

OSVALDO FERREIRA DA SILVA

**ESTUDO SOBRE A SUBSTITUIÇÃO DO AÇO LISO PELO  
BAMBUSA VULGARIS, COMO REFORÇO EM VIGAS DE  
CONCRETO, PARA O USO EM CONSTRUÇÕES RURAIS.**

Dissertação apresentada ao Centro de  
Tecnologia da Universidade Federal de  
Alagoas, para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Civil.

Maceió

2007

OSVALDO FERREIRA DA SILVA

**ESTUDO SOBRE A SUBSTITUIÇÃO DO AÇO LISO PELO  
BAMBUSA VULGARIS, COMO REFORÇO EM VIGAS DE  
CONCRETO, PARA O USO EM CONSTRUÇÕES RURAIS.**

Dissertação apresentada ao Centro de  
Tecnologia da Universidade Federal de  
Alagoas, para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Aline da Silva Ramos  
Barboza

Maceió

2007

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale**

- S586e Silva, Osvaldo Ferreira da.  
Estudo sobre a substituição do aço liso pelo *Bambusa vulgaris*, como reforço em vigas de concreto, para o uso em construções rurais / Osvaldo Ferreira da Silva. – Maceió, 2007.  
141 f. : il. tabs., grafs.
- Orientador: Aline da Silva Ramos.  
Dissertação (mestrado em Engenharia Civil : Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2007.
- Bibliografia: f. 132-135.  
Apêndices: f. 136-141.
1. Engenharia civil. 2. Materiais de construção. 3. *Bambusa vulgaris*. 4. Viga. 5. Concreto. 6. Bambu. I. Título.

CDU: 624.011.72



Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Centro de Tecnologia – CTEC  
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGEC  
Campus A. C. Simões  
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas  
Tel/Fax: (82) 3214-1276  
E-mail: ppgec@ctec.ufal.br  
Site: <http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec>



**ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL/ ESTRUTURAS**

Em sessão pública, às nove horas e dez minutos do dia seis do mês de julho do ano de dois mil e sete, na Sala de Aula do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, foi iniciada a defesa da dissertação de mestrado do aluno **OSVALDO FERREIRA DA SILVA** tendo como título: **“ESTUDO SOBRE A SUBSTITUIÇÃO DO AÇO LISO PELO BAMBUSA VULGARIS, COMO REFORÇO EM VIGAS DE CONCRETO, PARA USO EM CONSTRUÇÕES RURAIS”**, como requisito parcial para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**, na área de concentração de **ESTRUTURAS**. A Banca Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Aline da Silva Ramos Barboza (Orientadora - CTEC/UFAL), Prof. Dr. Humberto Correia Lima Júnior (UFPE) e Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima (CTEC/UFAL). O candidato fez a apresentação da dissertação em cinquenta e oito minutos. A defesa foi encerrada às doze horas e quarenta e um minutos. Após o encerramento da defesa, em reunião confidencial, a Banca Examinadora, com base no Regimento Interno, decidiu por **APROVAR** a dissertação de mestrado.

Em 06 de julho de 2007.

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Aline da Silva Ramos Barboza (Orientadora-CTEC/UFAL)

Prof. Dr. Humberto Correia Lima Júnior (UFPE)

Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima (CTEC/UFAL)



**Prof. Dr. Eduardo Nobre Lages**  
Coordenador do PPGEC/UFAL

*Dedico este trabalho aos meus pais Manoel e Josefa Ferreira da Silva (in memoriam).*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus, que me dá forças para vencer todos os obstáculos, mesmo aqueles que parecem intransponíveis;

Agradeço a minha esposa, Gilvânia, por ter estado sempre disposta a colaborar com este trabalho;

A minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Aline da Silva Ramos Barboza, pela dedicação demonstrada, pelas críticas construtivas, pela revisão do texto e pelas palavras amiga incentivadora nas horas necessárias, que foram decisivas para elaboração e conclusão desta dissertação;

Ao Prof. Dr. Severino Pereira Cavalcanti Marques pela sua competência e dedicação para com o curso de Engenharia Civil;

Aos Professores da Pós-graduação pela competência e profissionalismo;

A todos os Colegas de Mestrado, pelo companheirismo, pela amizade, pelas brincadeiras nas reuniões informais que nos fez relaxar;

Aos funcionários do NPT, INBAMBU e EAFS, pelo apoio indispensável para o desenvolvimento da pesquisa.

# Sumário

Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xv
Lista de símbolo	xix
Lista de Abreviaturas	xxiii
Resumo	xxiv
Abstract	xxv
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>1</b>
1.1 Aspectos Gerais	1
1.2 Objetivo Geral	2
1.3 Objetivos Específicos	2
1.4 Justificativa	3
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>4</b>
<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Concreto</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Bambusa vulgaris Schard</b>	<b>5</b>
2.2.1 Características dos colmos	7
<b>2.3 Material concreto reforçado com bambu</b>	<b>10</b>
2.3.1 Principais recomendações para o uso do bambu como reforço do concreto	12
2.3.2 Durabilidade	15
<b>2.4 Características Físicas do <i>Bambusa vulgaris</i></b>	<b>15</b>
<b>2.5 Características Mecânicas do <i>Bambusa vulgaris</i></b>	<b>16</b>
2.5.1 Resistência à tração característica do <i>Bambusa vulgaris</i>	18

2.5.2	Tensão Admissível ou de calculo à tração do <i>Bambusa vulgaris</i>	19
2.5.3	Deformação transversal admissível para vigas de concreto com reforço de bambu	19
<b>2.6</b>	<b>Aderência</b>	<b>19</b>
2.6.1	Tensão de aderência de cálculo do bambu-concreto	21
2.6.2	Ancoragem das taliscas de bambu	25
	<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>26</b>
	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b>	<b>26</b>
3.1.1	Corte e aproveitamento do bambu	29
3.1.2	Concreto	32
3.1.3	Caracterização das vigas usadas nos ensaios	32
<b>3.2</b>	<b>Métodos</b>	<b>34</b>
3.2.1	Determinação do teor de umidade e densidade	34
3.2.2	Determinação da resistência à tração característica	35
3.2.3	Determinação do módulo de elasticidade característico	39
3.2.4	Determinação da tensão de tração e deformação admissíveis ou de cálculo	41
<b>3.3</b>	<b>Dimensionamento de vigas de concreto reforçadas com aço</b>	<b>42</b>
3.3.1	Flexão	42
3.3.2	Cisalhamento – Determinação da armadura transversal	49
<b>3.4</b>	<b>Cálculo das deformações verticais das vigas</b>	<b>51</b>
3.4.1	Vigas de seção transversal retangular de concreto reforçado com aço liso	53
<b>3.5</b>	<b>Abertura máxima de fissuras</b>	<b>56</b>
3.5.1	Verificação de fissuras	57

<b>3.6</b>	<b>Caracterização do ensaio para verificação experimental</b>	58
	<b>CAPÍTULO 4</b>	59
	<b>DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO COM REFORÇO DE BAMBU</b>	59
<b>4.1</b>	<b>Dimensionamento</b>	59
4.1.1	Equações para o dimensionamento	60
4.1.2	Parâmetros usados para o dimensionamento	64
4.1.3	Cálculo do máximo momento resistente da seção	64
4.1.4	Dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu para $\rho = 1\%$ .	68
4.1.5	Dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu para $\rho = 2\%$ .	69
4.1.6	Dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu para $\rho = 3\%$ .	70
<b>4.2</b>	<b>Cisalhamento - Cálculo do reforço vertical</b>	72
4.2.1	Dimensionamento do reforço vertical	73
<b>4.3</b>	<b>Verificação do comprimento de ancoragem das taliscas de bambu</b>	75
<b>4.4</b>	<b>Determinação da deformação das vigas reforçadas com bambu</b>	76
4.4.1	Considerações de cálculo	76
4.4.2	Exemplo 2 – Verificação da deformação vertical	77
<b>4.5</b>	<b>Dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu, em função da deformação vertical admissível</b>	81
4.5.1.	Viga bi-apoiada	83
4.5.2	Vigas em balanço	83
<b>4.6</b>	<b>Verificação de fissuras</b>	84
4.6.1	Determinação da carga de ruptura	86

<b>4.7</b>	<b>Análise comparativa entre vigas de concreto reforçadas com aço liso e com reforço de bambu</b>	<b>86</b>
	<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>90</b>
	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>90</b>
<b>5.1</b>	<b>Verificação Experimental</b>	<b>91</b>
5.1.1	Procedimentos	91
5.1.1.1	Elaboração dos concretos usados	91
5.1.2	Preparação do ensaio	91
5.1.3	Ensaio da viga 3	92
<b>5.2</b>	<b>Resultados</b>	<b>94</b>
5.2.1	Resultados teóricos para viga 3	94
5.2.2	Resultado Experimental obtido para viga 3	98
5.2.3	Análise dos resultados teórico e experimental viga 3	99
5.2.4	Resultados teóricos para a viga 2 – $\rho = 2\%$	99
5.2.5	Resultado experimental para viga 2	103
5.2.6	Análise entre os resultados teórico e experimental	103
5.2.7	Resultado teórico para a viga 1 – $\rho = 1\%$	105
5.2.8	Resultado experimental para a viga 1	108
5.2.9	Análise entre os resultados teórico e experimental	108
5.2.10	Resultado teórico para a viga 3.1 – $\rho = 3\%$	109
5.2.11	Resultado experimental para a viga 3.1	114
5.2.12	Análise comparativa entre os resultados teórico e experimental para a viga 3.1	115
5.2.13	Resultado teórico para a viga 4	116
5.2.14	Resultado experimental para a viga 4	119
5.2.15	Análise entre os resultados teórico e experimental	120

5.2.16	Comparação entre resultados experimentais das vigas 3.1 e 4	120
<b>CAPÍTULO 6</b>		122
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES</b>		122
6.1	<b>Tabelas de dimensionamento para uso prático</b>	123
	<b>Referências bibliográficas</b>	132
	<b>Apêndice</b>	136

## Lista de Figuras

Figura	2.1	Viga bi apoiada (trajetória das tensões principais)	5
Figura	2.2	Viga bi apoiada com reforço de bambu	5
Figura	2.3	Planta de bambu completa	6
Figura	2.4	Corte longitudinal do <i>Bambusa vulgaris</i> .	8
Figura	2.5	Variação da fração volumétrica das fibras do colmo de bambu em função da espessura das paredes	9
Figura	2.6	Gráfico mostrando a variação do percentual de fibras em função da espessura do colmo de <i>Bambusa Vulgaris</i>	9
Figura	2.7	Modelo dos diversos tipos de reforço de bambu	10
Figura	2.8	Construção de galpões no Vietnã	11
Figura	2.9	Gráfico representativo da distribuição normal ou de Gauss para probabilidade de 95%	18
Figura	2.10	Curvas esquemáticas tensão de aderência x deslocamento e estágios da aderência aço concreto	20
Figura	2.11	Talisca de bambu mergulhada em concreto	22
Figura	2.12	Gráfico mostrando o valor correspondente à tensão de arrancamento para um deslocamento de 0,1mm	23
Figura	3.1	Seção transversal do colmo de <i>Bambusa vulgaris</i> e a seção transversal padrão das taliscas	27
Figura	3.2	Detalhe da seção transversal da espessura total do <i>Bambusa Vulgaris</i> e da talisca usada	27
Figura	3.3	Desenho dos corpos de prova para determinação do teor de umidade e da densidade	28
Figura	3.4	Amostras para determinação do teor de umidade e da densidade	28
Figura	3.5	Perspectiva do corpo de prova	28
Figura	3.6	Vista frontal do corpo de prova	28

Figura	3.7	Fotos dos corpos-de-prova (parte mediana com nó)	29
Figura	3.8	Talisca de bambu usada como reforço	30
Figura	3.9	Fabricação dos estribos de bambu	30
Figura	3.10	Detalhe do estribo de bambu para as vigas 1, 2 e 3	31
Figura	3.11	Armações de bambu para as vigas 1, 2 e 3	31
Figura	3.12	Viga de concreto com reforço de bambu - $\rho = 1\%$ , cortes transversal e longitudinal	33
Figura	3.13	Viga de concreto com reforço de bambu - $\rho = 2\%$ , cortes transversal e longitudinal	33
Figura	3.14	Viga 3 e 3.1 – Viga de concreto com reforço de bambu $\rho = 3\%$ , cortes transversal e longitudinal	33
Figura	3.15	Viga 4 – Viga de concreto com reforço de aço - Corte transversal e longitudinal	34
Figura	3.16	Ensaio à tração do bambu	36
Figura	3.17	Detalhe do ensaio de tração	36
Figura	3.18	Detalhe do rompimento do corpo-de-prova no nó	37
Figura	3.19	Gráfico do ensaio Tensão x Deformação para uma vareta de bambu	39
Figura	3.20	Domínio de deformação – Estado limite último	42
Figura	3.21	Distribuição de tensões no concreto armado	43
Figura	3.22	Diagrama de tensões simplificado	44
Figura	3.23	Curvatura de um elemento fletido	51
Figura	3.24	Modelo de ensaio usado - ensaio de Stuttgart	58
Figura	3.25	Características dos diagramas verificados nos ensaios	58
Figura	4.1	Distribuição de tensões de viga de concreto reforçada com bambu.	60
Figura	4.2	Limites de dimensionamento para vigas de concreto com reforço de <i>Bambusa vulgaris</i>	63
Figura	4.3	Determinação do valor de $z$ - Para $\rho = 1\%$ , $z = d - 0,4.x$	67

Figura	4.4	Determinação do valor de $z$ - Para $1\% < \rho < 2\%$ , $z_1 = 3/4.d$	67
Figura	4.5	Determinação do valor de $z$ - Para $2\% < \rho \leq 3\%$ , $z_1 = 2/3.d$	67
Figura	4.6	Detalhamento da viga em estudo – Corte transversal e longitudinal.	73
Figura	4.7	Gráfico que representa a relação entre o momento ( $M_d$ ) calculado pela equação 4.14, e o momento ( $M$ ) correspondente ao momento da flecha admissível.	82
Figura	4.8	Representação gráfica dos comportamentos das vigas de concreto com reforço de aço, com $A_{s\text{mín-efetiva}}$ , e com reforço de bambu $\rho = 3\%$	89
Figura	5.1	Viga instrumentada para o ensaio à flexão pura	92
Figura	5.2	Abertura da 1ª fissura com abertura inferior a 0,2 mm	92
Figura	5.3	Abertura da 2ª fissura - abertura aproximada de 0,4 mm. Carga de ruptura.	93
Figura	5.4	Destruição completa da viga para verificação da posição do reforço	93
Figura	5.5	Seção transversal da viga 3, após ruína para verificação da posição da armação de bambu	94
Figura	5.6	Gráfico que representa as deformações verticais correspondentes aos resultados experimental e teórico em função das cargas.	99
Figura	5.7	Seção transversal da viga 2, após ruína, para verificação da posição da armação de bambu	100
Figura	5.8	Gráfico das deformações verticais correspondentes aos resultados experimental e teórico em função das cargas	104
Figura	5.9	Seção transversal da viga 1, após destruição completa para verificação da posição da armação de bambu.	105
Figura	5.10	Gráfico carga x flecha dos resultados experimental e teórico, viga 1	108
Figura	5.11	Ensaio da Viga 3.1.	109
Figura	5.12	Corte transversal da viga 3.1	110

