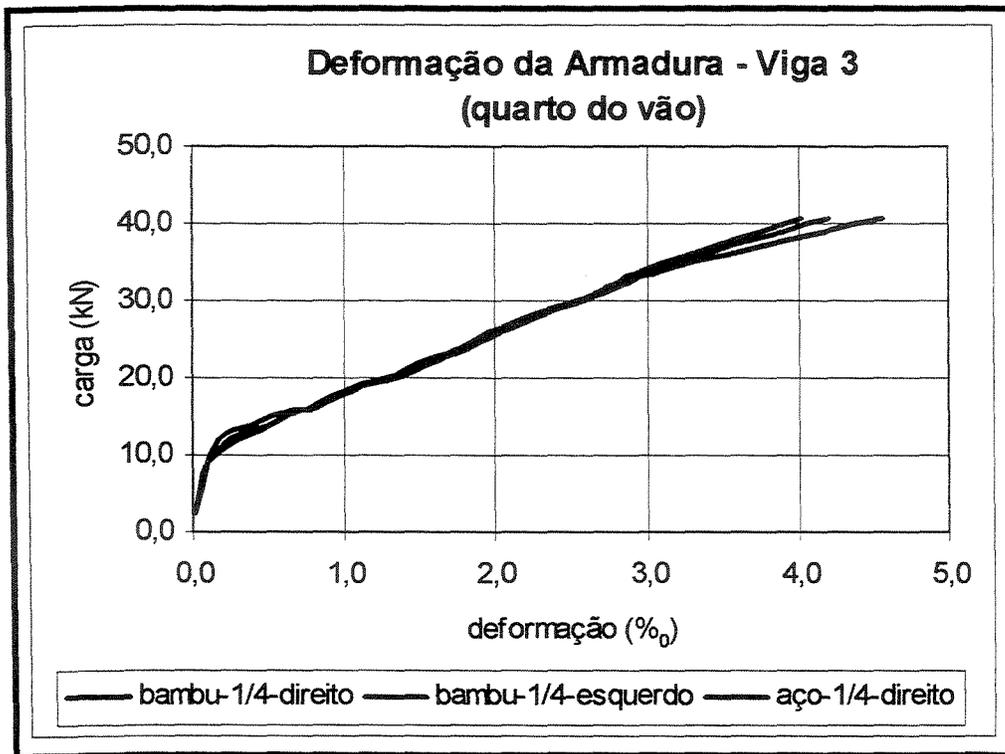


Gráfico 5.3.3.1 – Deformação da armadura da viga 3 no quarto do vão direito

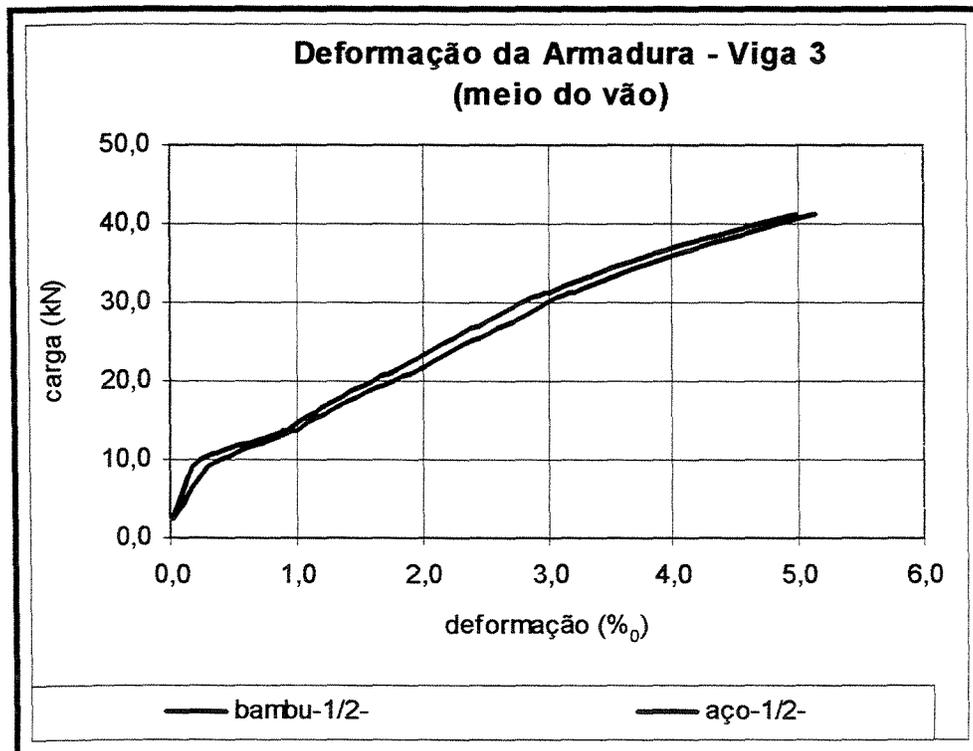


Gráfico 5.3.3.2 – Deformação da armadura da viga 3 no meio do vão

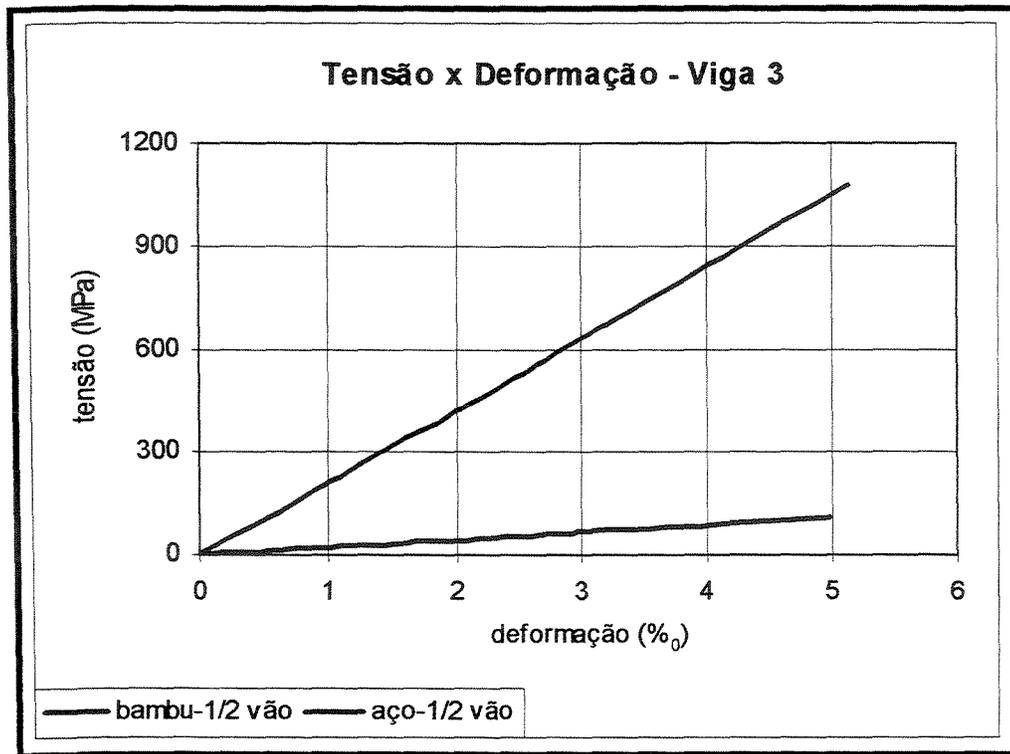


Gráfico 5.3.3.3 – Tensão x Deformação da armadura da viga 3 no meio do vão

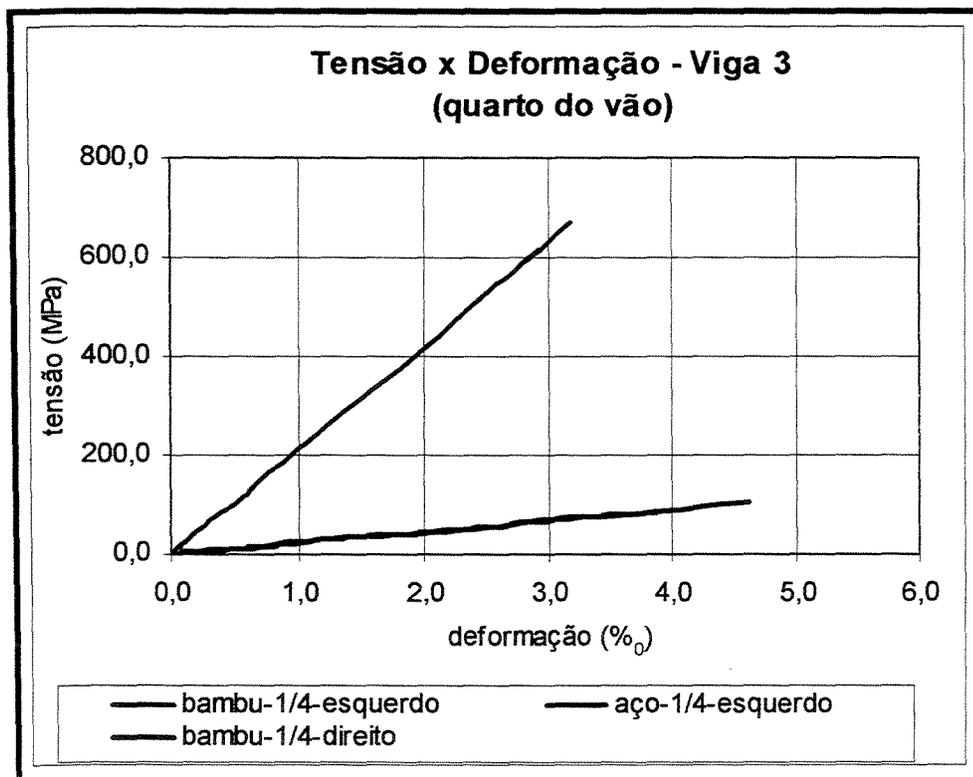


Gráfico 5.3.3.4 – Tensão x Deformação da viga 3 no quarto do vão

5.3.4 Viga 4

A armadura de bambu da Viga 4 era composta por duas camadas de taliscas de bambu, com espaçamento de 5 cm entre elas. A Viga 4 também recebeu tratamento de impermeabilização de verniz e arame farpado. Na figura 5.3.4.1 está exemplificado o posicionamento da Viga 4 no pórtico. Pela figura 5.3.4.2 conclui-se que a segunda camada de bambu aumentou consideravelmente a tensão de ruptura desta viga, havendo a ruptura do concreto no ponto de aplicação de carga.