Figura 5.13	Gráfico comparativo dos comportamentos da viga 3.1	115
Figura 5.14	Gráfico comparativo dos comportamentos teórico e experimental da viga 3.1	115
Figura 5.15	Corte transversal da viga 4 após a ruptura	116
Figura 5.16	Gráfico mostrando o desempenho teórico e experimental da viga com reforço de aço	120
Figura 5.17	Gráfico que mostra o desempenho das duas vigas	120
Figura 6.1	Modelo de viga para o dimensionamento apresentado na Tabela 6.1.	123
Figura 6.2	Modelo da viga para o dimensionamento apresentado na Tabela 6.2.	125
Figura 6.3	Modelo da viga para o dimensionamento apresentado na Tabela 6.3	126
Figura 6.4	Modelo da viga para o dimensionamento apresentado na Tabela 6.4	127
Figura 6.5	Modelo da viga para o dimensionamento apresentado na Tabela 6.5.	128
Figura 6.6	Detalhe da aplicação de vigas, colunas e placas de concreto com reforço de bambu, em galpões de instalações rurais.	129
Figura 6.7	Estacas e mourão pré-moldados para cercas	129
Figura 6.8	Modelo de casa popular cujas vigas podem ser construídas com o material sugerido por este trabalho.	130

## Lista de Tabelas

Tabela	1.1	Consumo energético por material	3
Tabela	2.1	Dimensões das fibras para diferentes espécies de bambu	10
Tabela	2.2	Propriedades mecânicas do Bambusa Vulgaris Schard, com nó, colhido no Rio de Janeiro	18
Tabela	2.3	Resultado de pesquisa de ensaios de arrancamento de taliscas de bambu imersas em concreto	23
Tabela	2.4	Comparação entre as tensões de aderência de cálculo bambu – concreto e aço liso – concreto, para concretos de $f_{ck}$ de 15 MPa, 25 MPa e 35 MPa	24
Tabela	3.1	Medidas médias das taliscas de bambu usados nas vigas e o erro cometido	30
Tabela	3.2	Medidas médias dos estribos de bambu usados nas vigas e o erro cometido	30
Tabela	3.3	Resumo das propriedades físicas do Bambusa Vulgaris	35
Tabela	3.4	Dados dos resultados dos ensaios à tração da parte basal com nó. NPT- UFAL- equipamento EMIC	37
Tabela	3.5	Dados dos ensaios à tração do bambu – parte mediana com nó	38
Tabela	3.6	Dados dos ensaios à tração do bambu – parte do topo com nó	38
Tabela	3.7	Determinação dos valores médios dos módulos de elasticidade do Bambusa Vulgaris	40
Tabela	3.8	Determinação das áreas de aço em função das seções transversais das vigas, para os momentos $M_{dmáx} = M_{dlim3,4}$ , $f_{ck} = 20$ MPa	46

Tabela	3.9	Determinação das áreas de aço mínimas em função das seções transversais das vigas	48
Tabela	3.10	Determinação de $M_{dmin}$ .efetivo reforço de aço	49
Tabela	3.11	Modelo das vigas que serão dimensionadas	56
Tabela	3.12	Abertura máxima das fissuras características ( $w_k$ ), em função da classe de agressividade do concreto	56
Tabela	3.13	Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas	57
Tabela	4.1	Valores de $f_{ck}$ de acordo com os percentuais de bambu	63
Tabela	4.2	Determinação de $M_d$ - Momento de cálculo - $\rho = 1\%$	68
Tabela	4.3	Determinação de $M_d$ - Momento de cálculo - $\rho = 2\%$	69
Tabela	4.4	Determinação de $M_d$ - Momento de cálculo - $\rho = 3\%$	70
Tabela	4.5	Espaçamentos do reforço vertical para as vigas bi-apoiadas com cargas uniformemente distribuídas, $\rho = 1\%$	73
Tabela	4.6	Espaçamentos do reforço vertical para as vigas bi-apoiadas com cargas uniformemente distribuídas, $\rho = 2\%$	74
Tabela	4.7	Cálculo dos parâmetros para determinação da flecha da viga bi apoiada com reforço de bambu - $\rho = 3\%$	74
Tabela	4.8	Cálculo dos parâmetros para determinação da flecha da viga bi apoiada com reforço de bambu.	80
Tabela	4.9	Determinação do momento de fissuração da viga reforçada com bambu.	80
Tabela	4.10	Cálculo das flechas imediatas das vigas bi apoiadas com reforço de bambu em função dos carregamentos.	80
Tabela	4.11	Determinação de $M = M_d/1,9$ - Momento – Bambusa Vulgaris	88
Tabela	4.15	Resumo do dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu, $\rho = 3\%$ , figuras 4.13 e 4.14	94
Tabela	5.1	Composição dos concretos usados para os ensaios	91

Tabela	5.2	Cálculo do momento e da carga de serviço da viga 3	95
Tabela	5.3	Parâmetros 1 - para o cálculo da flecha da viga 3	95
Tabela	5.4	Parâmetros 2 - para o cálculo da flecha da viga 3	96
Tabela	5.5	Cálculo da flecha da viga -3, em função das cargas	96
Tabela	5.6	Cálculo da abertura de fissuras em função das cargas e as tensões médias correspondentes no concreto e no reforço de bambu e da carga de ruptura	97
Tabela	5.7	Determinação da carga de ruptura teórica	98
Tabela	5.8	Resultado experimental obtido no ensaio da viga 3	98
Tabela	5.9	Cálculo do momento e da carga de serviço da viga 2	100
Tabela	5.10	Parâmetros 1, para o cálculo da flecha da viga 2	101
Tabela	5.11	Parâmetros 2, para o cálculo da flecha	101
Tabela	5.12	Cálculo da flecha da viga 2 em função da carga	101
Tabela	5.13	Cálculo das aberturas de fissura teóricas para a viga 2	102
Tabela	5.14	Resultados experimentais de deformação específica e flecha observados no ensaio para a viga 2	103
Tabela	5.15	Cálculo do momento e da carga de serviço da viga 1	105
Tabela	5.16	Parâmetros 1 para o cálculo da flecha da viga 1	106
Tabela	5.17	Parâmetros 2 para o cálculo da flecha da viga 1	106
Tabela	5.18	Cálculo da flecha da viga 1, em função da carga	107
Tabela	5.19	Cálculo da abertura de fissuras da viga 1	107
Tabela	5.20	Resultados obtidos do ensaio apresentado para viga 1	108
Tabela	5.21	Cálculo do momento e da carga de serviço da viga 3.1	111
Tabela	5.22	Parâmetros para o cálculo da flecha da viga 3.1	111
Tabela	5.23	Parâmetros para o cálculo da flecha da viga 3.1	111
Tabela	5.24	Cálculo da flecha da viga - 3.1 em função das cargas	112

Tabela	5.25	Cálculo da abertura de fissuras em função da carga e as tensões médias correspondentes no concreto e no reforço de bambu e da carga de ruptura	113
Tabela	5.26	Determinação da carga de ruptura teórica	113
Tabela	5.27	Ensaio de Stuttgart da viga 3.1	114
Tabela	5.28	Cálculo da carga e momento de serviço da viga 4	116
Tabela	5.29	Parâmetros para o cálculo da flecha da viga 4	117
Tabela	5.30	Parâmetros para o cálculo da flecha da viga 4	117
Tabela	5.31	Cálculo da flecha da viga, em função da carga	117
Tabela	5.32	Cálculo das aberturas de fissuras e da carga da ruptura	118
Tabela	5.33	Ensaio de Stuttgart da viga 4	119
Tabela	5.34	Comparação das flechas entre as vigas 3.1 e 4	121
Tabela	6.1	Resumo do dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu, $\rho = 3\%$ , e $b_w = 12$ cm.	124
Tabela	6.2	Resumo do dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu, $\rho = 3\%$ e $b_w = 12$ cm.	125
Tabela	6.3	Resumo do dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu, $\rho = 3\%$ e $b_w = 12$ cm.	126
Tabela	6.4	Resumo do dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu, $\rho = 3\%$ e $b_w = 12$ cm.	127
Tabela	6.5	Resumo do dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu, $\rho = 3\%$ e $b_w = 12$ cm.	128

## Lista de Símbolo

$f_{ck}$	Resistência característica do concreto à compressão
$\mu m$	Micrometro
$\rho$	Rô – percentual de reforço
$z$	Braço de alavanca
$b_w$	Largura das vigas
$h$	Altura das vigas
$f_{bkt}$	Tensão de tração característica do bambusa vulgaris
$\gamma_m$	Coefficiente de segurança usado para o bambu
$f_{adu}$	Tensão de aderência última
$f_{ctd}$	Resistência à tração do concreto
$\eta$	Coefficiente usado para aderência das barras de aço
$F_{arr}$	Força de arrancamento
$l_b$	Comprimento reto de ancoragem
$T_{bm}$	Tensão de aderência média bambu – concreto
$u$	Perímetro de contato entre o reforço
$T_{bd}$	Tensão de aderência de cálculo bambu – concreto
$T_{bk}$	Tensão característica de aderência bambu – concreto
$B$	Base da talisca de bambu
$H$	Altura da talisca de bambu
$A_b$	Área de reforço bambu
$\pi$	Pi = 3,14
$r$	Raio da circunferência
$A_l$	Área lateral
$A_{lt}$	Área lateral total

$C_m$	Consumo de areia
$\rho_c$	Massa específica do cimento
$\rho_a$	Massa específica da água
$\rho_b$	Massa específica da brita
$\rho_m$	Massa específica da areia
$P_s$	Peso seco
$P_h$	Peso úmido
$h\%$	Teor de umidade em percentagem
$d$	Densidade absoluta
$M$	Massa
$V$	Volume
$\sigma_m$	Tensão de tração média do Bambusa Vulgaris
$E_b$	Módulo de elasticidade do Bambusa Vulgaris
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço
$\epsilon_b$	Deformação específica do Bambusa Vulgaris
$\sigma$	Tensão de tração
$\epsilon_{btk}$	Deformação de tração característica do Bambusa Vulgaris
$E_{btk}$	Módulo de elasticidade característico na tração do Bambusa Vulgaris
$\epsilon_c$	Encurtamento específico do concreto
$\epsilon_s$	Alongamento específico do aço
$f_{cd}$	Tensão de cálculo do concreto
$\gamma_c$	Coefficiente de segurança para o concreto
$\epsilon_{yd}$	Deformação de cálculo do aço
$f_{yd}$	Tensão de cálculo do aço
$f_y$	Tensão de escoamento do aço
$R_{cc}$	Resultante das tensões de compressão no concreto
$R_{st}$	Resultante das tensões de tração na armadura
$M_d$	Momento fletor de cálculo

<b>y</b>	Altura da parte do concreto comprimido aproximado por um retângulo
<b>A<sub>smin</sub></b>	Área de aço mínima de acordo com a NBR 6118:2004
<b>ℓ</b>	Vão da viga
<b>X</b>	Posição da linha neutra
<b>x<sub>lim</sub></b>	Posição limite da linha neutra
<b>V<sub>c</sub></b>	Força cortante
<b>τ<sub>c</sub></b>	Tensão provocada pela força cortante
<b>s</b>	Espaçamento dos estribos
<b>A<sub>sw</sub></b>	Área de aço da seção transversal dos estribos
<b>V<sub>sd</sub></b>	Força cortante de cálculo
<b>ρ<sub>sw</sub></b>	Taxa de armadura mínima (NBR 6118:2004)
<b>M(x)</b>	Momento fletor
<b>I</b>	Momento de inércia da seção transversal
<b>α</b>	Coefficiente que depende da seção transversal da viga
<b>Y<sub>t</sub></b>	Distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada
<b>I<sub>c</sub></b>	Momento de inércia da seção bruta
<b>I<sub>II</sub></b>	Momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II
<b>M<sub>a</sub></b>	Momento fletor na seção crítica do vão considerado, momento máximo no vão para vigas bi apoiadas
<b>M<sub>r</sub></b>	Momento de fissuração do elemento estrutural, cujo valor deve ser reduzido à metade no caso de utilização de barras lisas
<b>E<sub>cs</sub></b>	Módulo de elasticidade secante do concreto
<b>E<sub>s</sub></b>	Módulo de elasticidade do aço
<b>d</b>	Altura útil da viga
<b>q</b>	Carga uniformemente distribuída
<b>P</b>	Carga concentrada
<b>w<sub>k</sub></b>	Abertura máxima das fissuras características
<b>f<sub>b</sub></b>	Tensão última do bambu

<b><math>f_{bd}</math></b>	Tensão de cálculo do Bambusa Vulgaris
<b><math>M_d</math></b>	Momento fletor de cálculo
<b><math>d</math></b>	Altura útil da viga
<b><math>e</math></b>	Espessura do recobrimento de concreto
<b><math>e_{sb}</math></b>	Espessura do estribo de bambu
<b><math>h_{tb}</math></b>	Altura da talisca de bambu
<b><math>\alpha_e</math></b>	Razão entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto ou entre o do bambu e do concreto
<b><math>\alpha_c</math></b>	Coeficiente que depende das condições estáticas da viga, para vigas bi apoiadas com cargas uniformemente distribuídas $\alpha_c=5/384$

## Lista de Abreviaturas

<b>NBR 6118:2004</b>	Norma para o concreto armado
<b>NBR 7119:1997</b>	Norma para madeiras
<b>kN</b>	Quilonewton - $10^3$ N
<b>MPa</b>	Mega pascal – $10^6$ Pa
<b>GPa</b>	Giga pascal – $10^9$ Pa
<b><math>f_{ctk,sup}</math></b>	Resistência característica superior do concreto à tração
<b><math>f_{ct,m}</math></b>	Resistência à tração do concreto média
<b><math>M_{d,min.}</math></b>	Momento mínimo previsto pela NBR 6118:2004
<b><math>M_{d,min.efet.}</math></b>	Momento mínimo considerando o número de barras mínimo que se coloca efetivamente na viga
<b><math>f_{ct,inf}</math></b>	Resistência à tração direta do concreto
<b>Aço CA – 60</b>	Aço para concreto armado com tensão de escoamento de 600 Mpa

## Resumo

Esta pesquisa verifica a viabilidade técnica da utilização do *Bambusa vulgaris*, vegetal abundante no estado de alagoas, como substituto do aço liso, no reforço do concreto em vigas, para uso em construções rurais. O bambu vem sendo pesquisado a mais de cinqüenta anos, entretanto, existem poucos estudos sobre essa espécie com esta aplicação. A utilização de materiais renováveis e de baixo consumo de energia é fundamental em todas as áreas produtivas, principalmente o da construção civil, devido o alto consumo de energia que esta atividade requer. Esta opção além de reduzir custos, contribui para reduzir os efeitos da agressão ambiental que a produção do aço provoca. Emprega-se neste trabalho a metodologia usada e amplamente aceita do concreto armado, com as precauções que se deve ter com os materiais naturais, e de características mecânicas heterogêneas. Com a finalidade de se obter um material de melhor qualidade, o bambu foi caracterizado à tração com nó, usando-se  $2/3$  da espessura externa do colmo. As áreas de reforço são pré-determinadas, correspondendo a percentuais de reforço de 1%, 2% e 3%, em forma de varetas, de seção transversal constante de 0,6 cm x 1,00 cm. Verifica-se que o dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu, deve ser feito em função da sua deformação vertical, tendo em vista seu baixo módulo de elasticidade em relação ao aço. Para possibilitar o uso de forma simples e prática deste material, foram desenvolvidas tabelas com dimensionamento de vigas, que podem ser usadas em várias situações de carregamento, em construções rurais, ou pequenas construções.

Palavras-chave: *Bambusa Vulgaris*, concreto, vigas, reforço.

## Abstract

This research verifies the viability technique of the use of the *Bambusa vulgaris*, vegetal abundant in the state of alagoas, as substitute of the smooth steel, in the reinforcement of the concrete in beams, for use in agricultural constructions. The bamboo comes more than being searched the fifty years, however, exists few studies on this species with this application. The use of materials you renewed and of low consumption of energy it is basic in all the productive areas, mainly of the civil construction, which had the high consumption of energy that this activity requires. This option besides reducing costs, contributes to reduce the effect of the ambient aggression that the production of the steel provokes. The used and widely accepted methodology of the armed concrete is used in this work, with the precautions that if must have with the natural materials, and of heterogeneous mechanical characteristics. With the purpose of if getting a material of better quality, the bamboo was characterized to the traction with knot, using itself  $\frac{2}{3}$  of the external thickness of colmo. The reinforcement areas are daily pay-definitive, corresponding the percentages of reinforcement of 1%, 2% and 3%, in form of rods, cross-section constant of 0,6 cm x 1,00 cm. It is verified that the sizing of beams of concrete with reinforcement of bamboo, must be made in function of its vertical deformation, in view of its low modulus of elasticity in relation to the steel. To make possible the use of simple and practical form of this material, had been developed tables with sizing of beams, that can be used in some shipment situations, agricultural constructions, or small constructions.

Keywords: *Bambusa vulgaris*, concrete, beams, reinforcement.

# CAPÍTULO 1

---

## 1. ASPECTOS GERAIS

Nos últimos anos, a preocupação com a qualidade de vida e preservação ambiental tem sido tema constante em todas as áreas, principalmente na construção civil. Tal preocupação tem levado ao desenvolvimento e aplicação de materiais produzidos com reduzido consumo de energia e baixo índice de agressividade ambiental. Uma possibilidade de atendimento a esta preocupação está na substituição de produtos convencionais por outros com propriedades similares, que agregam tanto vantagens econômicas e sociais, quanto técnicas. Um exemplo deste material não convencional é o bambu.

O bambu pode ser utilizado para os mais diversos fins e das formas mais variadas. No setor da construção civil, seu uso é bastante difundido na Ásia e em países da América Latina, como Peru, Equador, Costa Rica e Colômbia, onde vários exemplos de edificações confirmam sua potencialidade. Embora seja possível executar uma construção apenas com bambu, costuma-se associá-lo a outros materiais, com a finalidade de melhor prevenir possíveis processos de degradação do material.

Para o uso do bambu em grande escala como material de construção economicamente viável e com possível industrialização, se faz necessário um estudo científico sistemático que leve em consideração a variabilidade da matéria-prima em termos de espécie e caracterização física e mecânica. Para este propósito, deve ser estudado o processo de plantação, colheita, cura, tratamento, e pós-tratamento, além de uma completa análise estatística das propriedades físicas e mecânicas dos colmos do bambu inteiro, de forma a caracterizar os bambus com confiabilidade. Os colmos do bambu possuem excelentes propriedades físicas e mecânicas, podendo ser considerado adequado para substituição do aço na fabricação de estruturas de concreto armado. Suas características de leveza, resistência, conteúdo das fibras, flexibilidade e facilidade de trabalho são ideais para diferentes propósitos tecnológicos.

Esse material vem revelando grandes vantagens estruturais, ambientais, estéticas e econômicas. Tem sido usado pela arquitetura/construção e design contemporâneos, através de estudiosos e criadores de arquitetura em bambu, tais como, Marcello Villegas, Oscar Hidalgo Lopes e Simon Vélez, todos colombianos.

No Brasil, o bambu ainda encontra-se em processo de difusão com o significativo trabalho de alguns arquitetos e pesquisadores. Alternativas de utilização de bambus se tornam cada vez mais interessante na busca pela sustentabilidade. Sendo o bambu um material de fácil cultivo, relativamente barato, de rápido crescimento e abundante, revela-se, um importante aliado para projetos de inclusão social.

## **1.1 - Objetivos**

### 1.1.1 – Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é apresentar um estudo de viabilidade técnica da substituição do aço liso pelo *Bambusa vulgaris*, na produção de vigas de concreto armado, para utilização em construções rurais ou pequenas construções.

### 1.1.2 – Objetivos específicos

1 – Caracterizar o *Bambusa vulgaris*, com nó, usando 2/3 da sua espessura externa.

2 – Elaborar um método de dimensionamento de vigas de concreto reforçadas com bambu para utilização em construções rurais, a partir do modelo já existente e amplamente confirmado do concreto armado.

3 – Apresentar mais uma utilidade para o *Bambusa vulgaris*, material renovável, de baixo consumo de energia, abundante no estado de Alagoas.

4 – Contribuir com um material que pode reduzir os custos de construções, trazendo benefícios ambientais e sociais, podendo ser usado em construções de casas populares e instalações comuns ao meio rural.

## 1.2 - Justificativa

O aço para ser obtido, consome grandes quantidades de energia fóssil, com emissão de gases que contribui para o efeito estufa. É um material cuja fabricação depende das jazidas de minério de ferro, as quais se constituem em fontes não renováveis de matéria-prima. Sua reciclagem também consome grande quantidade de energia, encarecendo de forma substancial o produto final. Sua substituição em diversas situações pode ser considerada uma alternativa viável para minimização dos impactos ambientais, com vantagens econômicas e sociais (Tabela 1.1). A ação humana depois da revolução industrial tem afetado o clima do planeta. Alerta-se para um possível aquecimento global gerado pela emissão de gases estufa como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (SILVA, 2006).

Uma vez que a engenharia deve ter como preocupação, também a melhoria da qualidade de vida da população, este trabalho visa contribuir com a aplicação de materiais alternativos na indústria da construção civil, a fim de reduzir custos em construções rurais e em edificações para população de baixa renda. Na atualidade, o bambu é o vegetal mais usado experimentalmente como reforço do concreto. Devido a sua tensão de tração relativamente alta, chegando a 382 MPa para *Bambusa tulda* (HIDALGO, 2003).

Ainda hoje, o bambu é avaliado com negligência apesar do seu baixo custo e abundância nos países tropicais. Neste trabalho usa-se o *Bambusa vulgaris* porque é a espécie que existe em abundância no estado de Alagoas. Além de ser uma planta que tem uma alta velocidade de crescimento, é um recurso natural renovável, diferentemente do aço. A utilização do *Bambusa vulgaris*, como substituto do aço liso em vigas de concreto armado, visa aproveitar esse recurso natural.

Tabela 1.1 - Consumo energético por material

<b>Material</b>	<b>Energia (MJ/m<sup>3</sup> por MPa)</b>
<b>Aço</b>	<b>1500</b>
Concreto	240
Madeira	80
<b>Bambu</b>	<b>30</b>

Fonte: JANSSEN (1995)

## CAPÍTULO 2

---

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Pesquisas mostram que os materiais não convencionais podem ter qualidades semelhantes as dos materiais tradicionais, com um menor custo, acarretando um menor impacto sobre o meio ambiente e, em alguns casos, adaptando-se a um rápido processo de fabricação. Os materiais não convencionais são também reconhecidos pelo seu valor em projetos sustentáveis de inclusão social. Sendo o bambu um material de fácil cultivo e de rápido crescimento, pode ser enquadrado como um importante aliado para o desenvolvimento sustentável.

#### 2.1 – Concreto

O concreto é um material composto por água, cimento e agregados. Esses materiais associados entre si resultam em pasta quando temos a mistura apenas de cimento e água, argamassa quando a pasta mais agregado miúdo, e concreto quando se associa a argamassa e o agregado graúdo.

Para a utilização estrutural, o concreto sozinho não é adequado como elemento resistente, pois enquanto tem uma boa resistência à compressão, pouco resiste à tração (considera-se a resistência à tração 1/10 da resistência à compressão), embora esse tipo de solicitação quase sempre esteja presente nas estruturas das construções usuais (SUSSEKIND, 1984). Os exemplos mais comuns são os elementos fletidos, nos quais em uma mesma seção transversal, há tanto tensões de compressão quanto de tração (Figura 2.1). Observa-se que no trecho submetido à flexão pura, dependendo da intensidade dos esforços atuantes, podem ocorrer fissuras, levando a peça à ruína. Para aumentar a resistência do elemento é importante a associação do concreto com um material que tenha resistência à tração e sejam mais deformáveis. Tendo sido usado de forma mais comum o aço, é proposto neste trabalho a sua substituição pelo bambu (Figura 2.2).

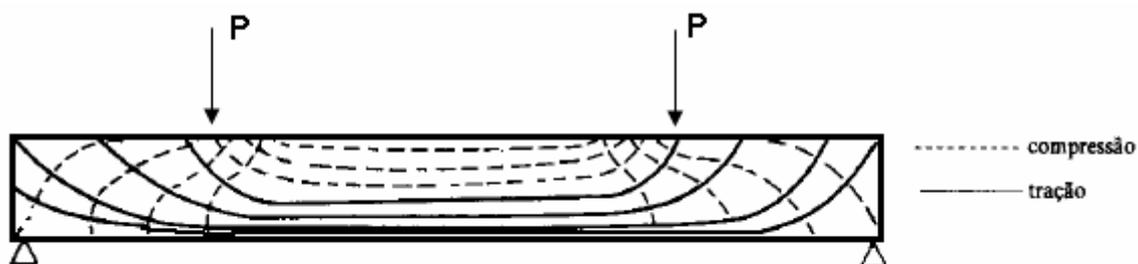


Figura 2.1 – Viga bi-apoiada (trajetória das tensões principais) – (TIMOSCHENKO; GERE, 1994).

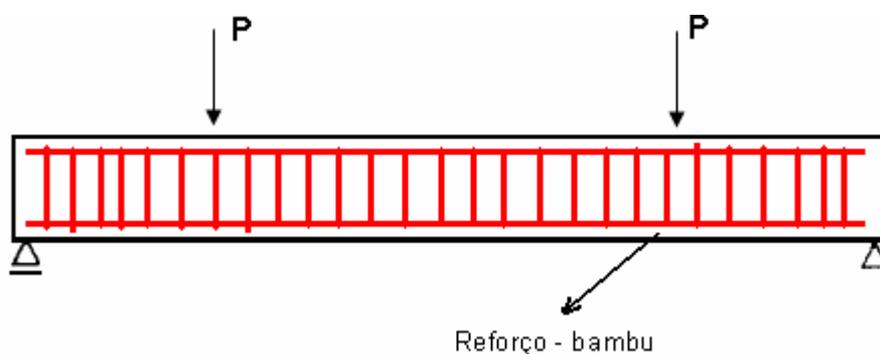


Figura 2.2 – Viga bi-apoiada com reforço de bambu

## 2.2 – *Bambusa vulgaris schard*

O bambu é uma planta conhecida desde a Antigüidade e tem sido utilizada para os mais diversos fins, principalmente nos países asiáticos. O bambu representa o sustento de mais de um bilhão de pessoas, principalmente nas áreas rurais pobres de países em desenvolvimento da Ásia, América do Sul e Central (LIESE E VELEZ, 1998). Sua aplicação se dá em diversos setores de produção, gerando emprego e renda na área de artesanato, mobiliário, decoração interior, paisagismo, alimentação, laminado para forro e piso; uso do carvão para tratamento da água, uso do ácido piro lenhoso como insumo para a agricultura, construção civil (solos-fibra), fibrocimento, elementos estruturais e armações no concreto substituindo o aço. Entre as qualidades do bambu que têm atraído a atenção de

pesquisadores e empresários, está a rápida propagação e o crescimento acelerado da planta. De acordo com Vélez (2001), o bambu cresce 30% mais rápido do que as espécies de árvores consideradas como de rápido crescimento, e graças a esse crescimento vigoroso, seu rendimento em peso por hectare ao ano é 25 vezes maior do que o da madeira. Pesquisas sobre o bambu confirmam, por exemplo, que sua fibra é um excelente substituto para a fibra inorgânica como o asbesto, que continua a ser usado no Brasil, apesar de ser banido em diversos países desenvolvidos.

O bambu é constituído pelo colmo (tipo de tronco, parte aérea da planta) e na parte subterrânea por rizomas (também tipo de caule) e raízes. Sua distribuição subterrânea em forma de uma malha de rizomas faz do bambu um recurso para conservação do solo e contenção de encostas.

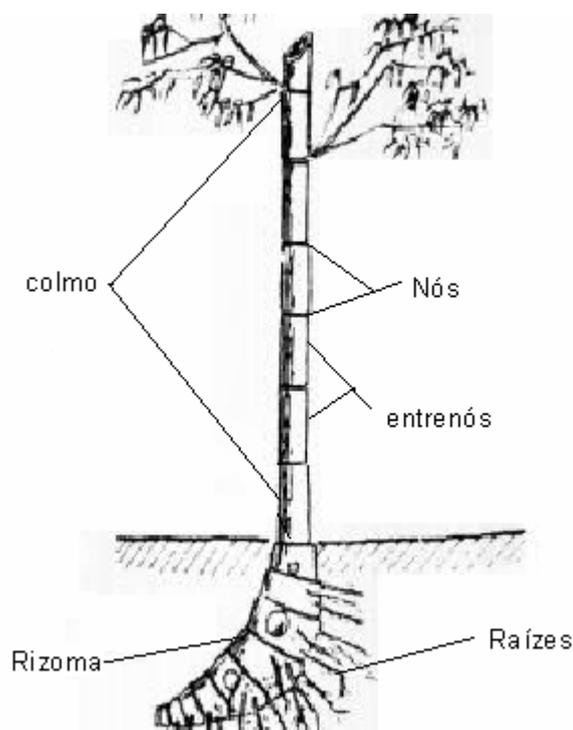


Figura 2.3 – Planta de bambu completa – (HIDALGO, 2003).

O colmo é a parte que interessa neste trabalho. Tem forma cilíndrica oca e apresenta uma seqüência de nós. Suas fibras naturais são fortes, o que resulta em ótimas propriedades estruturais.

Citam-se aqui cinco espécies mais conhecidas de mais de 1200 (LONDOÑO, 1999).

- *Guadua angustifolia* se difere principalmente pela grossura dos colmos. Tem maior importância cultural e econômica no Equador, Venezuela e principalmente Colômbia; mas também pode ser encontrado por todo Brasil. É a espécie que apresenta maior resistência e, portanto, mais adequada para a construção.
- *Phyllostachys aurea*, aqui chamada de "bambu-mirim", bastante adaptável ao clima temperado.
- *Phyllostachys moso*, muito aproveitado na China para alimentação e é a espécie utilizada para fabricação de laminados de bambu.
- *Dendrocalamus asper*, encontrado em maior escala no RJ e MS, popularmente chamado de "bambu-balde" por seu tamanho (chega até 25 cm de diâmetro e 25 metros de altura).
- ***Bambusa vulgaris schard* (*Bambusa Vulgaris Scharader ex Wendland*)** é encontrado em todo o mundo, especialmente na China, Madagascar, Ásia, Austrália, África, América Central e do Sul. Os colmos são eretos embaixo, arqueando no topo, altura entre 10 m e 20 m e diâmetro de 4 cm e 10 cm. É muito usado para a construção de barcos, como estacas verticais, construções temporárias, como matéria-prima para papel, etc. É o bambu de maior ocorrência no Brasil, e é muito susceptível ao ataque de fungos e insetos, principalmente do *Dinoderus minutus* (KURIAN e KALAM, 1977).

### 2.2.1 - Características dos colmos

Os colmos são formados por cascas, de modo geral cilíndricas, esbeltas, ocos (ver Figura 2.4). O espaço vazio dentro do colmo é denominado cavidade, as quais são separadas uma das outras por diafragmas que aparecem externamente como nós, de onde saem os galhos e as folhas. A posição do colmo entre dois nós é chamada internó, os quais possuem uma parede de espessura variável. Os colmos diferem segundo a espécie em comprimento, diâmetro, espessura das paredes, e distância internodal. Alguns colmos possuem poucos centímetros de altura e poucos milímetros de diâmetro, outros podem alcançar até 30 m de altura e diâmetros de até 15 cm (GHAVAMI e MARINHO, 2001).