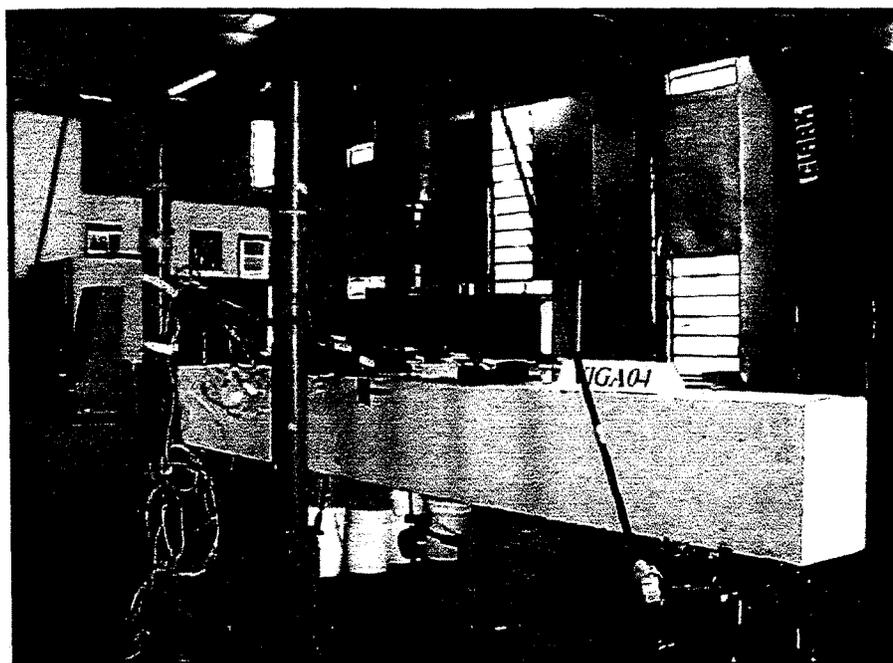


Figura 5.3.4.1 – Posicionamento da viga 4 no pórtico

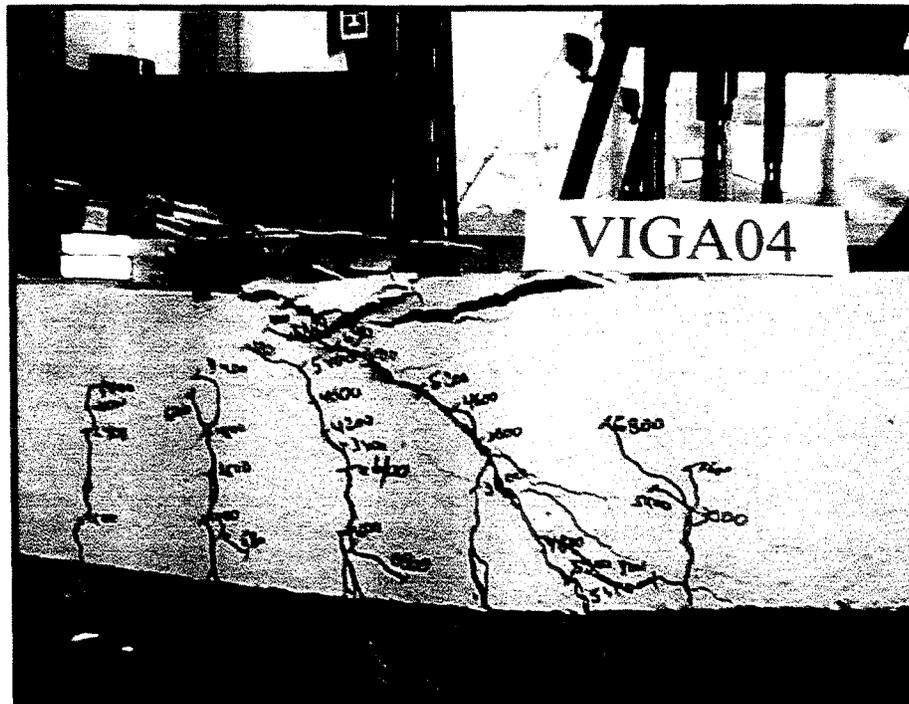


Figura 5.3.4.2 – Detalhe da ruptura do concreto no ponto de aplicação de carga da viga 4

A seguir são apresentadas as tensões e deformações da armadura da viga 4 nos gráficos 5.3.4.1 a 5.3.4.4.