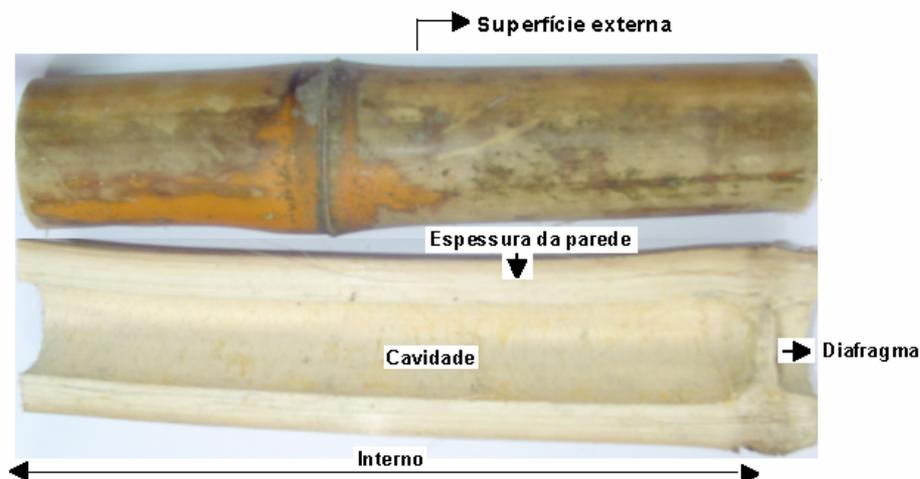


Figura 2.4 – Corte longitudinal de parte do colmo de *Bambusa vulgaris*.

A estrutura do bambu mostra que ele é um material compósito, constituído de fibras longas e alinhadas de celulose, imersas em uma matriz de lignina (GHAVAMI et al., 2000). Observando-se de forma detalhada a seção transversal de um colmo de bambu, verifica-se que as fibras se concentram à medida que se aproxima de sua superfície externa, isto caracteriza o bambu como um FGM (Function Gradation Material), o que faz com que o material possa resistir às cargas de vento, que são a solicitação mais constante durante a vida do material na natureza. A seção transversal de uma parede de bambu é formada por:

- Superfície exterior dura e lustrosa, a qual evita parcialmente a perda de água do colmo.
- Células parenquimais, onde são armazenados os nutrientes.
- Feixes vasculares contendo:
  - a) vasos que conduzem a água.
  - b) Tubos condutores de seiva.
  - c) Fibras de paredes grossas compostas de celulose. Esta região conhecida pelo nome de esclerênquima é a responsável pela resistência dos colmos.

Microscopia por Processamento Digital de Imagens (PDI), cuja imagem de variação das fibras na espessura do colmo é apresentada na Figura 2.5.

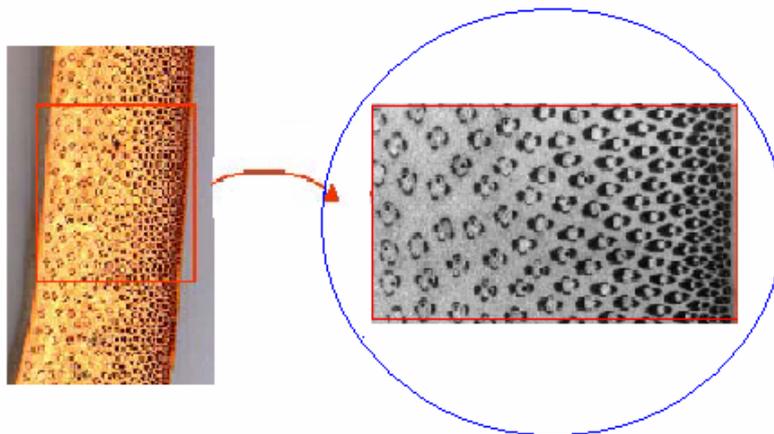


Figura 2.5 - Variação da fração volumétrica das fibras do colmo de bambu em função da espessura das paredes(GHAVAMI e MARINHO, 2001).

Observa-se na Figura 2.6, que a concentração de fibras é muito maior na parte externa do bambu, de modo que cerca de 80% das fibras concentram-se nos 2/3 da espessura externa.

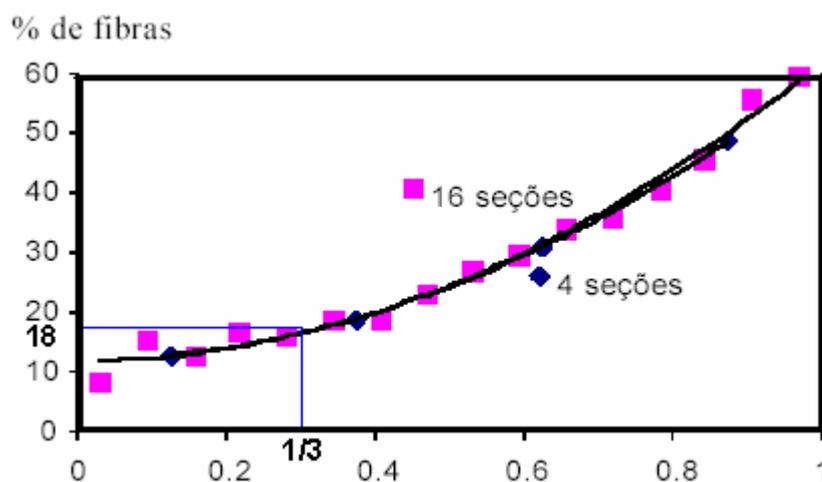


Figura 2.6 – Gráfico que mostra a variação do percentual de fibras em função da espessura do colmo de *Bambusa vulgaris* (GHAVAMI, 2001).

As fibras são caracterizadas pela sua forma delgada. Seu comprimento e espessura influenciam na resistência mecânica dos colmos. Entre 78 espécies de bambu analisadas por diferentes autores, um amplo número de comprimento de

fibras tem sido encontrado: desde 1,04 mm em *Phyllostachys nigra* até 2,64 mm em *Bambusa vulgaris* (GROSSER; LIESE, 1971). Na Tabela 2.1, resumem-se os valores de comprimentos de fibras para sete diferentes espécies.

Tabela 2.1 – Dimensões das fibras para diferentes espécies de bambu

<b>Espécies</b>	<b>Comprimento (mm)</b>	<b>Largura (µm)</b>
<i>Bambusa multiplex</i>	2,2	14
<i>Bambusa tulda</i>	1,45	24
<b><i>Bambusa vulgaris</i></b>	<b>2,64</b>	<b>10</b>
<i>Guadua angustifolia</i>	1,6	11
<i>Phyllostachys edulis</i>	1,56	13
<i>Phyllostachys nigra</i>	1,04	10
<i>Phyllostachys reticulata</i>	1,56	13

Fonte: GHAVAMI (2001).

### 2.3 – Material concreto reforçado com bambu

As pesquisas mostram que o uso do bambu como reforço do concreto pode ser dividido em três métodos, conforme ilustra a Figura 2.7. O primeiro consiste no uso de colmos de bambu de pequeno diâmetro, o segundo método, no uso de taliscas ou varetas de bambu de dimensões previamente determinadas e o terceiro método, no uso de cabos; uma técnica chinesa milenar, que foi introduzida por Hidalgo, na Colômbia, em 1974.

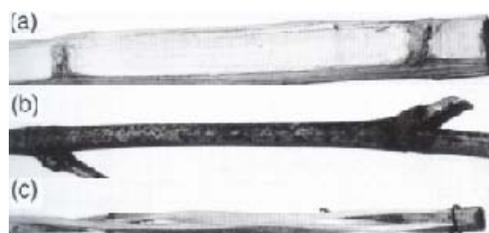


Figura 2.7 – Modelo dos diversos tipos de reforço de bambu (HIDALGO, 2003).

O estudo do uso de bambus de pequenos diâmetros e taliscas como reforço do concreto vem desde 1914, quando H.K. Cohow publicou o primeiro experimento nesta área, como tese no Instituto de Tecnologia de Massachusetts nos EUA. Em

1935, foi publicado na Alemanha por K. Datta no Technische Hochschule At Stutteart sob a direção do Prof. Graf, experimento com taliscas de bambu e estribo de aço. Em 1936, o Imperial Forestry Institute na Inglaterra publicou experimentos com o uso de bambu como reforço do concreto em construções. Desde então, muitas investigações nesta área foram publicadas, particularmente por estudantes de escolas de Engenharia de diferentes Universidades das Américas, Ásia e Europa, de acordo com suas espécies nativas. Muitos desses trabalhos não tiveram valor técnico porque não foi incluído o nome científico da espécie usada na pesquisa, provavelmente porque se achava que todas as espécies de bambu tinham as mesmas características mecânicas (HIDALGO, 2003). Este foi o erro de muitas pesquisas nesta área realizadas até o início da década de 70, o de considerar os bambus iguais, se comportando como madeiras comuns. A mais importante e extensa pesquisa do uso do bambu como reforço do concreto, já publicado, foi conduzida por H. E. Glenn em 1950, no Clemson Agricultural College of South Carolina. Esta pesquisa foi publicada em maio de 1950. Neste trabalho foram construídas edificações de médio porte, com todos os seus elementos produzidos com concreto reforçados com bambu. Construções de galpões de concreto com reforço de bambu foram produzidas no Vietnã como mostra a Figura 2.8. Alguns erros foram cometidos e o resultado não foi satisfatório (HIDALGO, 2003).



Figura 2.8 – Construção de galpões no Vietnã (HIDALGO, 2003)

Em todos os estudos publicados do uso do bambu como reforço do concreto, em colmos de pequenos diâmetros, taliscas, ou cabos, tem ampla demonstração de que é viável, mas apresenta alguns problemas que devem ser contornados.

### **2.3.1 – Principais recomendações para o uso do bambu como reforço do concreto**

As principais recomendações de GLENN, (1950) e JANSSEN, et al (1995), para o uso do bambu como reforço do concreto são as seguintes:

1 – Usar colmos de bambu com cerca de três anos de idade, isto é observado pela coloração do mesmo. O corte deverá ser feito quando o bambu apresentar cor marrom-amarelada;

2 – Deverá ser cortado e secado por um mínimo de três semanas a um mês, colocados de pé, até atingir uma umidade em torno de 15%;

3 – As taliscas de bambu usadas como reforço de concreto devem ter largura máxima de 19 mm. Observa-se, no entanto, que taliscas muito finas reduz a capacidade resistente do material.

4 – Devem-se dar um espaçamento apropriado entre as taliscas do reforço, para não afetar a aderência bambu-concreto;

5 – A estrutura de concreto com reforço de bambu é governada pela sua resistência à flexão. Usualmente, se indica que o valor de deflexão nos elementos, corresponde a aproximadamente 1/360 do comprimento do vão. Este valor contribui como fator de segurança contra a ruptura do elemento;

6 - O valor da tensão de aderência entre as taliscas de bambu e o concreto é, cerca de 0,50 MPa.

Dos três métodos citados de utilização do bambu como reforço do concreto o mais eficiente é o de cabos de bambu (HIDALGO, 2003). Para este propósito os cabos são confeccionados com largura de 2 cm e espessura de 3 mm. Esta prática já é conhecida pelos chineses há milênios, pois usam esses cabos para sustentação de pontes com vãos de até 100 m. Segundo esta técnica 70% da espessura das

paredes dos colmos de bambu é descartável. Além de ser a parte mais frágil, é mais susceptível aos ataques de insetos e é a responsável pelo inchamento do bambu quando em contato com a água do concreto. Os três milímetros da parte externa da parede do bambu têm resistência cerca de três vezes maior que o restante do colmo (HIDALGO, 2003). Os cabos são confeccionados de duas formas, simplesmente por torção de três ou mais cabos, ou em forma de trança, seguindo o modelo das tranças dos cabelos das mulheres. Outro fator importante no uso de cabos de bambu é a aderência que aumenta significativamente em relação aos outros métodos. Teste de aderência com cabos de bambu como reforço de concreto chegou a cerca de 1,8 MPa (HIDALGO, 2003).

JANSSEN (1995) propõe um método de dimensionamento simplificado baseado nos percentuais de reforço  $\rho = 1\%$  e  $2\%$ . Sejam como elementos de paredes, vigas, teto, piso, etc. Afirma também que no concreto é comum o aço ter uma tensão de tração de 160 MPa, e o bambu uma tração de 20 MPa, considerando esses valores tem-se uma relação de 8:1. Sendo que o peso específico do aço é cerca de 7850 Kgf/m<sup>3</sup> e do bambu de 500 Kgf/m<sup>3</sup>, dando uma relação de 16:1.

Considera-se que o momento fletor das vigas reforçadas com aço para um percentual de 0,60% de reforço é o seguinte:

$$M = 0,9 \cdot h \cdot 0,6 \cdot \frac{b \cdot h}{100} \cdot 140 = 0,76 \cdot b \cdot h^2 \quad 2.1$$

Para o reforço de bambu com percentual de reforço de 4%, tem-se:

$$M = 0,75 \cdot h \cdot 4 \cdot \frac{b \cdot h}{100} \cdot 20 = 0,60 \cdot b \cdot h^2 \quad 2.2$$

Sendo b e h em cm.

Isto significa que para um percentual de bambu de 4%, JANSSEN (1995), considera que o valor de z (braço de alavanca)  $z = 0,75 \cdot h$ , enquanto que para o aço  $z = 0,9 \cdot h$ . Observa-se que essa comparação é feita com um percentual de aço de  $\rho = 0,6\%$  e de bambu de  $\rho = 4\%$ . Comparando os valores dos momentos observa-se que o momento da viga reforçada com bambu é 78% da mesma viga reforçada com aço.

$$\frac{0,76bh^2}{0,60bh^2} \cdot 100 = 78\%$$

2.3

Considera que, de modo geral, a tensão do aço é cerca de sete vezes maior que o reforço de bambu, e o módulo de elasticidade do aço é cerca de dez vezes maior. Em consequência disso, as deformações das vigas com reforço de bambu é cerca de 1,5 vezes as mesmas vigas com reforço de aço. Considera-se para o aço uma deformação de  $0,67 \times 10^{-3}$  e para o bambu  $1,0 \times 10^{-3}$ .

1 – Uso de betume - Consiste em mergulhar as taliscas ou colmos de pequenos diâmetros de modo a criar uma camada impermeabilizante dificultando a penetração da água do concreto no bambu, e desta forma reduzindo o inchamento do mesmo.

2 – Uso de betume, mas antes se colocam pregos de 25 mm nas faces do reforço de bambu espaçados de 75 mm. Os pregos garantem a aderência.

3 – Uso da metade externa da parede do bambu, que é mais resistente e tem maior módulo de elasticidade, devido ao alto teor de celulose. Sugere também o uso de cabos de bambu segundo o modelo chinês. Isto garante um acréscimo considerável na tensão de aderência.

Este estudo apresenta discordância de JANSSEN (1995). Inicialmente no que diz respeito ao percentual máximo de reforço de bambu. Neste trabalho verifica-se que o percentual máximo admitido é de 3%. Acima desse percentual o reforço se aproxima da linha neutra e não trabalha a tração.

Quanto ao uso do betume, verifica-se que esse material não é adequado para garantir uma melhor aderência bambu-concreto, além de não ser adequado ecologicamente.

### **2.3.2 – Durabilidade**

O maior questionamento sobre o bambu como reforço do concreto é a sua durabilidade. O concreto de modo geral é alcalino,  $pH = 13$ , esse valor é alto para o bambu. A alcalinidade destrói as fibras de celulose, conseqüentemente depois de alguns anos ocorrem mudanças dentro da massa das fibras de celulose, porque diminui sua coesão. Isto ocorre em compósitos de fibro-cimento com fibras de bambu com cerca de 1 mm de diâmetro em contraposição a taliscas de bambu com cerca de 4 mm x 10 mm.

Foram observados trabalhos em mais de uma década e não se viu sinal de fissuras ou qualquer dano relacionado com a perda de resistência ocasionada pela fragilidade das taliscas de bambu (JANSSEN, 1995).

Segundo ROSA et al, (2006), experiência realizada com o bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*, imersos em solução de hidróxido de cálcio durante 60 ciclos, não apresentou redução nos valores de resistência e no módulo de elasticidade.

### **2.4 – Características físicas do *Bambusa vulgaris***

O bambu é formado essencialmente por feixes de fibras longitudinais unidas fortemente por uma substância aglutinante. Considera-se o bambu um material ortotrópico (GHAVAMI, 2001). Entre as características físicas que são necessárias para caracterizar o bambu destacam-se o teor de umidade, a densidade e o peso específico, parâmetros que influenciam a resistência do bambu (HIDALGO, 2003).