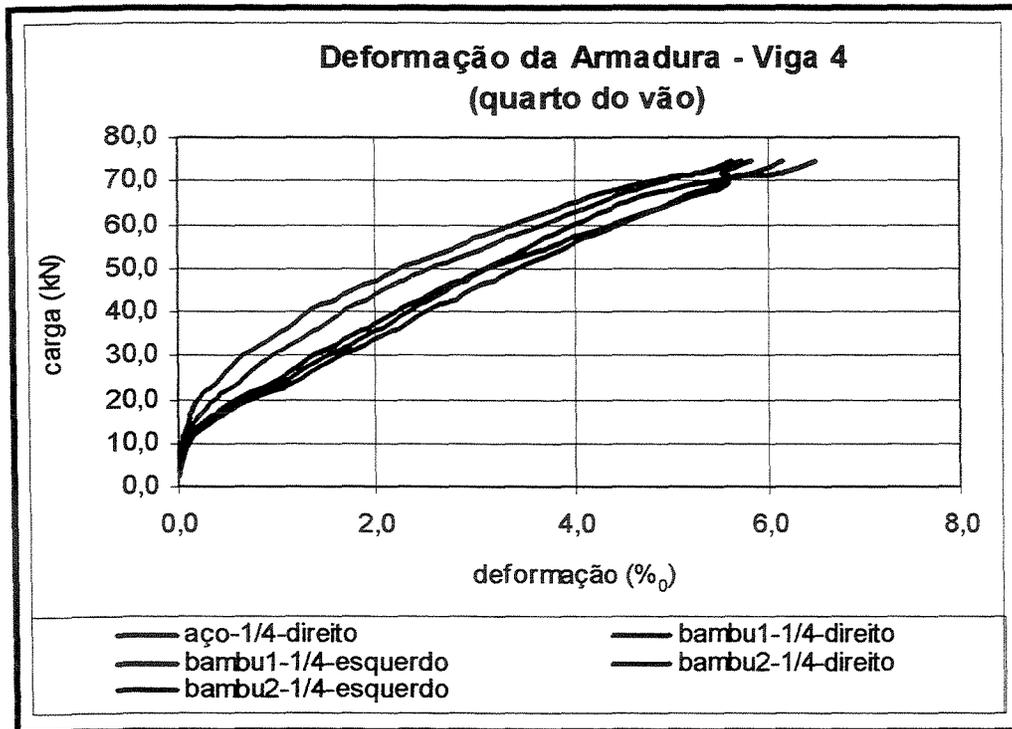


Gráfico 5.3.4.1 – Deformação da armadura da viga 4 no quarto do vão direito

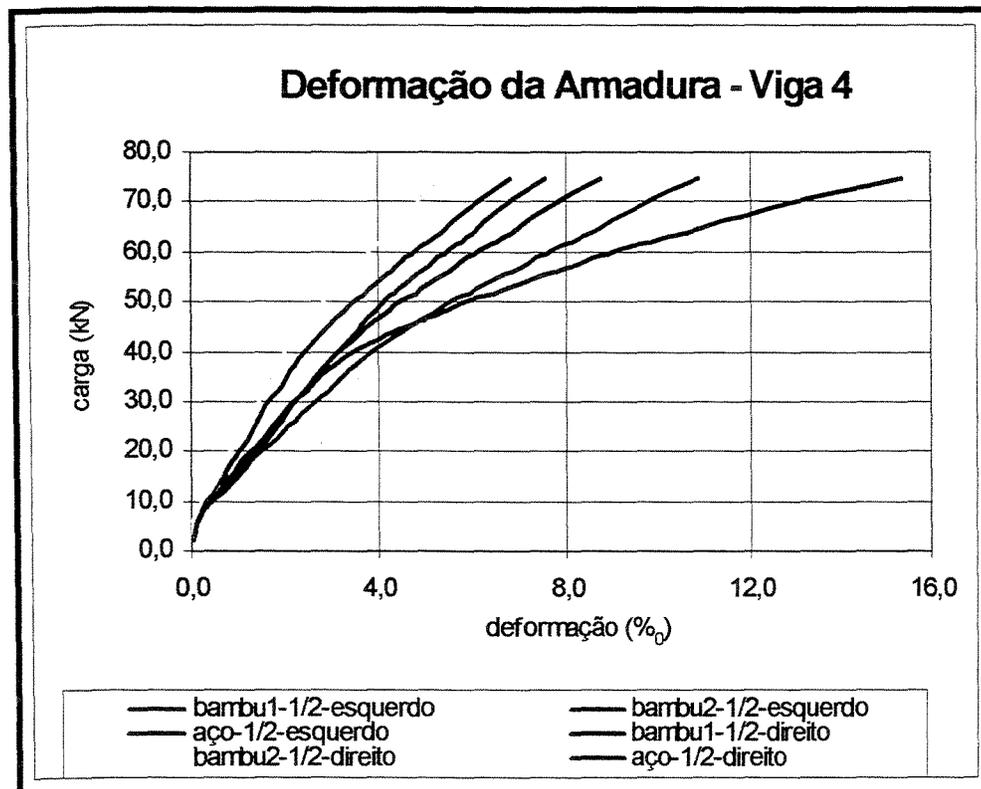


Gráfico 5.3.4.2 – Deformação da armadura da viga 4 no meio do vão

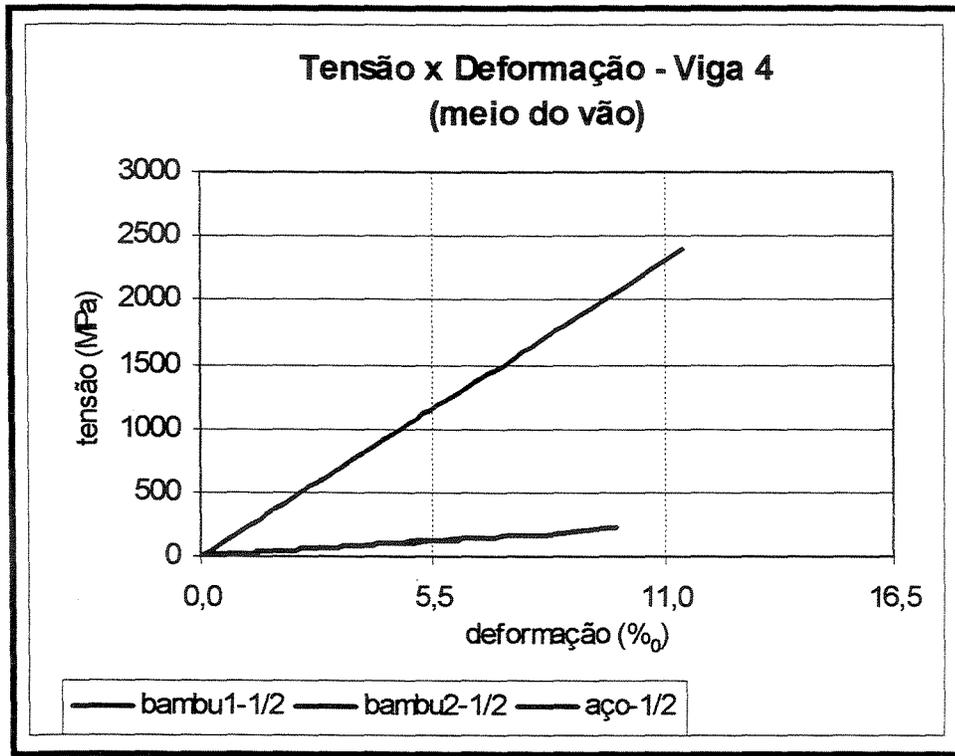


Gráfico 5.3.4.3 – Tensão x Deformação na armadura da viga 4 no meio do vão

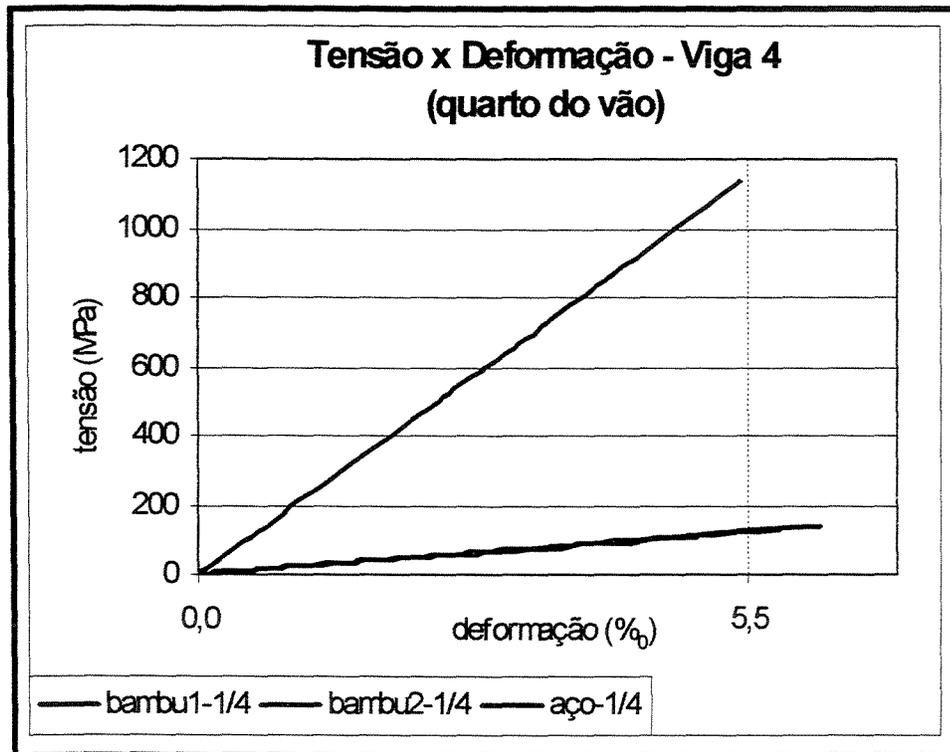


Gráfico 5.3.4.4 – Tensão x Deformação na armadura da viga 4 no quarto do vão

5.3.5 Viga 5

a Viga 5 foi realizada para determinar a aderência entre o bambu e o concreto não havendo o efeito da ancoragem da armadura de bambu. Por isso, a armadura de bambu foi posicionada na região central e inferior da viga com apenas 1 m de comprimento. A figura 5.3.5.1 demonstra que houve uma ruptura por “fendilhamento” nesta viga. Isto ocorreu devido a falta de ancoragem da armadura de bambu, abrindo uma fissura considerável em toda seção transversal da peça na região onde terminava a armadura de bambu.

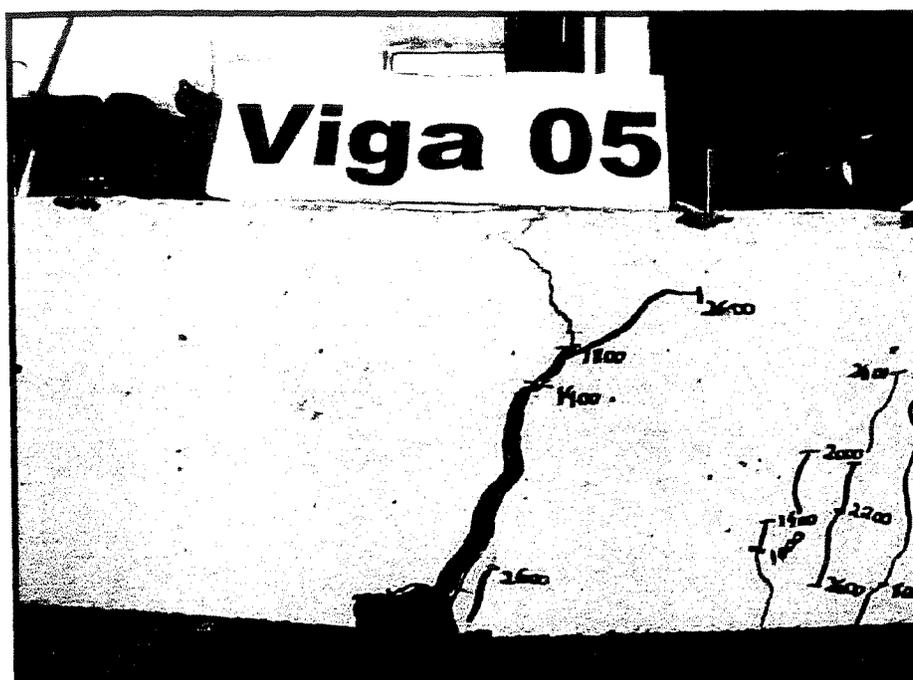


Figura 5.3.5.1 Detalhe da ruptura da viga 5

Os gráficos 5.3.5.1 a 5.3.5.4 apresentam as tensões e deformações da armadura da viga 5 no meio e quartos do vão.