O teor de umidade do bambu natural varia de 13% a 20%, dependendo do clima e da umidade local. É um material higroscópico, dilatando-se com o aumento de umidade e contraindo-se com a perda de água. O teor de umidade adequado para ser usado no bambu é em torno de 12% a 15% (GHAVAMI, 2001).

A densidade do bambu depende da sua estrutura anatômica, crescendo da camada mais interna para a parte externa do colmo, e ao longo do colmo cresce da base para o topo (HIDALGO, 2003).

De acordo com (LIESE, 1998), cerca de 50% das fibras das paredes do colmo estão localizadas no terço externo das paredes do colmo. Isto indica que a resistência das paredes do colmo aumenta gradualmente da parte interna para a parte externa. O peso específico dos nós é geralmente mais alto que os internós devido a menor quantidade de parênquima e mais fibras nas paredes. De modo geral, existe uma relação direta entre o peso específico e a resistência do bambu.

Um fator que pode dificultar o seu uso como substituto do aço como reforço do concreto armado é o seu coeficiente de dilatação. O coeficiente de dilatação no sentido longitudinal ( $\alpha = 1,0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), valor muito próximo ao do concreto, porém, é quatro vezes maior no sentido transversal. Entretanto, não se verifica como empecilho para variações de temperaturas usuais (GEYMAYER; COX, 1970). As propriedades físicas de um colmo de bambu, como cor, altura total, distância entre os nós, diâmetro e espessura da parede são relacionadas com a espécie e a idade do bambu (LIESE, 1986). Entre as características físicas que são necessárias para caracterizar o bambu, destaca-se o teor de umidade a densidade e o peso específico. Para o uso apropriado de qualquer espécie de bambu é importante o estudo dessas propriedades.

## **2.5 – Características mecânicas do Bambusa Vulgaris**

As características mecânicas do bambu são influenciadas principalmente por fatores, tais como:

- a) Espécie;
- b) Idade;
- c) Solo do bambusal;
- d) Condições climáticas;
- e) Época da colheita;
- f) Teor de umidade;
- g) Localização dos colmos de bambu em relação ao comprimento do mesmo;
- h) Presença ou não de nós.

A resistência à compressão na direção das fibras é juntamente com a resistência a tração, a resistência ao cisalhamento perpendicular às fibras e o módulo de elasticidade, fundamentais para a caracterização mecânica do bambu que será usado como elemento de reforço da matriz de concreto. Devido à orientação das fibras serem paralelas ao eixo do colmo, o bambu resiste mais à tração do que à compressão.

O módulo de elasticidade, as resistências à tração, compressão e cisalhamento variam em função da localização do colmo e do fato do corpo-de-prova ter ou não nós, para um mesmo bambu.

GHAVAMI E HOMBEC (1981), BERALDO (1987) observaram que na maioria dos ensaios, o rompimento dos corpos-de-prova aconteceu nos nós, por ser um ponto de descontinuidade das fibras, ocorrendo mudanças que alteram sua seção, sendo um ponto de concentração de tensões.

A resistência à tração do bambu é bem mais alta que sua resistência à compressão. (GHAVAMI, 1995), (GHAVAMI; SOUZA, 2000), e (LIMA JR. et al, 2000) pesquisaram esta característica mecânica de diferentes tipos de bambus, tais como o *Dendrocalamus giganteus*, *Bambusa vulgaris*, *Guadua angustifolia*, chegando a valores compreendidos entre 40 MPa e 215 MPa.

A resistência ao cisalhamento do bambu, paralelo às fibras, é de modo geral, 8% da sua resistência à compressão (JANSSEN, 1995). (ATROPS apud ROBLES, 1981), afirma que a resistência ao cisalhamento aumenta com a redução da espessura da parede, ou seja, da base para o topo da peça de bambu. (GHAVAMI; TOLEDO FILHO, 1991) estudaram a resistência de cisalhamento normal às fibras em várias espécies de bambu e obtiveram para o *Bambusa vulgaris* um valor médio de 41,20 MPa para uma região sem nó. O módulo de elasticidade de corpos-de-prova de bambu sem nó apresenta valores superiores aos com nó (GHAVAMI, 1991).

Para a espécie *Bambusa vulgaris*, sem nó, o valor do módulo de elasticidade, varia entre 10 GPa e 15 GPa (LIMA JR. et al, 1996).

Se comparado com o módulo de elasticidade do aço, sendo  $E_s = 210$  GPa, verifica-se que o módulo de elasticidade do bambu é cerca de 20 vezes menor.

Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas do *Bambusa vulgaris schard*, com nó, colhido no Rio de Janeiro.

Parte do bambu (com nó)	Tração (MPa)	Compressão (MPa)	E - Mód. de Elast. tração (GPa)	Cisalhamento Transv. (MPa)
Base	131,60	37,50	8,46	39,00
Intermediária	106,10	39,50	8,50	42,50
Topo	145,60	42,00	9,45	42,00
<b>* Média</b>	<b>127,70</b>	<b>39,66</b>	<b>8,80</b>	<b>41,20</b>

Fonte: (GHAVAMI; TOLEDO FILHO,1991)

\* Os valores apresentados foram determinados considerando a espessura total dos colmos de bambu.

### 2.5.1 – Resistência à tração característica do *Bambusa vulgaris* ( $f_{bkt}$ )

O bambu é um material natural que apresenta grandes variações em suas resistências, como já vimos depende de vários fatores como: espécie, tipo de solo, teor de umidade, clima, porção do colmo e idade (GHAVAMI apud HIDALGO 1974).

Tendo em vista todas essas variáveis, e não existindo norma específica para o bambu, considera-se neste trabalho como resistência à tração última do bambu, sua tensão característica, obtida segundo o método de distribuição normal.

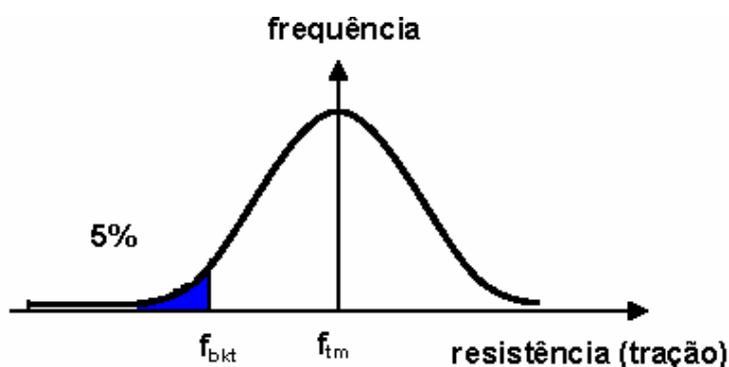


Figura – 2.9 - Gráfico representativo da distribuição normal ou de Gauss para probabilidade de 95% de se encontrar valores maiores que o de  $f_{bkt}$ .

### **2.5.2 – Tensão admissível ou de cálculo à tração do bambusa vulgaris**

A tensão admissível é fixada tomando-se um coeficiente de segurança adequado sobre a tensão máxima do material (TIMOSHENKO; GERE 1994). Na ausência de norma que regulamenta os coeficientes para o bambu, usa-se o mesmo critério que é usado para madeiras ( $\gamma_m = 1,8$ ), madeiras submetidas à tração (NBR 7190:1997).

### **2.5.3 - Deformação transversal admissível para vigas de concreto com reforço de bambu**

Não existe norma que regule o valor da flecha para vigas de concreto com reforço de bambu. A NBR 6118:2004 fixa para vigas de concreto com reforço de aço um valor para flecha de  $1/250$  do comprimento do vão.

Para vigas de madeira, a NBR 7190:1997 fixa valores que dependem da condição estática da viga. Para vigas bi-apoiadas  $a = l/350$ , e para vigas engastadas  $a = l/175$ .

## **2.6 - Aderência**

Aderência é o fenômeno caracterizado pela união entre o reforço, e o concreto é uma das razões básicas indispensáveis para existência do concreto armado. O trabalho conjunto do concreto e do aço, assegurado pela aderência entre os dois materiais, é a principal causa do comportamento estático conjunto do concreto e das barras de aço.

A aderência assegura internamente a transmissão de esforços do aço para o concreto e vice-versa, pois, garante a igualdade de deformações específicas  $\epsilon$  das barras de aço, e do concreto que as envolve. Assim é que, nas regiões tracionadas, onde o concreto possui resistência praticamente nula, ele fissa, tendendo a se deformar, o que graças à aderência arrasta consigo as barras de aço, forçando-as a trabalhar e, conseqüentemente, a absorver os esforços de

tração, coisa que, caso não sucedesse levaria a peça a ruína (SUSSEKIND, 1984). Logo, é graças à aderência que os esforços de tração podem chegar às barras de aço da armadura, assim como, também nas regiões comprimidas, uma parcela de compressão poderá ser absorvida por armadura colocada com esta finalidade. De acordo com ensaios, n tem-se uma barra de aço mergulhada num bloco de concreto, tracionada por uma força, o comportamento tensão de aderência x deslocamento é mostrado na Figura 2.10.

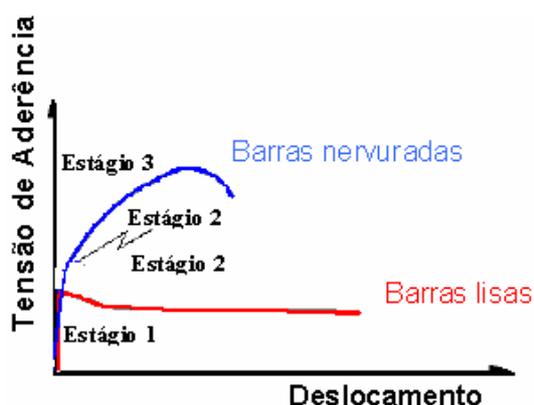


Figura 2.10 - Curvas esquemáticas tensão de aderência x deslocamento e os estágios da aderência aço concreto (FIB, 1999).

Segundo LEONHARDT (1977), a aderência é composta por três parcelas:

- 1.1 - Adesão: De natureza físico-química, com forças capilares na interface entre os dois materiais; o efeito é de uma colagem provocada pela nata de cimento na superfície do aço. (estágio 1);
- 1.2 - Atrito: É a força que ocorre na superfície de contato entre os dois materiais, e se manifesta quando há tendência ao deslocamento relativo entre a barra de aço e o concreto. É variável com o tipo de superfície das barras e devido à penetração da pasta de cimento nas irregularidades das mesmas; é tanto maior quanto maior é a pressão exercida pelo concreto sobre a barra (por isso, o atrito é maior nos apoios e nas partes curvas das barras, favorecido pela retração). (estágio 2);
- 1.3 - Aderência mecânica – (Engrenamento): Resistência mecânica ao arrancamento devida à conformação superficial das barras, em que as moças e

as saliências funcionam como peças de apoio, aplicando forças de compressão no concreto, o que aumenta significativamente a aderência (estágio 3).

A resistência de aderência de cálculo (tensão última de aderência) entre a armadura passiva e o concreto, deve ser determinada pela Equação 2.4, prevista pela NBR 6118:2004.

$$f_{ad.u} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \quad (2.4)$$

Sendo que  $f_{ctd}$  é o valor de cálculo da resistência à tração do concreto em (MPa) dado por:

$$f_{ctd} = \frac{0,21 \cdot (f_{ck})^{\frac{2}{3}}}{1,4} \quad (2.5)$$

$\eta_1 = 1,0$  para barras lisas;

$\eta_1 = 1,4$  para barras entalhadas (CA-60);

$\eta_1 = 2,25$  para barras de alta aderência (CA-50);

$\eta_2 = 1,0$  para situações de boa aderência;

$\eta_2 = 0,7$  para situações de má aderência;

$\eta_3 = 1,0$  para  $\Phi < 32$  mm ( $\Phi$  é o diâmetro da barra, em mm);

$$\eta_3 = \frac{132 - \Phi}{100} \quad \text{para } \Phi > 32\text{mm}$$

### 2.6.1 - Tensão de aderência de cálculo bambu - concreto

Como já apresentada, as pesquisas de arrancamento sugerem que a aderência reforço-concreto é composta por três parcelas: aderência por adesão, por atrito e mecânica (FIB, 1999). Quando uma estrutura de concreto armado é solicitada por forças de pequena magnitude, desenvolve-se a aderência por adesão (estágio 1). Tais forças são resultados tanto da aderência química entre os materiais, produzidas na interface reforço-concreto durante as reações de hidratação

do cimento, quanto da aderência física, provocada por efeitos de capilaridade, que está diretamente ligada à deformação elástica da camada cimentícia em torno da barra componente da armadura.

A aderência por adesão rompe após um pequeno deslocamento relativo, e a partir de então, sua contribuição é praticamente nula. No caso de reforços com superfície lisa, após a ruptura da aderência por adesão, ocorre a ativação da aderência por atrito (estágio 2). Essa parcela está diretamente relacionada ao coeficiente de atrito entre as superfícies e à força de compressão perpendicular ao plano de contato, que é proveniente da retração do concreto, da irregularidade do plano de deslizamento e do efeito de cunha das partículas do concreto. Neste caso, o plano de deslizamento coincide com a superfície de contato reforço-concreto. Para reforços com superfícies irregulares ou com variação da seção transversal, depois de rompida a aderência por adesão, são ativadas simultaneamente as parcelas da aderência por atrito e mecânica (estágios 2 e 3).

De acordo com LEONHARDT (1977), essa parcela é a mais efetiva e confiável da aderência e que ela é imprescindível para que se possa utilizar toda a capacidade resistente do reforço com elevada resistência à tração. De acordo com o RILEN-FIP-CEB (1973), a medição da variação das tensões ao longo do comprimento, deve ser avaliada por meio de um valor médio calculado com base na Equação 2.6, na qual  $F_{arr}$  é a força necessária para arrancar a vareta da massa de concreto,  $u$  é o perímetro de contato entre o reforço e o concreto e  $l_b$  é o comprimento da barra em contato com o mesmo (ver Figura 2.11).

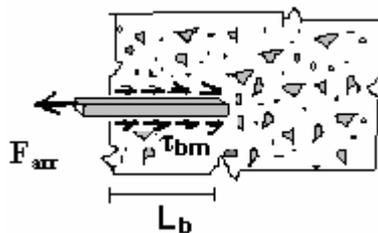


Figura 2.11 – Talisca de bambu mergulhada em concreto.

$$\tau_{bm} = \frac{F_{arr}}{u.l_b} \quad (2.6)$$

Devido a grande dispersão dos valores das forças obtidas em ensaios de arrancamento, o RILEN-FIP-CEB sugere que esta força de arrancamento  $F_{arr}$  seja definida como a força correspondente ao deslocamento de **0,1mm** (ver Figura 2.12). Na Tabela 2.3 tem-se resultados de pesquisa de arrancamento de talisca de bambu com 10 mm de largura, para concretos com  $f_{ck}$  de 15 MPa, 25 MPa e 35 MPa, sem cravação de pinos, com pinos de bambu encravado aumenta-se a tensão de aderência bambu-concreto em cerca de 50%.

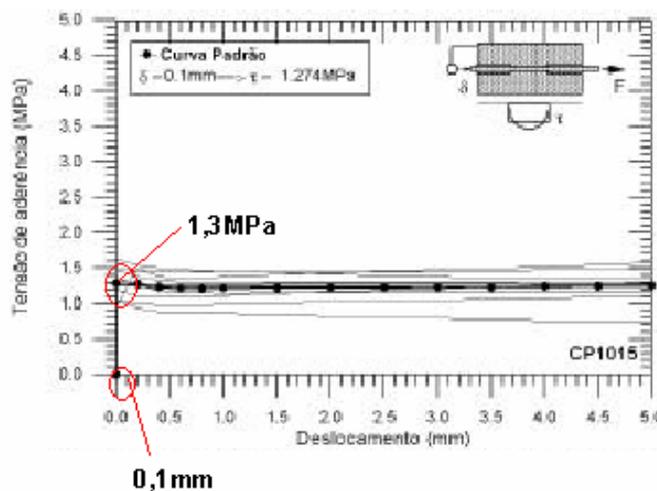


Figura 2.12 – Gráfico mostrando o valor correspondente à tensão de arrancamento para um deslocamento de 0,1mm – Taliscas sem pino, (CZARNIESK, et al, 2004)

Tabela 2.3 – Resultado de pesquisa de ensaios de arrancamento de taliscas de bambu imersas em concreto. (CZARNIESKI et. al, 2004)

Tipo	Corpos-de-prova										$\delta_{bm} - s$
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	
CP1015	0,991	1,020	1,243	1,150	1,315	1,426	1,472	1,226	1,310	1,585	1,27 - 0,19
CP1025	1,518	0,965	1,170	0,984	1,286	1,162	1,403	1,503	1,178	1,412	1,26 - 0,19
CP1035	2,082	1,116	2,020	1,625	1,873	1,340	1,029	1,750	2,176	1,642	1,66 - 0,39
1PACA	1,520	1,325	1,440	1,755	1,275	1,370	1,730	2,025	1,585	1,655	1,57 - 0,23
1PBCA	1,290	1,265	1,370	1,350	1,380	1,555	1,285	1,300	1,120	1,145	1,31 - 0,12
2PACA	2,590	1,795	2,350	2,685	2,590	2,735	2,335	2,310	2,360	2,575	2,43 - 0,27
2PBCA	1,913	1,740	1,920	1,935	2,820	2,264	1,793	2,107	1,890	1,920	2,03 - 0,31

CP10XX – Corpo-de-prova com talisca de 10 mm de largura e concreto com,  $f_{ck} = XX$  MPa;  
 1PBCA – Talisca com um pino de bambu cravado  
 1PACA – Talisca com um pino de aço cravado  
 2PBCA – Talisca com um pino de bambu cravado  
 2PACA – Talisca com um pino de aço cravado

Seguindo os procedimentos sugeridos pelos códigos normativos para aço-concreto, as pesquisas mostram que se pode considerar que a tensão de aderência característica entre o bambu e o concreto segue uma distribuição normal (CZARNIESKI et al, 2004).

A tensão de aderência característica é obtida considerando uma probabilidade de apenas 5% dos valores serem inferiores a esse valor característico, tem-se que a tensão característica de aderência bambu-concreto é calculada com base na Equação 2.7, na qual  $\tau_{bm}$  é a tensão de aderência média,  $s$  é o desvio-padrão da amostra.

$$\tau_{bk} = \tau_{bm} - 1,645.s \quad 2.7$$

Para calcular o valor da tensão de aderência de cálculo do bambu ( $\tau_{bd}$ ), utilizou-se o coeficiente de segurança sugerido pelo Eurocode (1992), de 2,15, o mesmo usado para o aço-concreto. As pesquisas mostram que a tensão de aderência bambu-concreto é cerca de 80% da tensão de aderência aço liso-concreto.

Neste trabalho, será usado este critério para determinação da tensão de aderência bambu-concreto, para verificação do comprimento de ancoragem dos reforços de bambu.

Tabela 2.4 – Comparação entre as tensões de aderência de cálculo bambu-concreto e aço liso-concreto. (CZARNIESKI et.al, 2004).

Tipo	Tensão de ader. barr de aço liso				
	$\tau_{bm}$	$\tau_{bk}$	$\tau_{bd}$	( $\tau_{ad}$ )	$\tau_{bd} / \tau_{ad}$
CP1015	1,27	1,18	0,55	0,552	0,990
CP1025	1,26	1,15	0,54	0,744	0,722
CP1035	1,67	1,46	0,68	0,947	0,716

## 2.6.2 – Ancoragem das taliscas de bambu

As barras de bambu tracionadas ou comprimidas podem ser ancoradas com um comprimento retilíneo liso ou com pino de aço ou de bambu como alternativas que melhora a tensão de aderência. O comprimento reto de ancoragem básico ( $l_b$ ) é aquele necessário para ancorar a força limite  $F_{arr} = A_b \cdot f_{bk}$  em uma talisca de seção retangular de dimensões B x H, dado pela Equação 2.8.

$$l_b = \frac{B \cdot H \cdot f_{bd}}{2 \cdot (B + H) \cdot \tau_{bd}} \quad (2.8)$$

Sendo que  $f_{bd}$  é a tensão de cálculo da talisca de bambu, e  $\tau_{bd}$  é a tensão de aderência bambu-concreto.

De acordo com pesquisas realizadas sobre aderência bambu-concreto, chega-se as seguintes considerações:

- 1 - O comportamento do diagrama tensão de aderência x deslocamento relativo bambu-concreto é semelhante ao diagrama do aço liso-concreto;
- 2 - As dimensões da seção transversal das varetas de bambu não tem influência significativa na tensão de aderência bambu-concreto, entretanto, se verifica que, ao se elevar a resistência à compressão do concreto, eleva-se a tensão de aderência bambu-concreto ;
- 3 - A variação da tensão de aderência bambu-concreto em relação à resistência à compressão do concreto é linear;
- 4 - A tensão de aderência de cálculo entre o bambu e o concreto é cerca de 20% inferior à tensão de aderência entre o aço liso e o concreto;
- 5 - A cravação de pinos de aço e de bambu nas varetas eleva a tensão de aderência em 80% e 50%, respectivamente.

## CAPÍTULO 3

---

### MATERIAIS E MÉTODOS

A partir do capítulo anterior observou-se a possibilidade de utilizar o bambu como substituto do aço liso em vigas, para uso em pequenas construções e construções rurais. Dependendo da forma da seção transversal do bambu, varetas, cabos, ou colmo de bambu, tem-se maior ou menor tensão de aderência. Para verificação dessa possibilidade, visando o objetivo proposto neste trabalho, serão adotadas como reforço, taliscas ou varetas de bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schard, pela disponibilidade de matéria-prima na região. Inicialmente foram determinadas as características físicas e mecânicas da espécie, considerando-se amostras representativas.

#### 3.1 – Materiais

As amostras de bambus foram retiradas da fazenda da Escola Agrotécnica Federal de Satuba – AL, situada no município de Satuba, Alagoas, a cerca de 20 Km de Maceió. O bambu pesquisado apresentou diâmetro externo médio  $d = 8$  cm e espessura média de 0,9 cm com a idade em torno de 3 anos.

Os bambus foram cortados a uma altura de 30 cm do solo e seccionado em três partes iguais correspondentes as partes basal, intermediária e topo. Para elaboração dos ensaios foram retiradas as mesmas quantidades de amostras de cada uma das partes do bambu.

O diâmetro desta espécie (Figura 3.1) facilita o corte das varetas ou taliscas retangulares de 1,00 cm x 0,6 cm, que serão usadas como substituto do aço liso. Neste trabalho foram usadas taliscas de espessura de 0,6 cm (Figura 3.2), aproveitando 2/3 da parte externa do colmo, que é a parte mais resistente. Foi desprezado 1/3 da parte interna que é a parte de menor resistência, mais susceptível a ataques de insetos, e que sofre maior inchamento quando em contato com a água, reduzindo a aderência bambu-concreto (HIDALGO, 2003).

Os corpos-de-prova para determinação das características físicas e mecânicas do *Bambusa vulgaris* foram coletados das três partes do bambu, conforme já mencionado, e produzidos de acordo com as Figuras 3.3 a 3.7.

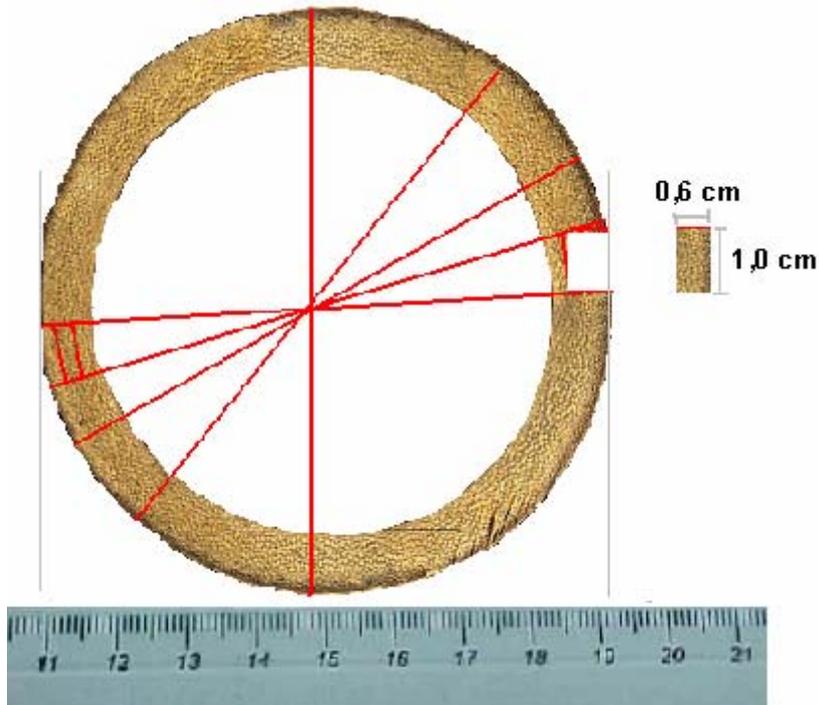


Figura 3.1 – Seção transversal do colmo de *Bambusa vulgaris* e seção transversal padrão das taliscas.

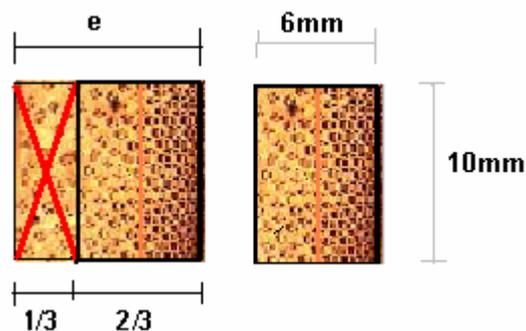


Figura 3.2 – Detalhe da seção transversal da espessura total do *Bambusa vulgaris* e da talisca usada.

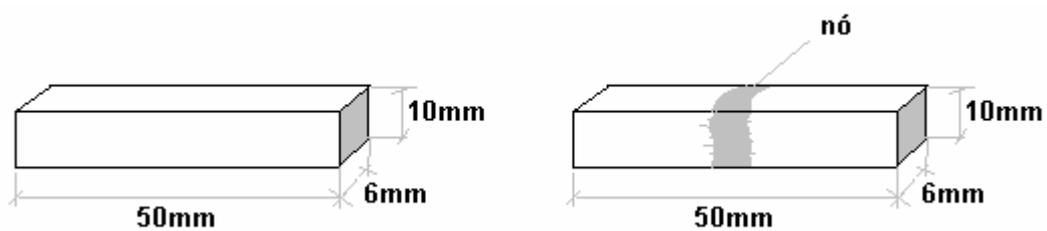


Figura 3.3 – Desenho dos corpos-de-prova para determinação do teor de umidade e da densidade.



Figura 3.4 – Amostras para determinação do teor de umidade e da densidade.

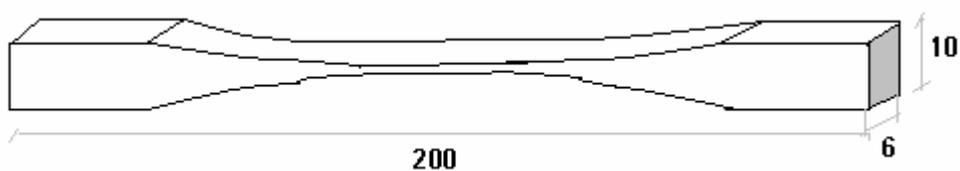


Figura 3.5 – Perspectiva do corpo-de-prova.



Figura 3.6 – Vista frontal do corpo-de-prova com medidas em mm (INBAR, 1999).

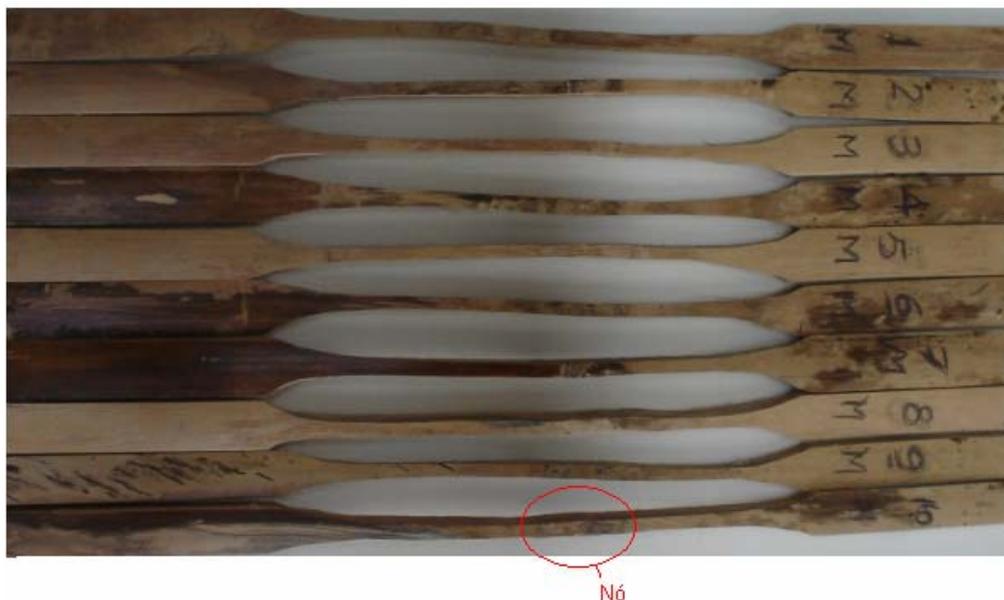


Figura 3.7 – Fotografia dos corpos-de-prova para os ensaios (parte mediana com nó).

### 3.1.1 Corte e aproveitamento do bambu

As varetas de bambu foram obtidas a partir de colmos com idade de aproximadamente três anos, fato observado pela mudança de coloração do colmo, passando de verde intenso a tonalidade ocre, e diâmetro com cerca de 8 cm. Os colmos foram abertos com facão e em seguida trabalhados com faca de modo a se obter dimensões médias desejada de 0,6 cm x 1,0 cm x 140 cm, para as varetas e de 1,00cm x 0,2 cm x 34 cm para os estribos. Esta espessura de 0,2 cm para os estribos torna este material maleável e assim pode-se dobrá-lo com facilidade, dando-lhes o formato adequado (Figuras 3.8 e 3.9).

Observa-se que o corte das taliscas não deve ser feito com serra, haja vista que este instrumento corta as fibras de modo a não obedecer à direção natural das mesmas. O corte deve ser feito com instrumento adequado, faca estrela, ou com facão.

Por ser feito à mão se faz necessário uma padronização do material. O controle das medidas foi feito com paquímetro com aproximação de 0,05 mm (Tabela 3.1 e 3.2). Após a preparação das taliscas e dos estribos as montagens das

vigas foram feitas como se fosse uma armação de aço usual, fazendo-se as amarrações das varetas aos estribos com arame cozido.