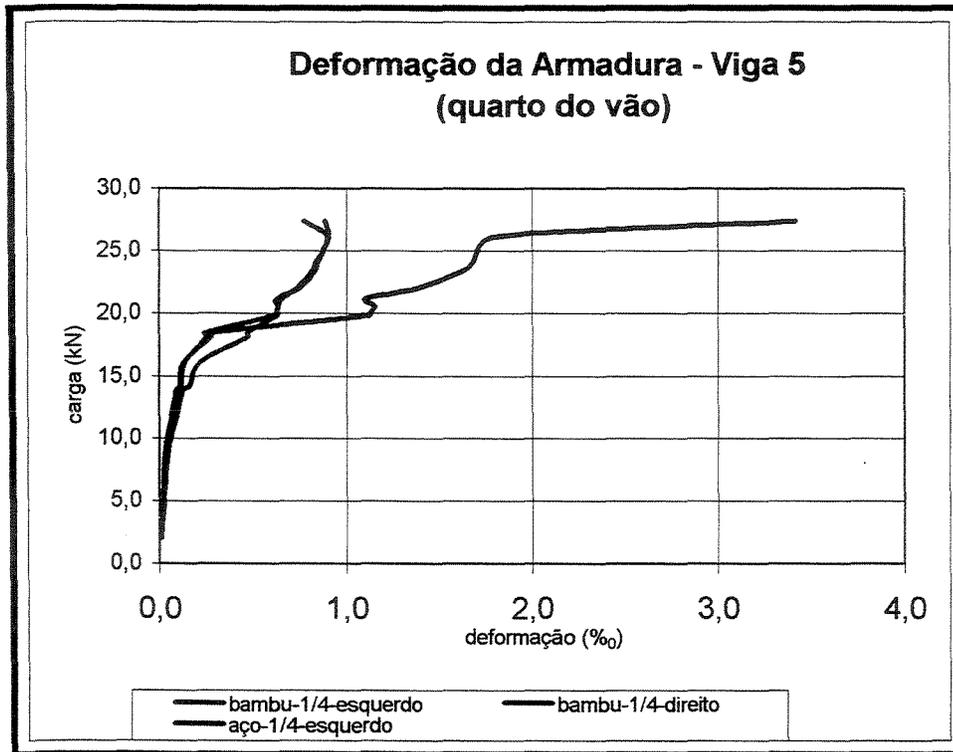


Gráfico 5.3.5.1 – Deformação da armadura da viga 5 no quarto do vão

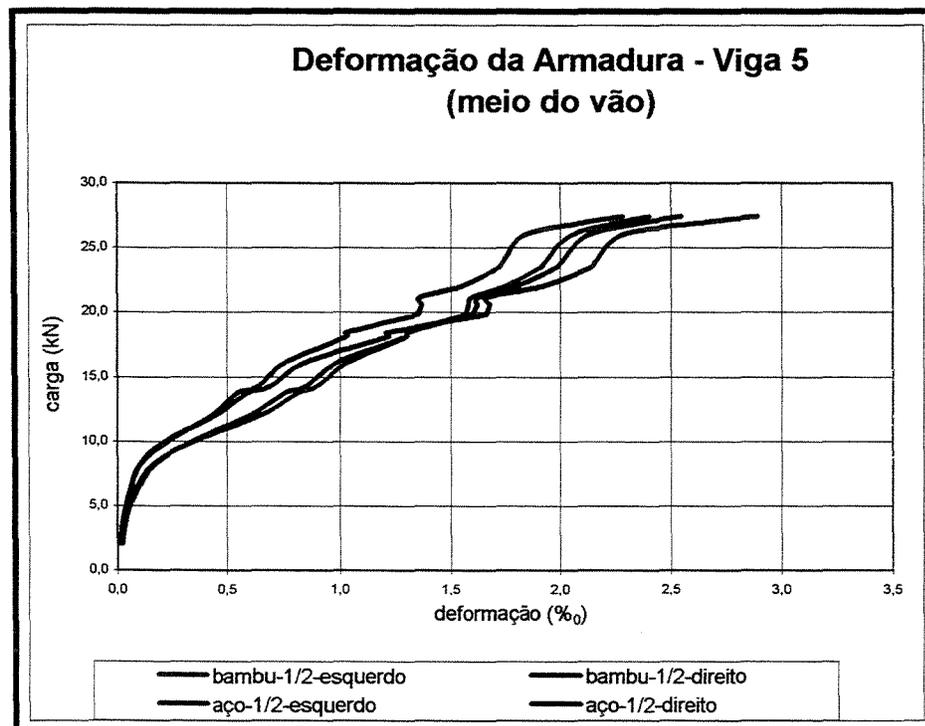


Gráfico 5.3.5.2 – Deformação da armadura da viga 5 no meio do vão

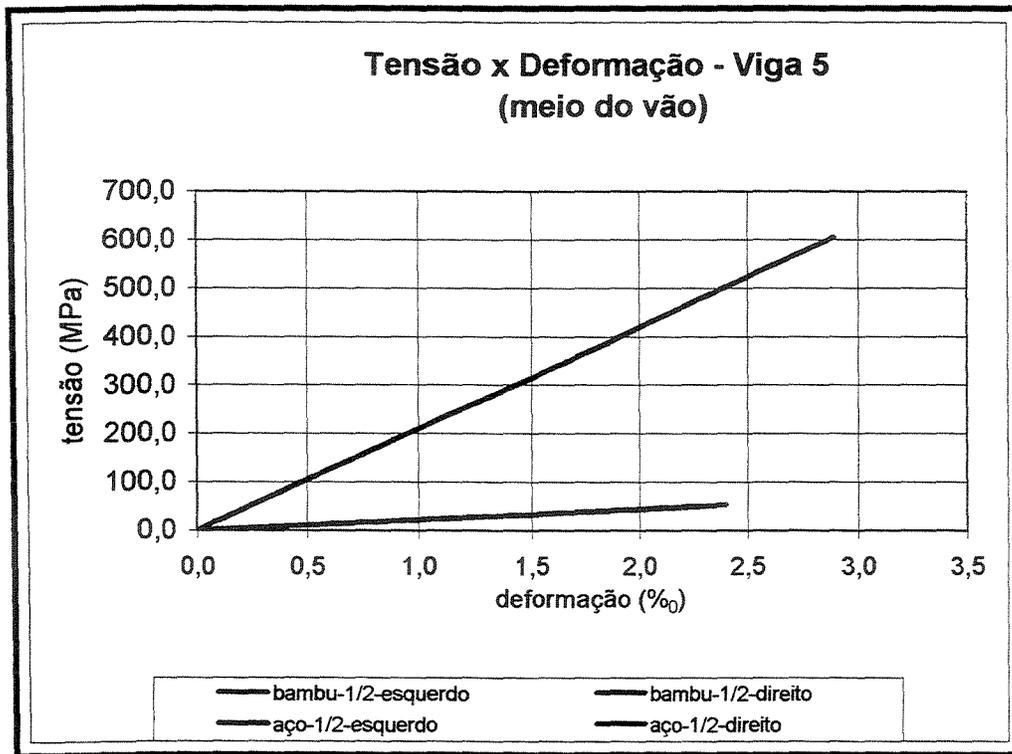


Gráfico 5.3.5.3 – Tensão x Deformação da armadura da viga 5 no meio do vão

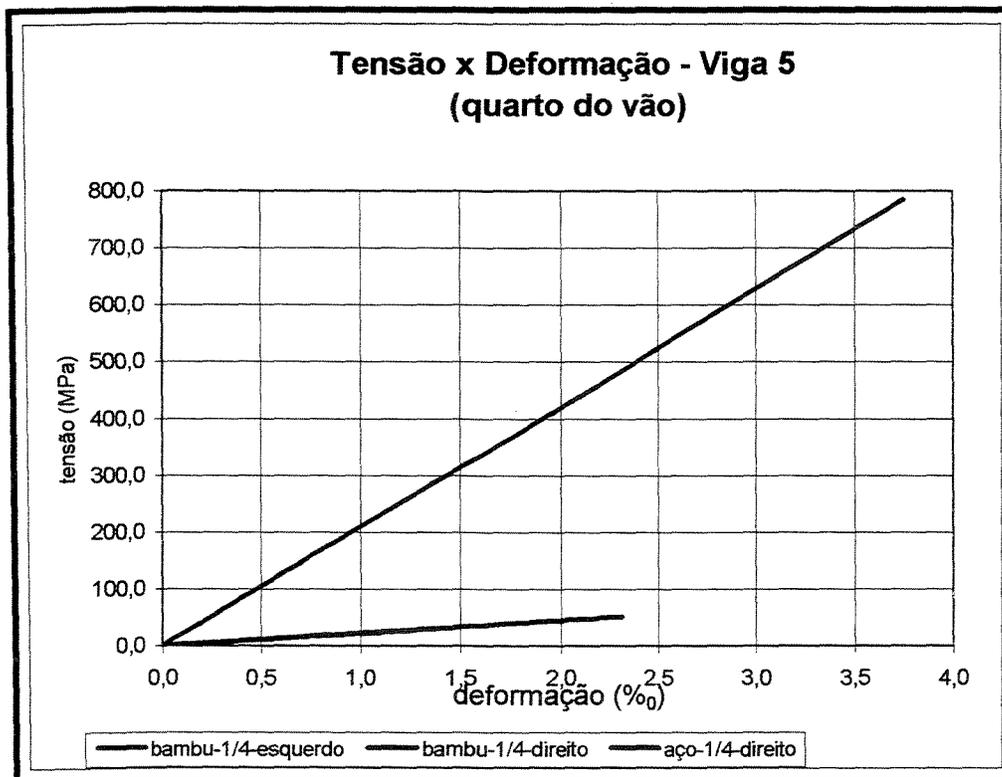


Gráfico 5.3.5.4 – Tensão x Deformação da armadura da viga 5 no quarto do vão

5.3.6 Viga 6

A armadura da Viga 6 era igual a da Viga 5, tendo como diferença apenas o acréscimo do tratamento de impermeabilização e aderência. A ruptura da Viga 6 também foi por fendilhamento, mesmo com o incremento de aderência utilizado na armadura, aumentando apenas a tensão de ruptura final (figura 5.3.6.1).

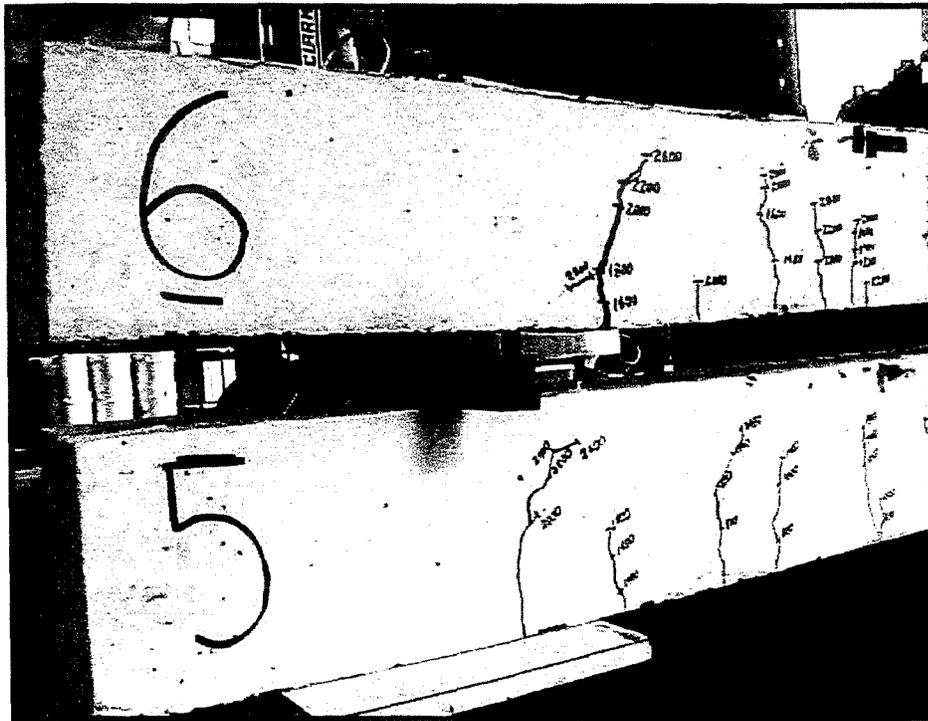


Figura 5.3.6.1 Detalhe das fissuras de ruptura das vigas 5 e 6

Os gráficos 5.3.6.1 a 5.3.6.4 apresentam os resultados do ensaio de flexão da Viga 6.

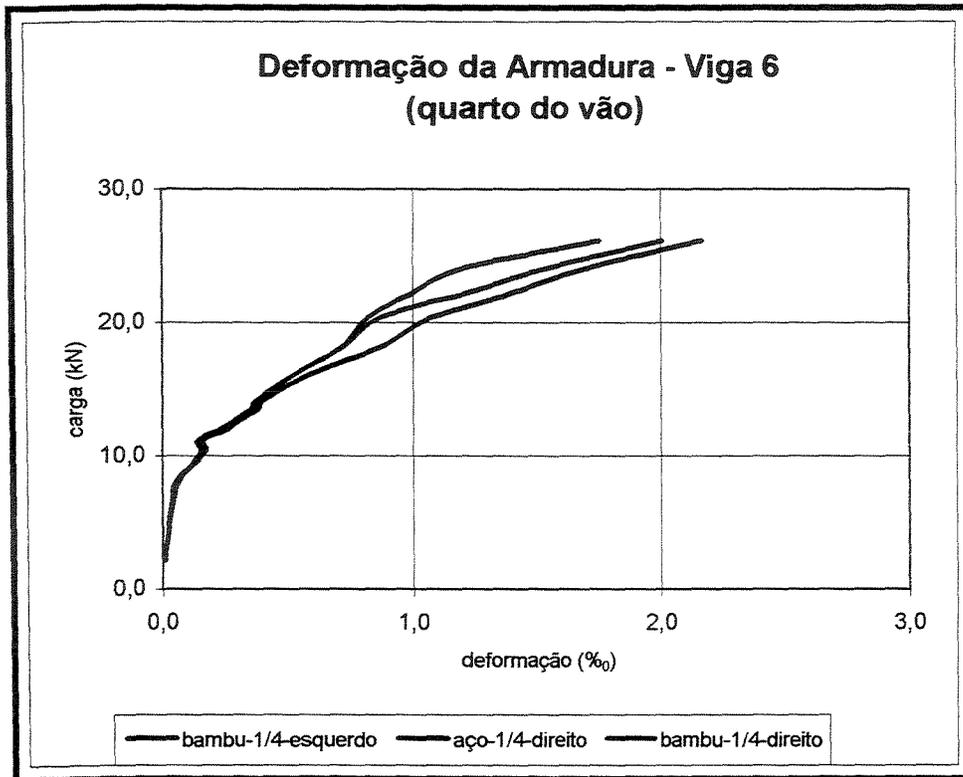


Gráfico 5.3.6.1 – Deformação da armadura da viga 6 no quarto do vão direito

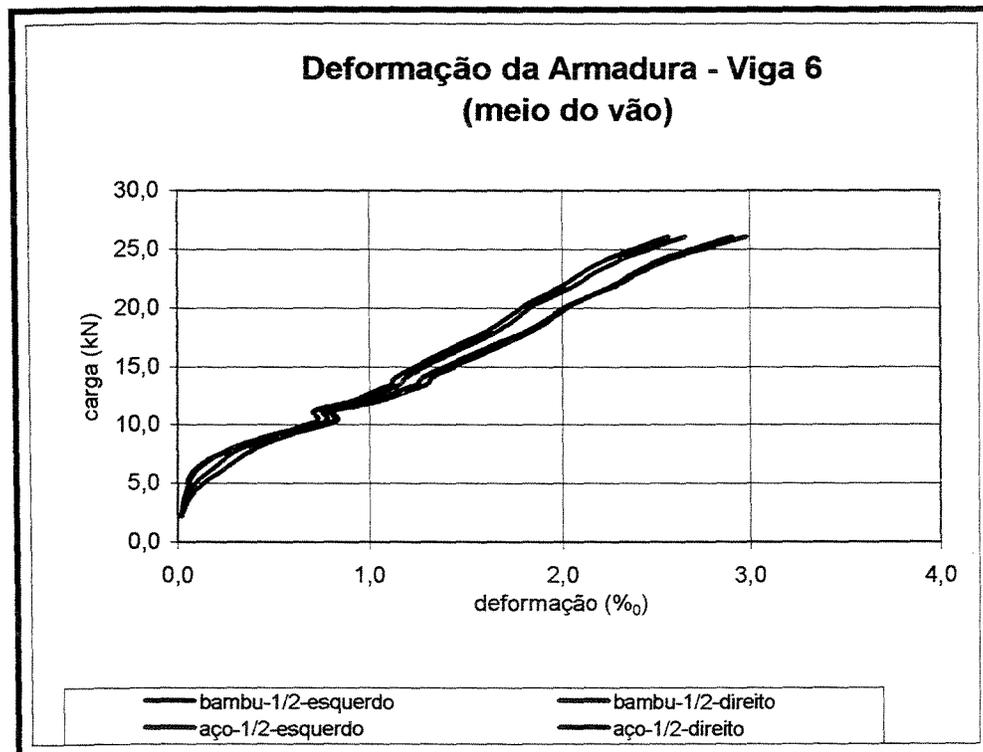


Gráfico 5.3.6.2 – Deformação da armadura da viga 6 no meio do vão

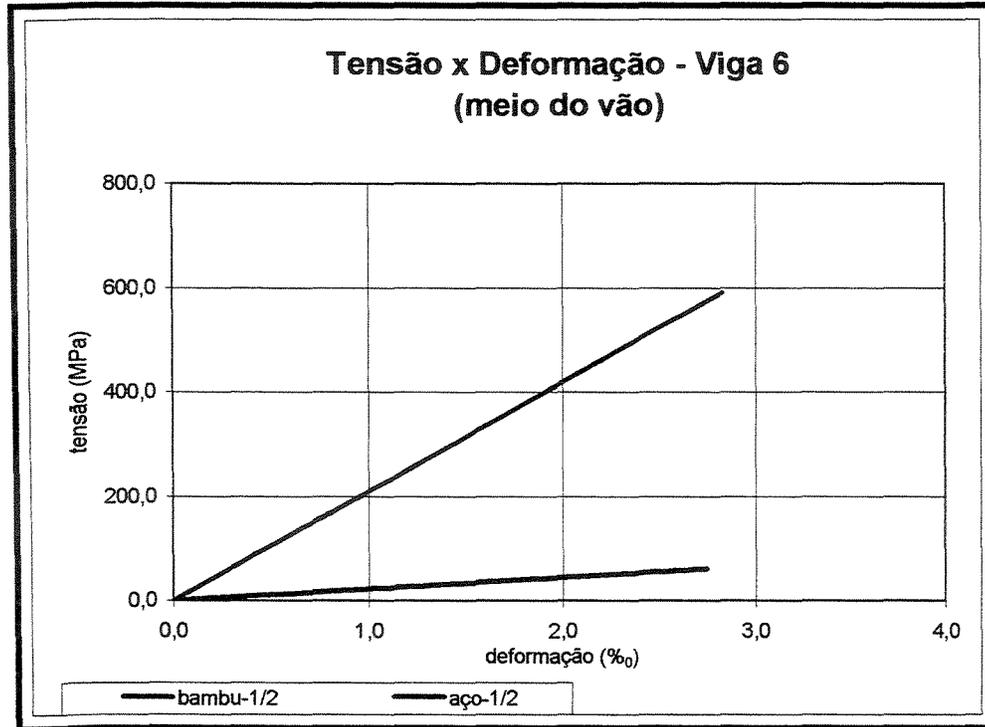


Gráfico 5.3.6.3 – Tensão x Deformação da armadura da viga 6 no meio do vão

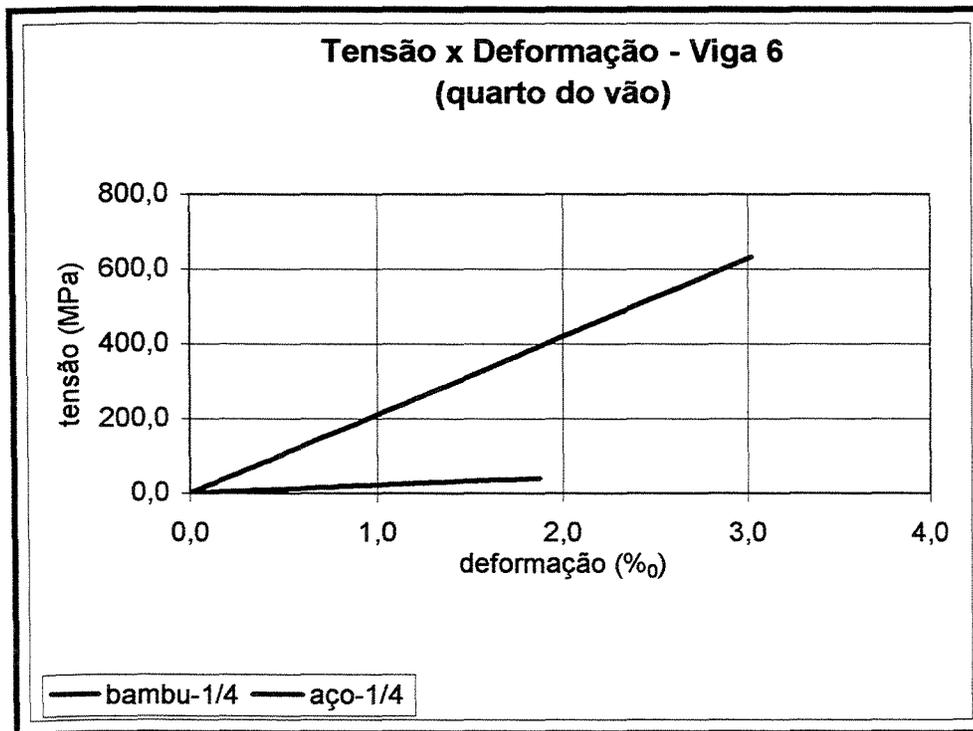


Gráfico 5.3.6.4 – Tensão x Deformação da viga 6 no quarto do vão

5.3.7 Caracterização do Concreto das Vigas

O concreto utilizado na confecção das vigas apresentou o mesmo traço em volume (1:3:3) e a mesma relação água/cimento (0,6). Foram concretados 10 corpos-de-prova, sendo 5 para o ensaio de compressão diametral (figura 5.3.7.1) e 5 para o ensaio de compressão axial (figura 5.3.7.2). Estes ensaios foram realizados para determinação da resistência à compressão (f_c), resistência à tração (f_t) e o módulo de elasticidade à compressão (E_c). Estes valores estão descritos nas tabelas 5.3.7.1 a 5.3.7.3

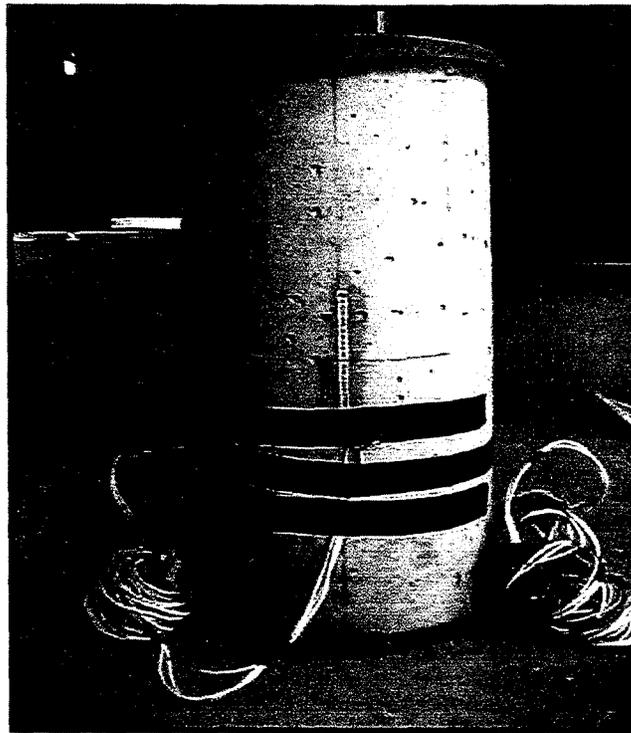


Figura 5.3.7.1 – Corpo-de-prova para ensaio de compressão axial instrumentado

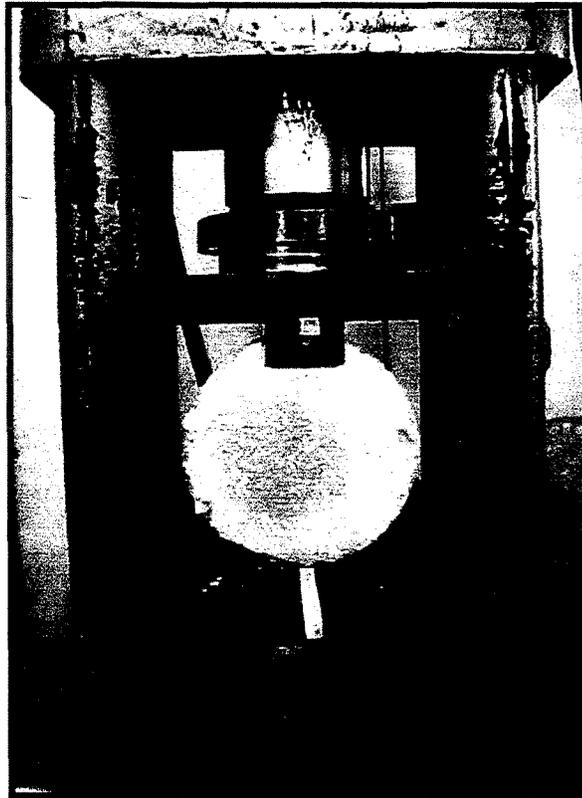


Figura 5.3.7.2 Ensaio de compressão diametral

Tabela 5.3.7.1 – Compressão diametral do concreto das vigas

CP	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Ruptura (kN)	f_t (MPa)
1	10,00	20,00	82,00	2,58
2	10,00	20,00	81,00	2,61
3	10,00	20,00	81,00	2,61
			Média	2,60

Tabela 5.3.7.2. – Compressão Axial do concreto das vigas

CP	Área (cm ²)	Ruptura (kN)	f _c (MPa)
1	78,54	163,00	20,75
2	78,54	162,00	20,63
3	78,54	162,00	20,63
4	78,54	162,00	20,63
5	78,54	162,00	20,63
		Média	20,65

Tabela 5.3.7.3 – Deformação longitudinal do concreto das vigas

CP	E _c (MPa)
1	23110
2	22280
Média	22695

5.3.8 Deformações no Concreto

Também foi instrumentado o concreto na região comprimida das vigas, obtendo assim a deformação do concreto durante o carregamento das vigas. O gráfico 5.3.8.1 mostra a deformação do concreto nas 6 vigas ensaiadas.