Tabela 3.1 – Medidas médias das taliscas de bambu

	<b>Taliscas</b>				
	$\ell(\text{mm})$	$e(\text{mm})$	$A(\text{cm}^2) - \text{exp.}$	$A(\text{cm}^2) - \text{teórica}$	erro rel. %
média	10,2	6,25	0,64	0,60	6,25
D. pad.	0,92	0,68			

Tabela 3.2 – Medidas médias dos estribos de bambu

	<b>Estribo</b>				
	$\ell(\text{mm})$	$e(\text{mm})$	$A(\text{cm}^2) - \text{exp.}$	$A(\text{cm}^2) \text{ teórico}$	erro rel. %
média	10,24	2,06	0,21	0,20	5,47
D. pad.	1,09	0,37			

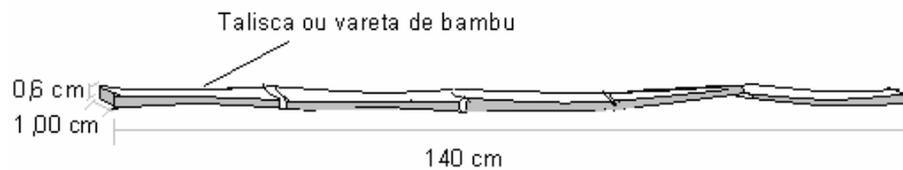


Figura 3.8 – Talisca de bambu usada como reforço

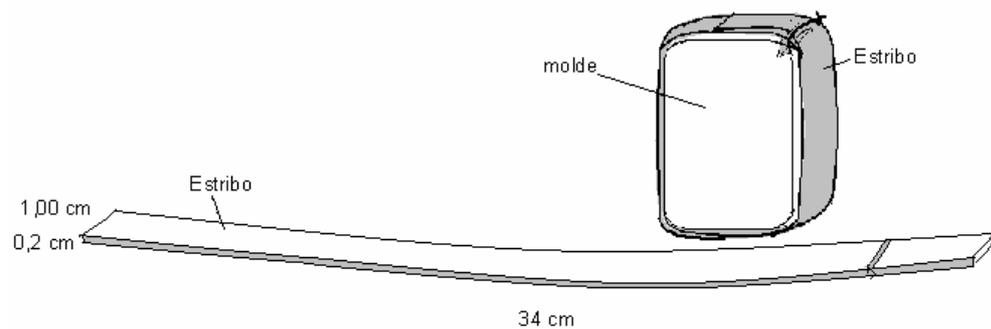


Figura 3.9 – Fabricação dos estribos de bambu



Figura 3.10 – Detalhe do estribo de bambu de 6 cm x 9 cm, usados nas vigas 1, 2, 3 e 3.1

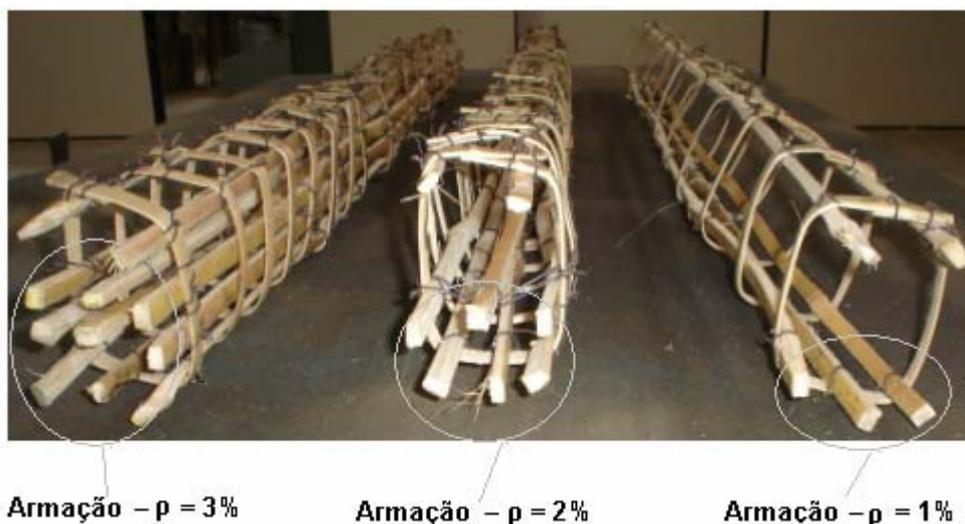


Figura 3.11 – Armações de bambu para as vigas 3 e 3.1, 2, e 1, respectivamente.

No corte do bambu para fabricação dos componentes acima, existe perdas que foi determinada para se verificar o nível de aproveitamento do bambu com diâmetro externo de 8,00 cm, e de acordo com o equipamento usado.

Tendo sido usado quatro colmos com altura de 1,40 m, usando-se a Equação 3.1, têm-se:

$$V_t = 2 \cdot \pi \cdot r_m \cdot e \cdot h \quad (3.1)$$

$V_{ib} = (2 \cdot 3,14 \cdot 3,55 \cdot 10^{-2} \cdot 9 \cdot 10^{-3} \cdot 1,4) \cdot 4 = 1,12 \cdot 10^{-2} m^3$ , Volume total dos colmos de bambu.

$V_i = (1 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,4) \cdot 24 = 2,02 \cdot 10^{-3} m^3$ , Volume das taliscas;

$V_e = (2 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,34) \cdot 106 = 7,21 \cdot 10^{-4} m^3$ , Volume dos estribos.

Volume total das taliscas e dos estribos,  $V_t = 2,5 \cdot 10^3 m^3$ .

Aproveitamento,  $A_b\% = \frac{2,74 \cdot 10^{-3}}{1,12 \cdot 10^{-2}} \cdot 100 = 24,47\%$ . Isto significa que neste trabalho

25% do bambu é aproveitado, e 75% é reciclado como matéria orgânica, ou outra finalidade, como por exemplo, fabricação de papel.

### 3.1.2 Concreto

A resistência característica a compressão do concreto,  $f_{ck}$  usada para dimensionamento das vigas, foi estabelecida em função do percentual de reforço de bambu da viga. Para a execução dos modelos, a dosagem foi determinada de acordo com RODRIGUES (1998). Foi utilizada como agregado graúdo, brita nº.0, areia lavada com módulo de finura MF = 2,8, e cimento portland comum com resistência aos 28 dias de 32 MPa.

### 3.1.3 Caracterização das vigas usadas nos ensaios

Foram produzidas cinco vigas de concreto com os traços previamente determinados, para a verificação deste estudo. Quatro vigas com reforço de bambu com percentuais de  $\rho = 1\%$ ,  $\rho = 2\%$ , duas com  $\rho = 3\%$ , e uma viga de concreto com reforço de aço liso CA-60 com armadura de  $2\Phi 5,0$  mm, chamada viga 4. As vigas com reforço de bambu são chamadas de vigas 1, 2, 3 e 3.1, de acordo com os

percentuais de bambu já citados, e mostradas nas Figuras 3.12, 3.13, 3.14, e a viga com reforço de aço é mostrada na Figura 3.15.

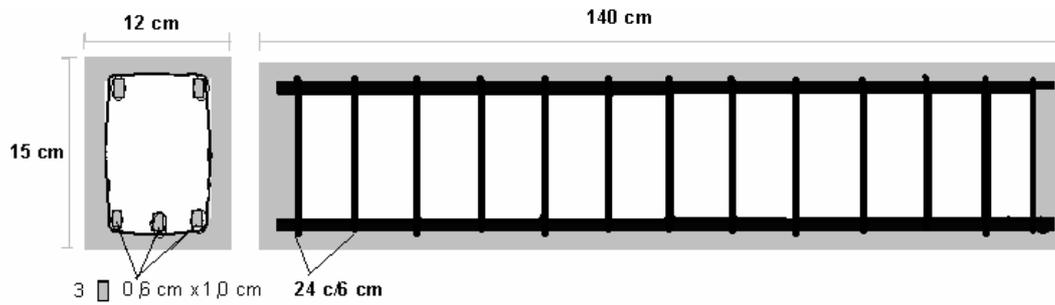


Figura 3.12 – Viga 1 – Viga de concreto com reforço de bambu -  $\rho = 1\%$ , corte transversal e longitudinal.

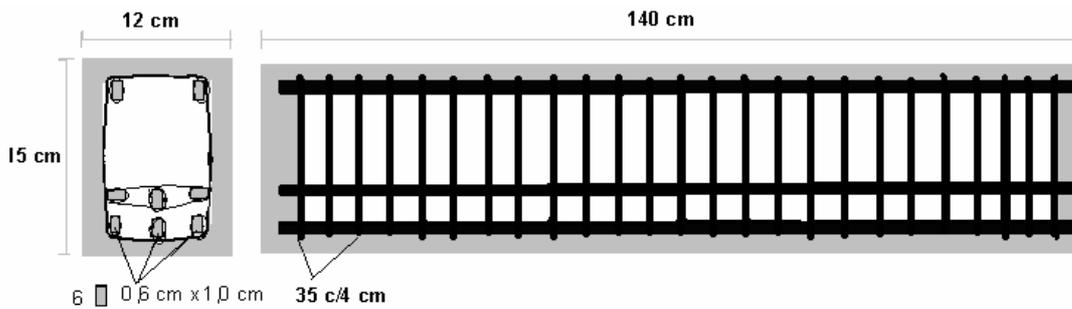


Figura 3.13 – Viga 2 – Viga de concreto com reforço de bambu -  $\rho = 2\%$ , corte transversal e longitudinal.

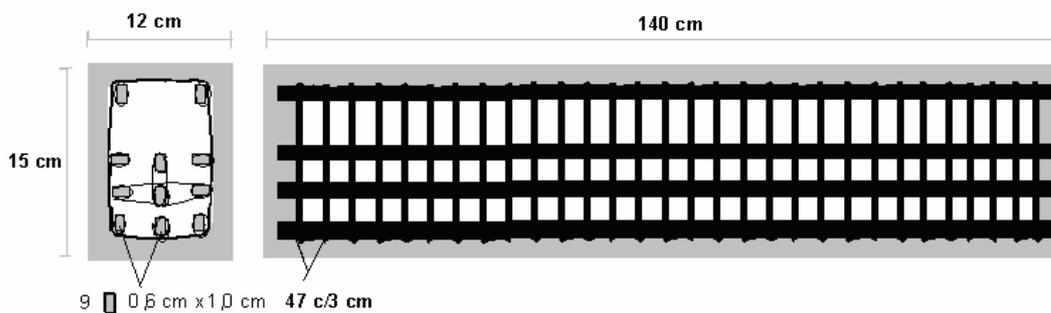


Figura 3.14 – Viga 3 e 3.1 – Viga de concreto com reforço de bambu -  $\rho = 3\%$ , corte transversal e longitudinal.

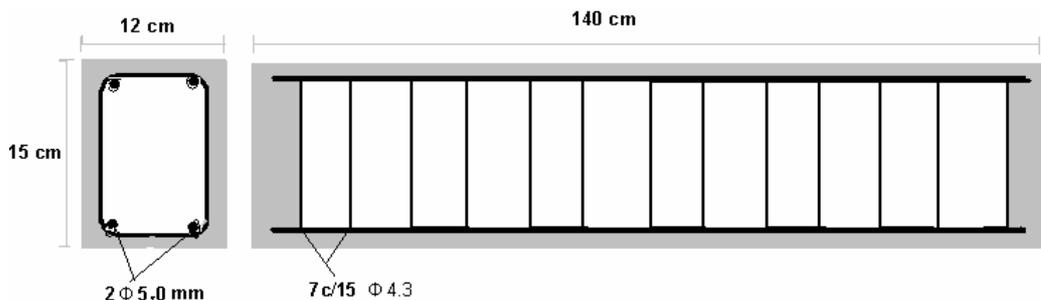


Figura 3.15 – Viga 4 – Viga de concreto com reforço de aço. Corte transversal e longitudinal.

## 3.2 – Métodos

### 3.2.1 – Determinação do teor de umidade e da densidade

Para a determinação do teor de umidade do bambu usado nesta pesquisa, foram retiradas duas amostras de cada uma das partes do seu colmo, como mostrado nas Figuras 3.3 e 3.4, uma sem nó e outra com nó.

As medidas dos corpos-de-prova foram feitas com paquímetro com aproximação de 0,05 mm e as medidas médias determinadas.

A pesagem feita em balança com sensibilidade de 0,01 g. Foi feita a pesagem dos modelos úmidos, em seguida colocados na estufa a uma temperatura constante de 110° C, então foi feita a pesagem das amostras secas até se ter constância dos pesos.

Usou-se na obtenção dos resultados do teor de umidade e densidade as equações 3.2 e 3.3 respectivamente.

$$h\% = \frac{Ph - Ps}{Ps} \cdot 100 \quad (3.2)$$

$$d = \frac{M}{V} \quad (3.3)$$

Tabela 3.3 – Resumo das propriedades físicas do *Bambusa vulgaris*

Setor	h%		d(g/cm <sup>3</sup> )	
	c/nó	s/nó	c/nó	s/nó
Basal	24,68	20,24	0,73	0,76
Mediano	23,91	18,32	0,72	0,76
Topo	21,43	19,05	0,77	0,84
<b>média</b>	<b>23,34</b>	<b>19,21</b>	<b>0,74</b>	<b>0,78</b>

A densidade dos bambus, de modo geral, está entre 0,5 e 0,90 g/cm<sup>3</sup>. A resistência do bambu é proporcional a sua densidade, ou ao peso específico (HIDALGO, 2003). Os resultados obtidos nos ensaios desta pesquisa, mostram coerência com a bibliografia existente.

### 3.2.2 – Determinação da resistência à tração característica ( $f_{bkt}$ )

Para este estudo foram ensaiadas 10 amostras de *Bambusa vulgaris* para a parte basal, 10 para a parte mediana e 10 para o topo.

Os ensaios foram realizados numa máquina universal de ensaios **EMIC** com capacidade para 30 tf à tração, usando-se corpos-de-prova como mostrados nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7.

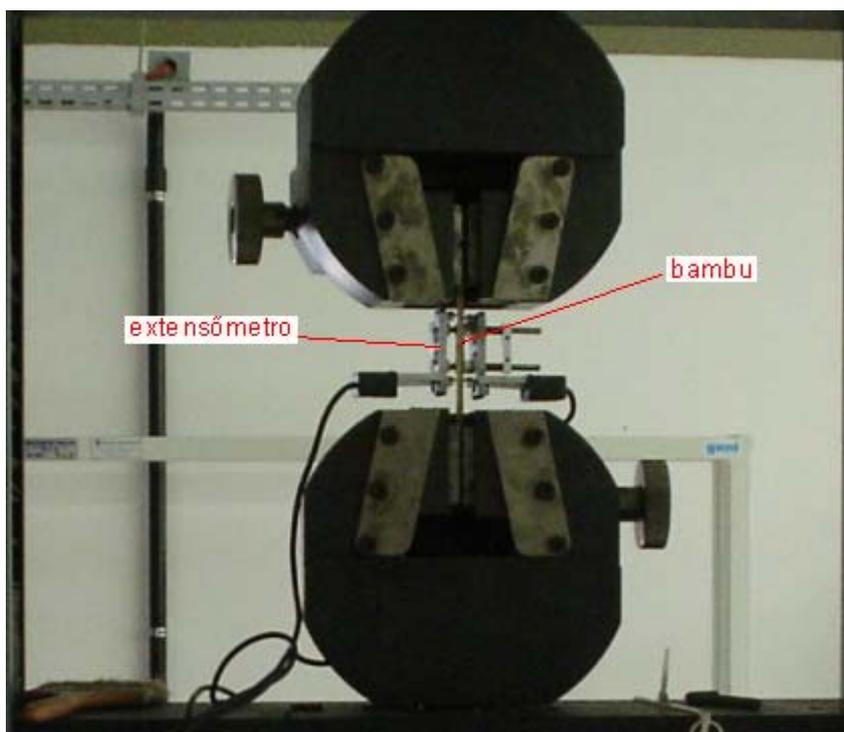


Figura 3.16 - Ensaio à tração do bambu – EMIC – NPT - UFAL.