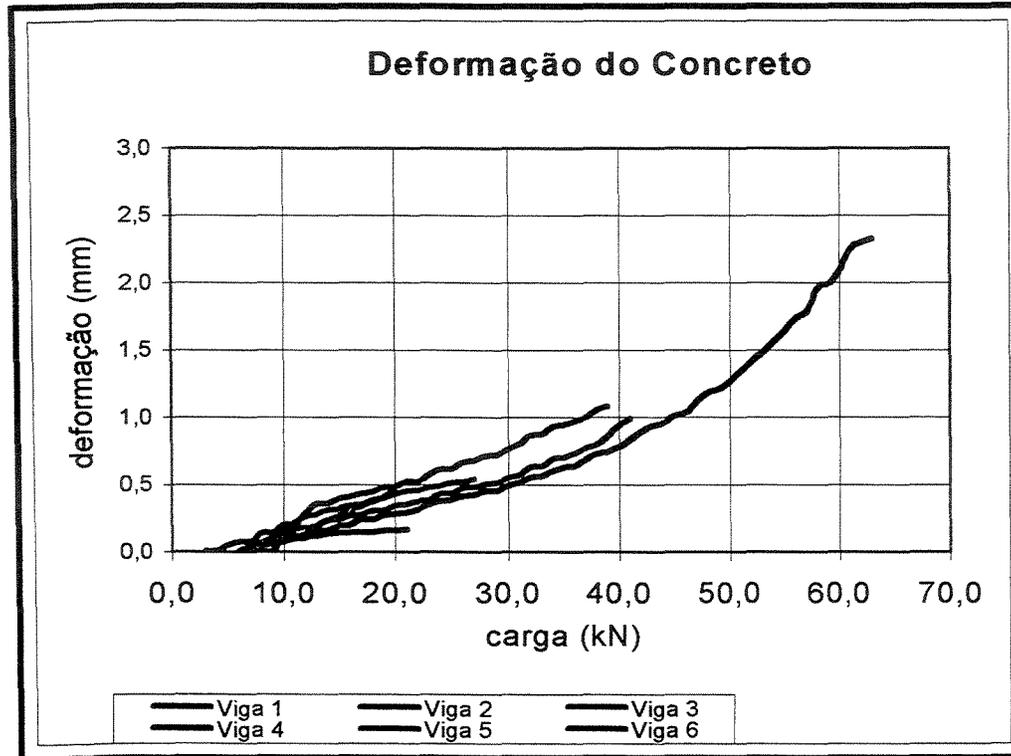


Gráfico 5.3.8.1 – Deformação do concreto na região comprimida das vigas

5.3.9 Deslocamentos Verticais

A evolução individual dos deslocamentos verticais, medido no meio do vão, para cada uma das vigas ensaiadas está representada no gráfico 5.3.9.1.

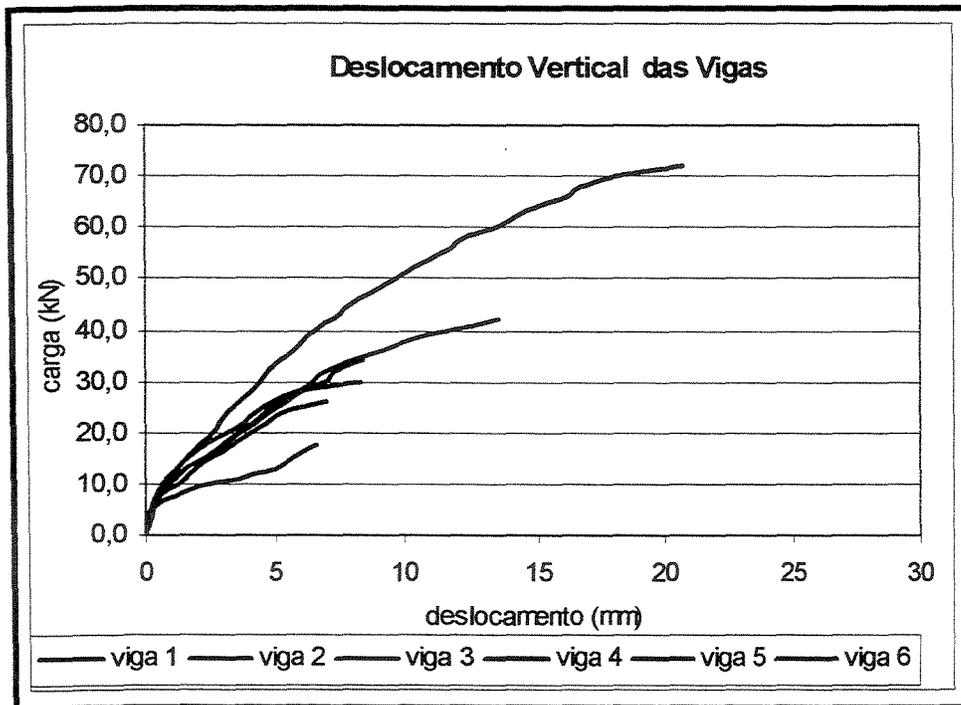


Gráfico 5.3.9.1 – Deslocamento vertical das vigas ensaiadas

5.3.10 Evolução das fissuras das vigas ensaiadas

Pelas figuras 5.4.1 e 5.4.2 pode-se visualizar o panorama das fissuras por escoamento da armadura e fendilhamento das vigas durante o carregamento.

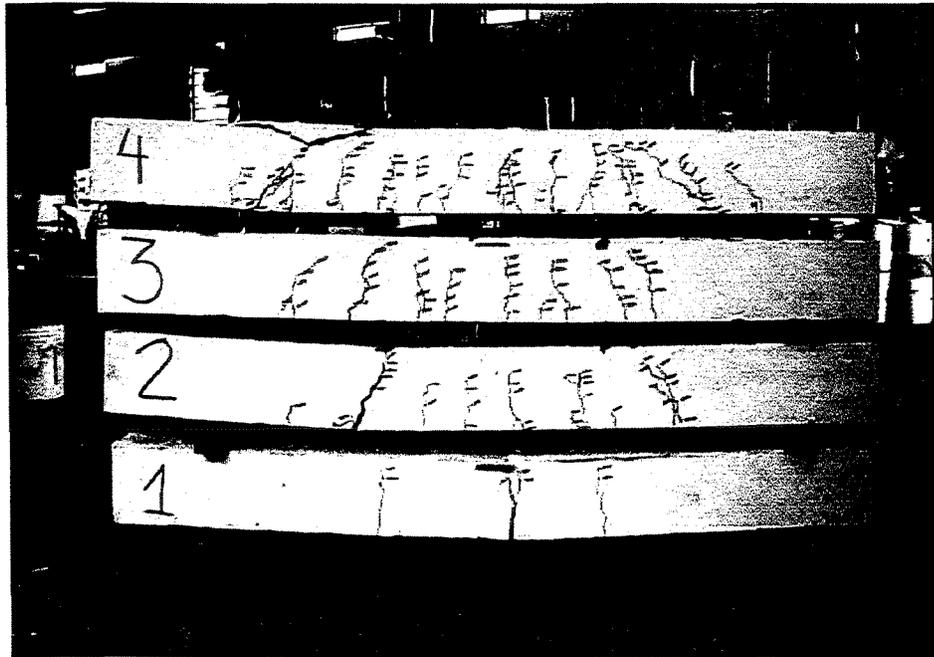


Figura 5.3.10.1 – Panorama das fissuras por escoamento da armadura das vigas 1, 2, 3 e 4

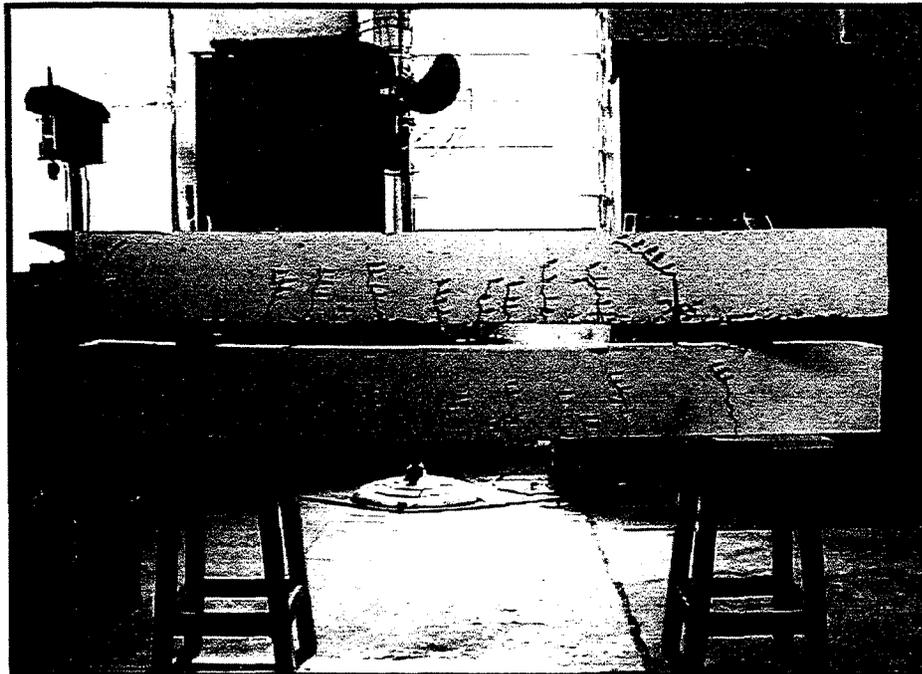


Figura 5.3.10.2 – Panorama das fissuras por fendilhamento das vigas 5 e 6

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através dos Ensaios de Caracterização, a espécie de bambu *Dendrocalamus giganteus*, utilizada nesta pesquisa, apresentou resultados satisfatórios em relação às suas propriedades físicas e mecânicas.

Em relação à tensão de ruptura na tração paralela às fibras, o valor obtido foi de, aproximadamente, 190 Mpa, demonstrando que esta espécie realmente pode ser utilizada quando submetida a esforços deste tipo, sendo considerado um valor alto, por ser um material natural. Comparando este resultado com dados da bibliografia pesquisada, pode-se concluir que estão de acordo com este último. Porém, não foi encontrada nenhuma explicação detalhada deste ensaio, realizado em outras pesquisas.

Uma das dificuldades de utilização do bambu como reforço nas vigas de concreto é seu baixo Módulo de Elasticidade em relação ao concreto, o que ocasiona excessiva deformação nas peças de concreto. Isto foi comprovado neste ensaio, onde chegou-se ao valor de 22.195 MPa, cerca de 1/10 do valor do Módulo de Elasticidade do aço.

No que se refere à tensão de ruptura à compressão, o valor encontrado de aproximadamente 80 MPa também está coerente com os dados relatados na literatura pesquisada.

O ensaio de Variação Dimensional confirmou a necessidade de um tratamento de impermeabilização no bambu, pois a variação volumétrica da ordem de 15% inviabiliza a utilização do bambu natural, interferindo prejudicialmente na união bambu/concreto.

Com o ensaio de arrancamento foi possível avaliar o valor da tensão de arrancamento máxima suportada pelo bambu, sem haver perda de aderência com o concreto. Analisando os resultados para os quatro tratamentos empregados, notou-se que para todos eles houve uma tensão máxima que atuava no momento em que a deslizamento do bambu no concreto chegava na faixa de 0,5 mm. Portanto, a tensão máxima de arrancamento foi estabelecida como sendo a tensão atuante no bambu quando o deslizamento deste no concreto atinge 0,5 mm.

No ensaio de arrancamento, o bambu sem tratamento chegou ao valor médio de 0,70 MPa, resultado considerado baixo, devido sua grande variação dimensional quando em contato com umidade. Dos tratamentos aplicados, o que apresentou melhores resultados foi o envolvimento com verniz, na função de impermeabilizante, e anéis de arame farpado, para aumentar a aderência, obtendo-se uma tensão de arrancamento de 1,25 MPa, aproximadamente 80% maior que no bambu sem tratamento.

Contrariamente à literatura pesquisada, os resultados obtidos com o tratamento de piche e areia foram piores do que os bambu sem tratamento, apresentando um valor médio de tensão de arrancamento de 0,45 MPa. Este resultado pode ser atribuído à alteração da viscosidade do piche aplicado nas taliscas de bambu, acarretada pelo aumento da temperatura do concreto devido às reações químicas durante a pega.

Em relação às vigas ensaiadas, todas apresentaram um comportamento adequado diante das hipóteses adotadas. As quatro primeiras vigas romperam pelo início do escoamento da armadura longitudinal de aço e as duas últimas por fendilhamento do concreto. É válido observar que em nenhuma das vigas foi observado

ruptura por esforço cortante, tendo tal fato ocorrido devido à armadura de cisalhamento ter sido superdimensionada.

Uma primeira análise dos resultados mostrou a eficiência do bambu quando utilizado como armadura longitudinal. O simples acréscimo de 8,0 cm² de seção transversal de armadura de bambu fez com que a carga de ruptura da viga quadruplicasse, passando de 18 kN (Viga 1) para 74,40 kN (Viga 4) como podemos observar no gráfico 6.1.

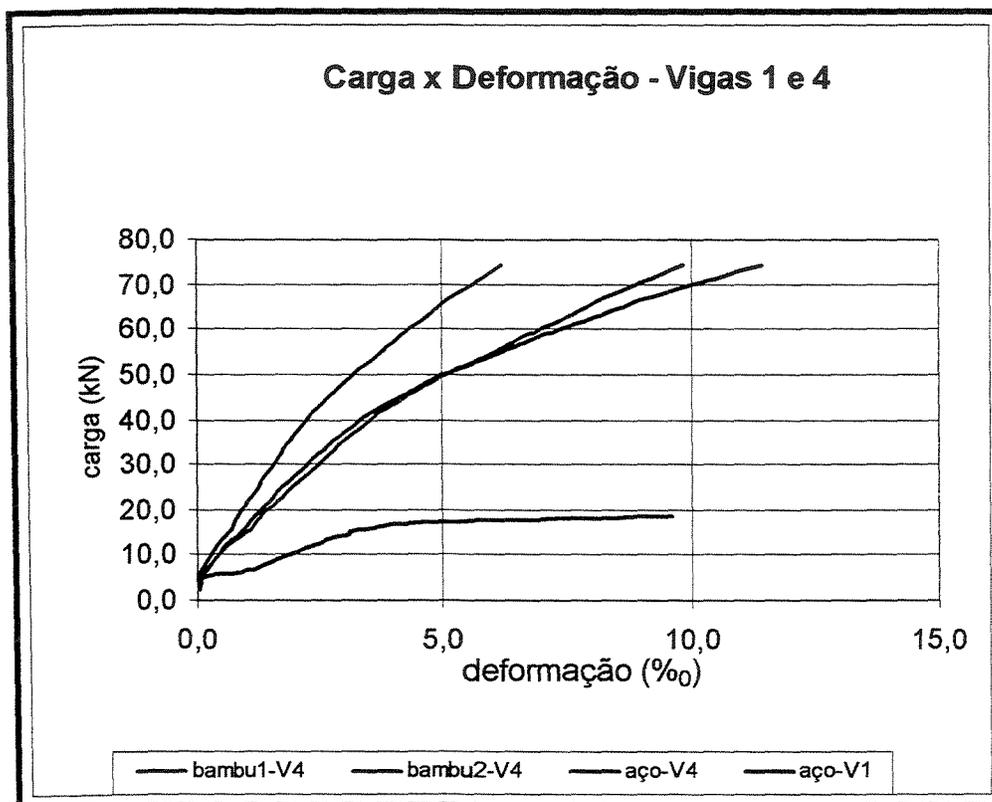


Gráfico 6.1 – Carga x deformação das Vigas 1 e 4

Nos resultados obtidos para as vigas 5 e 6 foi observado que a armadura de bambu causou uma ruptura por “fendilhamento” (figura 5.3.5.1) no concreto, antes mesmo do escoamento das armaduras de aço e de bambu. O acréscimo de taliscas de bambu sem ancoragem aumentou a carga de ruptura em 40% (Viga 5) e 60% (Viga 6) em relação à Viga 1 (testemunho). Assim, pode-se concluir que o aumento da resistência das vigas armadas com bambu não foi apenas devido à ancoragem da armadura, mas também devido ao mecanismo de incremento de aderência utilizado (gráfico 6.2).

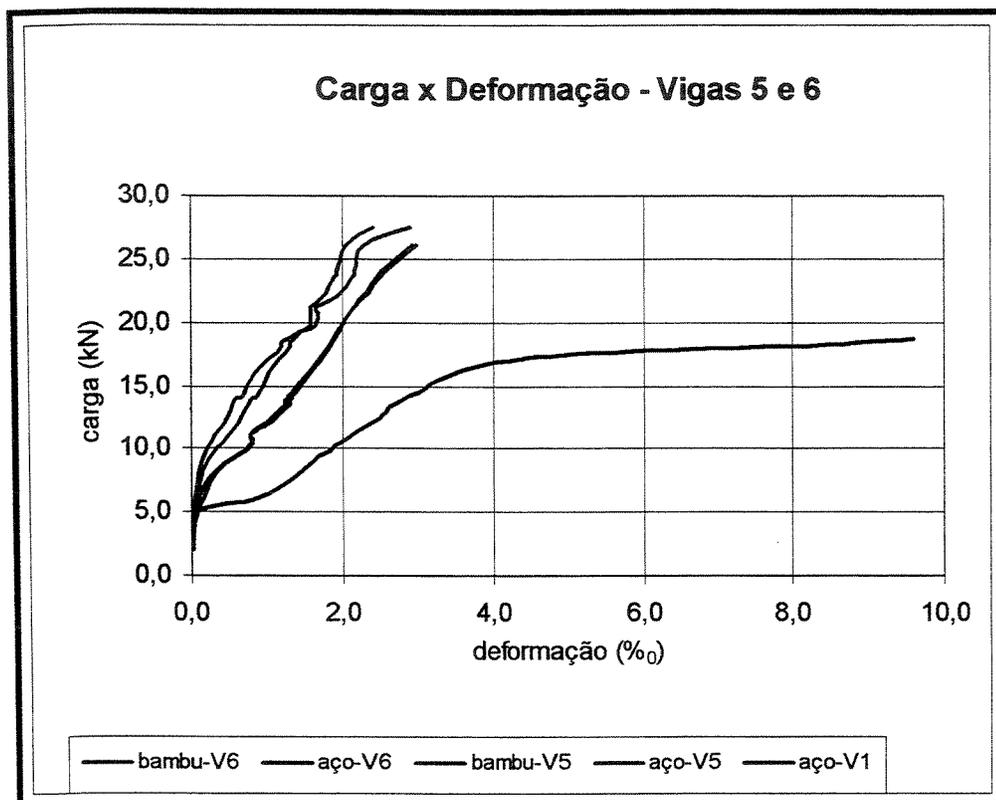


Gráfico 6.2 – Carga x deformação das Vigas 5 e 6

Analisando as vigas 2 e 3, concluiu-se que o mecanismo de incremento de aderência utilizado teve influência no comportamento das armaduras de aço e bambu, pois o aço e o bambu tiveram deformações semelhantes durante o ensaio à flexão das vigas de concreto armadas com bambu (gráfico 6.3).

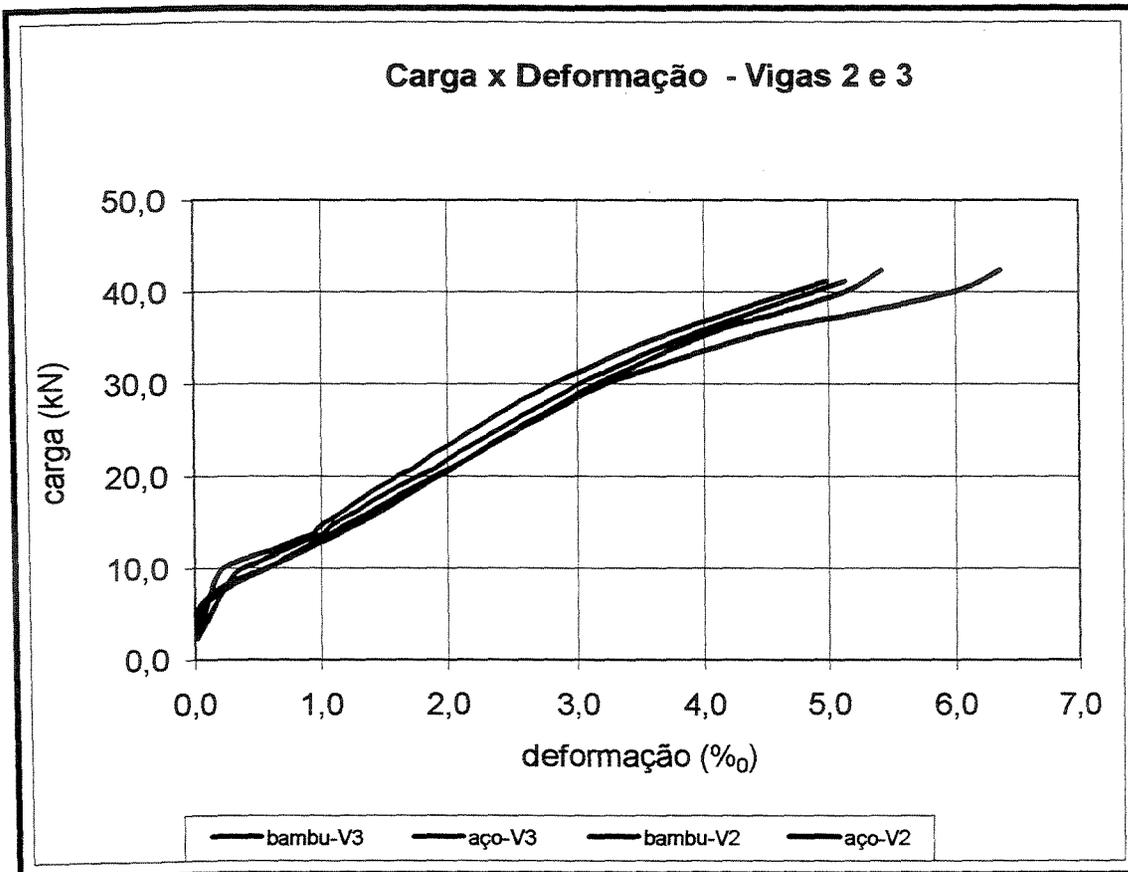


Gráfico 6.3 – Carga x deformação das vigas 2 e 3

Para Viga 4, foi confirmado que o tratamento do bambu melhorou a aderência com o concreto e proporcionou resultados ainda mais próximos da hipótese de cálculo estrutural adotada. Nesta viga, os valores de deformação do aço e do bambu foram mais próximos em relação às outras vigas ensaiadas. Além disso, a Viga 4 apresentou uma maior quantidade de fissuras, o que representa um melhor aproveitamento da armadura e uma melhor aderência do bambu com o concreto.

Portanto, houve aderência entre o bambu e o concreto, assim como ocorre no concreto armado com aço, fato este muito positivo, considerando que o bambu é um material natural e não foi produzido para este fim.

A diferença entre o valor último teórico e o valor último experimental foi de aproximadamente 20%. Este fato ocorreu devido à não existência de aderência perfeita entre o bambu e o concreto. Deve-se, portanto, ser considerada a possibilidade de aplicação de um coeficiente redutor na resistência última à flexão de vigas de concreto armadas com bambu.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pode-se concluir que a utilização do bambu como armadura longitudinal nas vigas de concreto é viável do ponto de vista estrutural, pois é possível aplicar a mesma hipótese de cálculo utilizada no concreto armado com aço (Estádio II), desde que se adote coeficientes de segurança maiores. Isto é necessário pelo fato do bambu ser um material natural e não homogêneo, portanto, sujeito a variações em suas propriedades físicas e mecânicas.

Também pode-se afirmar que a armadura de bambu terá um bom desempenho apenas se for garantida a aderência entre o bambu e o concreto, utilizando um tipo de tratamento, como o que foi utilizado neste trabalho (verniz com anéis de arame farpado).

No entanto, algumas recomendações devem ser consideradas quando da utilização do bambu como armadura longitudinal em vigas de concreto. Entre elas, pode-se destacar:

- utilizar colmos de bambu com idade média entre 3 e 6 anos de idade, garantindo assim boas características físicas e mecânicas;
- a aplicação de um método de incremento de aderência no bambu para proporcionar sua aderência com o concreto;
- caracterização das propriedades mecânicas da espécie de bambu a ser utilizada, pois o bambu é um material heterogêneo, apresentando grande

variabilidade nas suas propriedades, tanto entre espécies diferentes como entre bambus da mesma espécie;

- a utilização de estribos de aço, pois ainda não há estudos que relatem o comportamento do bambu em relação aos esforços de cisalhamento nas vigas.
- Considerar no dimensionamento à flexão de vigas de concreto armadas com bambu um coeficiente de redução na capacidade última à flexão, uma vez que a aderência perfeita entre o concreto e o bambu na maioria das vezes é difícil de ser obtido.

Desta forma, a necessidade de um estudo mais detalhado sobre a utilização do bambu deve ser incentivado, avaliando outros métodos de incremento de aderência entre o bambu e o concreto.

Assim, espera-se que este trabalho possa contribuir para o maior entendimento do comportamento a flexão de vigas de concreto armadas com bambu e que sirva de estímulo para outros trabalhos nesta área.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMADA S., UNTAO S.** – – Fracture properties of bamboo. In: Composite part B – engineering, vol. 32, p. 449 – 457, 2001.
- ANTUNES, M.C.C.A.** – O Bambu na construção. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, I, São Carlos, SP, 1983. Anais, vol. 3, p. 1-48.
- AZZINI, A.; CIARAMELLO, D.; NAGAI, V.** Número de feixes vasculares em três espécies de bambu. *Bragantia*, Campinas, 1997, v. 36, p. 7-10.
- AZZINI, A.; CIARAMELLO, D. e SALGADO, A. L. B.** Informações técnicas – Bambu como reforço estrutural em moirões de cerca. *O Agrônomo*, Campinas, SP, 38 (2), 1986.
- AZZINI, A.; SALGADO, A. L. B.** Avaliação quantitativa do material fibroso e vazios em colmos de bambu. *O papel*, p. 49-52, jul. 1992.
- BARBOSA, J. C.** Utilização do bambu na produção de habitação de interesse social. São Carlos, 1997. 163 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, área de concentração Tecnologia do Ambiente Construído) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BARBOSA, J. C.; INO, A.** Utilização do Bambu na produção de habitação de interesse social – Compilação dos exemplos construtivos. In: VI Encontro Brasileiro em

Madeiras e em Estruturas de Madeira. Florianópolis, SC, 1998. Anais, vol. 4, p. 307-318.

BARMAK, H. Ensaios sobre o emprego do bambu em construções de concreto. Boletim da Diretoria de Obras Públicas, São Paulo. Boletim nº 4, 1938, p. 34-50.

BERALDO, A. L. Bambucreto – o uso do bambu como reforço do concreto. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, XVI, Jundiaí, SP, 1987. Anais, vol. II, p. 521-530.

BERALDO, A. L.; ZOULALIAN, A. Bambu – Material alternativo para construções rurais. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 5, Belo Horizonte, MG, 1995. Anais, vol. II, p. 425-439.

BERALDO, A. L.; AZZINI, A.; ZULLO JR, J. Características físicas, químicas e anatômicas de três espécies de bambus gigantes. In: VI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Florianópolis, SC, 1998. Anais, vol. 4, p. 297-306.

BOLETIM DA DIRETORIA DE OBRAS PÚBLICAS DE SÃO PAULO. Ensaios sobre o emprego do Bambu em Construções de Concreto (extraído da Revista “*Der Bauingenieur*”, nº 24, janeiro de 1936) Boletim 4, p. 34-50, São Paulo, 1938.

CAMUS, E. G. Les Bambusées. Paris, Editeur Paul Lechevalier, 1913.

CASCO, M. E.; MALAVASSI, I. C.; LONGHI, M. M. Anatomia y estructura de los culmos de cuatro espécies de bambu em Costa Rica. In: LONGHI, M. M. Cultivo y uso del Bambú en el Neotrópico. Editora Científica. San José, Costa Rica, 1998, 88 p.

FARRELY, D. The book of bamboo. San Francisco, EUA: Sierra Club Books, 1984.

FERRÃO, A. M. de A Taliscas de bambu em matrizes de concreto: características físico-mecânicas. Tese de Mestrado. UNICAMP - Campinas, 1992.

FERRÃO, A. M. A. e FREIRE, W. J. Aderência entre bambu e concreto: teste de arrancamento com taliscas de *Bambusa tuldoides*. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 5, Belo Horizonte, MG, 1995. Anais, vol. 2, p. 389-398.

FERRÃO, A. M. A. e SALGADO, A. L. B. Metodologia para ensaios de compressão do bambu (*Bambusa vulgaris var. vittata e Phyllostachys purpuratta*). In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, XXIV, Viçosa, MG, 1995. Anais (catalogado sob nº 95-1-128).

GALVÃO, A. P. M. Tratamento preservativo do bambu pelo processo do banho frio. Fapesp, vol. XXIV, 1967.

GAVIRIA, A. L. – La guadua como material em la construccion de vivienda. In: Simposio Nacional de Bambu-Guadua, I, Portoviejo, Equador, Equador, 1991. Anais, p. Ga.1-Ga.6.

GEYMAYER, H. G., COX, F.B. – Bamboo reinforced concrete. Journal of the American Concrete Institute, 67 (10): 841-846. 1970.

GHAVAMI, K. Bambu: um material alternativo na engenharia. Engenharia (492): 23-27, 1992.

GLENN, H. E. Bamboo Reinforcement in Portland Cement Concrete Structures. Bulletin 4. Engineering Expt. Sta., Clemson Univ., Clemson, S. C. 1950.

- HIDALGO LOPEZ, O.** Bambu: su cultivo y aplicaciones en: Fabricación de papel, construcción, arquitetura, ingeniería, artesanía. Cali, Colombia, 1974, pp. 318.
- JANSSEN, J. J. A.** Building with bamboo. Londres, Reino Unido: Intermediate Technology Publication, 2ª ed., 1995, pp. 49-52.
- KALITA, U. C., KHAZANCHI A. C. e THYAGARAJAN G.** Bamboocrete low-cost houses for the masses. Indian Concrete Journal, voi. 51, p. 309-312, 1977.
- LIMA JR, H. C.; BARBOSA, N. P. e GHAVAMI, K.** Comportamento em serviço de lajes de concreto reforçadas com bambu. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 5, Belo Horizonte, MG, 1995. Anais, vol. 2, p. 441-454.
- LIMA JR, H. C.; XAVIER, A. C.; TOLEDO FILHO, R. D. e BARBOSA, N. P.** Aderência bambu-concreto. In: Congresso de Engenharia Civil, II, Juiz de Fora, MG, 1996. Anais, vol. 2, p. 312-323.
- LIMA JR, H. C.; XAVIER, A. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; BARBOSA, N. P., GHAVAMI, K.** Análise experimental de lajes de concreto em fôrma permanente de bambu. In: Congresso de Engenharia Civil, II, Juiz de Fora, MG, 1996 b. Anais, vol. 2, p. 324-339.
- LIMA JR, H. C.; DALCANAL, P. R.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P.** Determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade transversal do bambu *Dendrocalamus giganteus*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, XXVIII, Pelotas, RS, 1999, 6 p.
- LIN, Wei-chih.** The bamboos of Thailand. Taiwan, China. Taixan Forestry Research Institute, 1968, 52p.

- MONTES, L. F.; LONGHI, M. M.; QUINTANA, M. M.** Propagación y desarrollo de cuatro variedades de bambú en condiciones de campo. In: LONGHI, M. M. Cultivo y uso del Bambú en el Neotrópico. Editora Científica. San José, Costa Rica, 1998, 88 p.
- NASCIMENTO, A. M. do.** Estrutura do Colmo e Propriedades Físicas do Bambu Gigante (*Dendrocalamus giganteus*). Viçosa, MG, 1990, 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa.
- OLIVEIRA, W.; ADEODATO, S.** A volta do velho e forte bambu. Globo Ciência, Dezembro 1995, pp. 24-27.
- RAJ, VIJAY.** Treatise on Utilization of Bamboo as Reinforcement in Ferrocement. Journal of Ferrocement: Vol 21, N° 4, October 1991, pp. 371 –381.
- RECHT, C.; WETTERWALD, M. F.** Bamboos. London, B. T. Batsford Ltd. 1994, 128 p.
- RUIZ – PEREZ M., MAOYI FY, YANG XS., BELCHER B.** Bamboo Forestry in China – Toward environmentally friendly expansion. In: Journal of Forestry, vol. 99, p. 14 – 20, jul. 2001.
- SALGADO, A. L. B.; CIARAMELLO, D. E AZZINI, A.** Bambu como reforço estrutural em moirões de cerca. Campinas, O Agrônomo, 38 (2): 127-137. 1986.
- SHUI, L. T.** Some Properties of Bamboo for Consideration as Ferrocement Reinforcements. Journal of Ferrocement: Vol 20, N° 20, April 1990, pp. 149 –157.
- SONDY, L.** O bambu como estrutura e o seu aproveitamento no Brasil. Concreto, 6 (35): 51-52, 1940.

TARGA, L. A. e BALLARIN, A. W. Características e potencialidade de uso do bambu como material de construção no meio rural. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, XIX, Piracicaba, SP, 1990. Anais, vol. 1, p. 54-59.

TOLEDO FILHO, R. D.; BARBOSA, N. P. Aplicação de bambu e de fibras naturais nas construções rurais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, XIX, Piracicaba, SP, 1990. Anais, vol. 1, p. 81-91.

UEDA, K. Bamboo Industry Japan, Present and Future. In: XVII IUFRO WORLD CONGRESS DIVISIONS, Anais, p. 245-255, 1981.