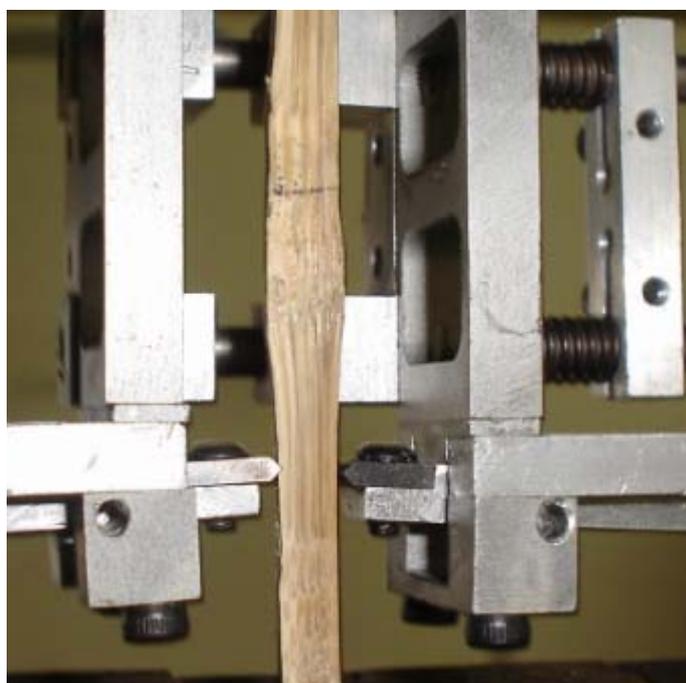


Figura 3.17 – Detalhe do ensaio de tração

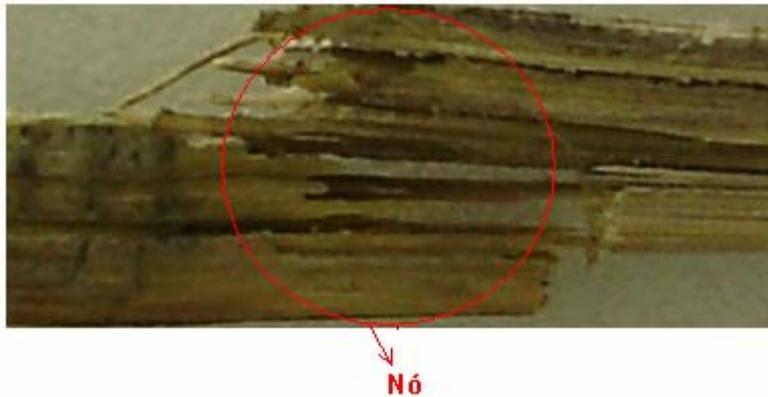


Figura 3.18 – Detalhe do rompimento do corpo-de-prova no nó.

Nas Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6, são mostrados os resultados obtidos nos ensaios de tração, de acordo com o modelo apresentado nas figuras 3.16 e 3.17. Os valores das cargas e das deformações específicas foram captados num sistema de aquisição de dados. Os valores foram usados no EXCEL, calculando-se as tensões em função das deformações específicas.

Tabela 3.4 – Dados dos resultados dos ensaios à tração – Parte basal com nó.

NPT- UFAL- Equipamento EMIC

<b>Amostra</b>	<b>F (N)</b>	<b>ℓ (mm)</b>	<b>e (mm)</b>	<b>A (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>σ (MPa)</b>
1	2.136,40	6,25	2,15	13,44	<b>158,99</b>
2	2.577,40	6,00	2,40	14,40	<b>178,99</b>
3	2.714,60	5,70	2,45	13,97	<b>194,39</b>
4	1.783,60	6,80	2,40	16,32	<b>109,29</b>
5	2.254,00	7,10	2,25	15,98	<b>141,10</b>
6	2.342,20	5,85	2,00	11,70	<b>200,19</b>
7	2.861,60	6,85	2,30	15,76	<b>181,63</b>
8	2.597,00	7,65	2,45	18,74	<b>138,56</b>
9	3.057,60	7,05	2,40	16,92	<b>180,71</b>
10	2.087,40	6,65	2,35	15,63	<b>133,57</b>
<b>média</b>		<b>6,59</b>	<b>2,32</b>	<b>15,28</b>	<b>161,74</b>

Os valores das tensões e das deformações específicas foram calculados, tendo-se os valores para a parte mediana com nó, apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Dados dos ensaios à tração do bambu – mediana com nó.

<b>Amostra</b>	<b>F (N)</b>	<b>ℓ (mm)</b>	<b>e (mm)</b>	<b>A (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>σ (MPa)</b>
1	3.008,60	6,05	2,85	17,24	<b>174,49</b>
2	2.440,20	6,00	2,50	15,00	<b>162,68</b>
3	2.361,80	7,05	2,30	16,22	<b>145,66</b>
4	2.597,00	5,80	3,05	17,69	<b>146,81</b>
5	2.165,80	6,70	2,35	15,75	<b>137,55</b>
6	1.940,40	5,00	2,55	12,75	<b>152,19</b>
7	3.038,00	7,05	2,65	18,68	<b>162,61</b>
8	2.499,00	6,75	2,60	17,55	<b>142,39</b>
9	3.028,20	6,15	2,85	17,53	<b>172,77</b>
10	2.548,00	5,35	3,05	16,32	<b>156,15</b>
<b>média</b>		<b>6,19</b>	<b>2,68</b>	<b>16,47</b>	<b>155,33</b>

Os valores das tensões e das deformações específicas foram calculados, e para a parte do topo com nó, tem-se:

Tabela 3.6 – Dados dos ensaios à tração do bambu – Parte do topo com nó

<b>Amostra</b>	<b>F (N)</b>	<b>ℓ (mm)</b>	<b>e (mm)</b>	<b>A (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>σ (MPa)</b>
1	1.832,60	5,80	2,00	11,60	<b>157,98</b>
2	1.744,40	4,80	2,45	11,76	<b>148,33</b>
5	1.862,00	6,55	2,05	13,43	<b>138,67</b>
6	1.940,40	5,60	2,00	11,20	<b>173,25</b>
8	1.891,40	5,50	2,40	13,20	<b>143,29</b>
9	1.450,40	5,35	2,25	12,04	<b>120,49</b>
10	1.372,00	4,85	2,10	10,19	<b>134,71</b>
<b>média</b>		<b>5,49</b>	<b>2,18</b>	<b>11,92</b>	<b>145,25</b>

Fazendo-se análise estatística, considerando uma distribuição normal, se tem o cálculo da média e do desvio padrão que são respectivamente  $\sigma_m = 155,16 \text{ MPa}$  e  $s = 21,82 \text{ MPa}$ , e do valor correspondente a  $f_{btk}$  de acordo com a Equação 3.4.

Conclui-se que de acordo com os dados obtidos em laboratório deve-se trabalhar com uma tensão característica de tração para o bambusa vulgaris com nó,  $f_{bkt} = 119,16 \text{ MP}$ . Este valor apresenta um grau de confiança de 95%, isto é,  $f_{bkt}$  é o valor da resistência, de modo que existe uma probabilidade de 95% de se encontrar resultados acima deste valor.

$$f_{bkt} = f_m - 1,65 \cdot s \quad (3.4)$$

### 3.2.3 – Determinação do módulo de elasticidade característico ( $E_{bkt}$ )

O valor do módulo de elasticidade característico desta espécie ( $E_{bkt}$ ) foi determinado usando o mesmo método estatístico usado para o cálculo da tensão de tração característica apresentado anteriormente.

O módulo de elasticidade de cada amostra foi calculado, determinando-se a tangente do ângulo que a reta faz com a horizontal. Na Figura 3.19 se vê que o comportamento do bambu à tração é elástico linear até a ruptura. Usando-se a Equação 3.5, no gráfico tensão x deformação, calcula-se o módulo de elasticidade de cada amostra.

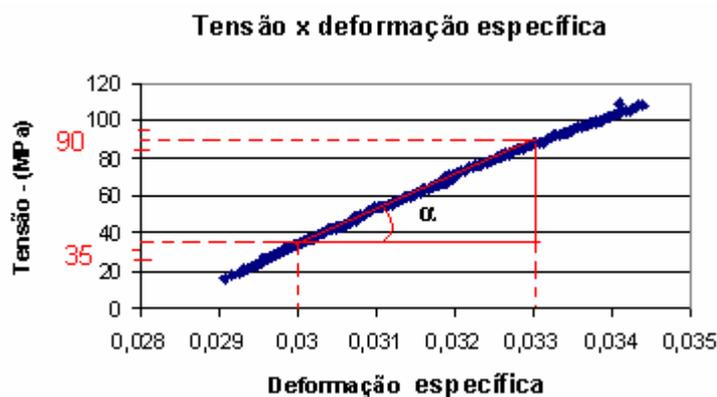


Figura 3.19 – Gráfico do ensaio tensão x deformação específica para um corpo de prova de bambu.

Sabendo-se que a tangente do ângulo que a reta faz com a horizontal é o módulo de elasticidade, tem-se:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

$$tg\alpha = E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{(90-35) \cdot 10^6}{0,033-0,03} = 18,33 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2} = 18,33 GPa$$

Organizando os valores obtidos, tem-se:

Tabela 3.7 – Determinação dos valores médios dos módulos de elasticidade do bambusa vulgaris

	basal	Intermediária	Topo
Ensaio	E(GPa)	E(GPa)	E(GPa)
1	-	24,41	12,5
2	-	-	16
3	12,5	16,86	-
4	16,67	-	-
5	15	17,5	10
6	22,5	20	15
7	18,33	14,28	-
8	16,67	22,5	12,86
9	13,33	15,38	9,81
10	26,67	15,27	15,38
<b>média</b>	<b>17,71</b>	<b>18,28</b>	<b>13,08</b>

Determinado o valor da resistência à tração característica ( $f_{btk}$ ), considera-se também neste trabalho, a tensão de tração última.

Usando-se o mesmo critério de distribuição normal, para os valores dos módulos de elasticidade,  $E_m = 16,51$  GPa e  $s = 4,32$  Gpa, chega-se a  $E_{btk} = 9,38$  GPa. Com isso usando a Equação 3.6 encontra-se a deformação específica característica, ou última ( $\varepsilon_{btk}$ ).

$$\epsilon_{btk} = \frac{f_{btk}}{E_{btk}} = \frac{119,16 \cdot 10^6}{9,38 \cdot 10^9} = 0,012704 \quad (3.6)$$

Logo  $\epsilon_{btk} = 0,012704$ , ou  $\epsilon_{btk} = 12,704\%$ .

### 3.2.4 – Determinação da tensão de tração e deformação admissíveis ou de cálculo

O valor da resistência característica à tração do bambu, usado neste trabalho, foi calculado através de ensaios de laboratório. Foi encontrado  $f_{btk} = 119,16\text{MPa}$ , para o bambu com nó, para um teor de umidade médio de 23,34%. Usando o coeficiente de segurança  $\gamma_m = 1,8$ , previsto pela NBR 7119:1997, para madeiras tem-se:

$$f_{bd} = \frac{\sigma_{btk}}{\gamma_m} \quad (3.7)$$

Logo, se tem.

$$f_{bd} = \frac{119,16}{1,8} = 66,20\text{MPa}$$

Desta forma trabalharemos com uma tensão de tração de cálculo para o *Bambusa vulgaris* ( $f_{bd} = 66,20\text{MPa}$ ). Com esse valor usando a Equação 3.6 calcula-se ( $\epsilon_{bd}$ ), deformação específica admissível ou de cálculo.

$$\epsilon = \frac{f_{bd}}{E_{btk}} \Rightarrow \epsilon_{bd} = \frac{66,20 \cdot 10^6}{9,38 \cdot 10^9} = 0,007058, \epsilon_{bd} = 7,058\%$$

### 3.3 – Dimensionamento de vigas de concreto reforçadas com aço

#### 3.3.1 - Flexão

Para o dimensionamento a flexão considerou-se apenas flexão simples, com as seguintes hipóteses básicas:

##### 1 - Manutenção da Seção Plana

Admite-se a hipótese de Bernouilli de que as deformações normais a uma seção transversal seguem uma lei plana. Com esta hipótese, as deformações normais específicas, em cada ponto são proporcionais à sua distância, à linha neutra da seção, inclusive quando a peça alcança o estado limite último.

##### 2 - Solidariedade dos Materiais

Admite-se a solidariedade perfeita entre as barras da armadura e o concreto que as envolve. Com esta hipótese, a deformação específica de uma barra é a mesma do concreto adjacente (MACGREGOR, 1997).

##### 3 - Resistência do Concreto à Tração

É totalmente desprezada, a favor da segurança.

##### 4 - Domínios de deformação: Definidos de acordo com a Figura 3.20

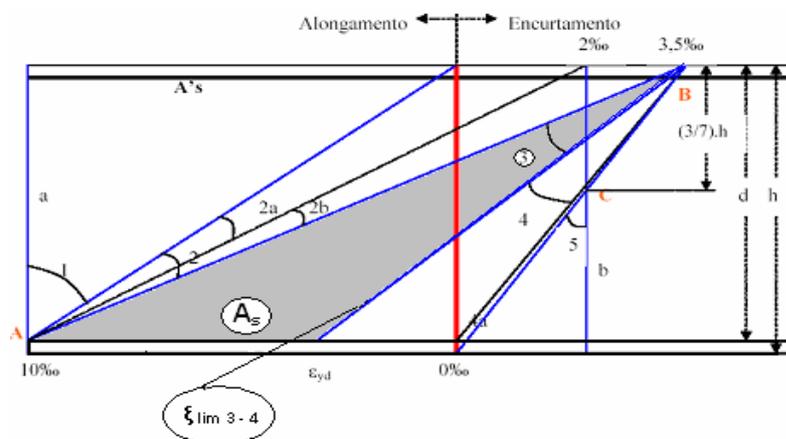


Figura 3.20 - Domínio de deformação – Estado limite último (FUSCO, 2000).

Conforme a Figura 3.20 o encurtamento último do concreto nas seções inteiramente comprimidas é 3,5‰, e o alongamento máximo do aço tracionado é de 10‰, no estado limite último para prevenir deformação plástica excessiva.

### Diagrama de Tensões

Admite-se que a distribuição de tensões no concreto seja feita de acordo com o diagrama parábola-retângulo da Figura. 3.21. O diagrama parábola-retângulo é composto por uma parábola do 2º grau, com vértice na fibra correspondente à deformação de compressão de 2 ‰ e por um trecho reto entre as deformações 2‰ e 3,5‰. Permite-se a substituição do diagrama parábola-retângulo por um retângulo de acordo com a Figura. 3.21. A ordenada máxima do diagrama corresponde a  $0,85 f_{cd}$ , sendo  $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$ .

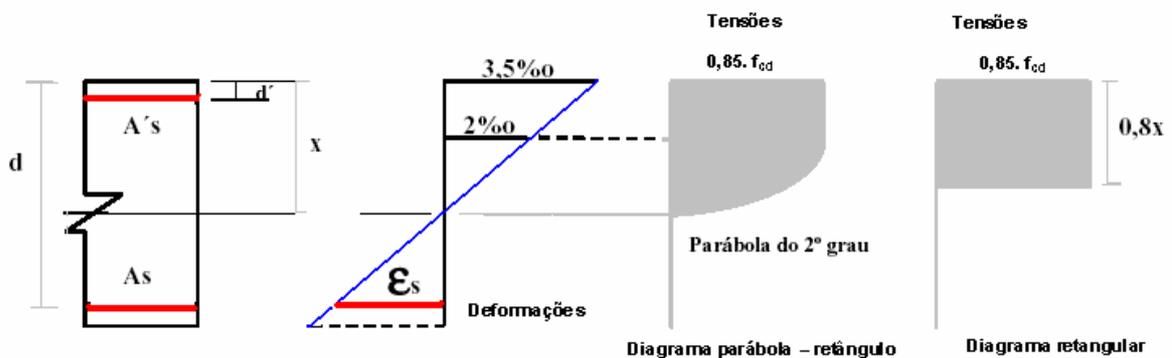


Figura 3.21 - Distribuição de tensões no concreto armado (FUSCO, 2000)

**Equacionamento para Dimensionamento de Seções Retangulares (Flexão Simples – Armadura Simples).**

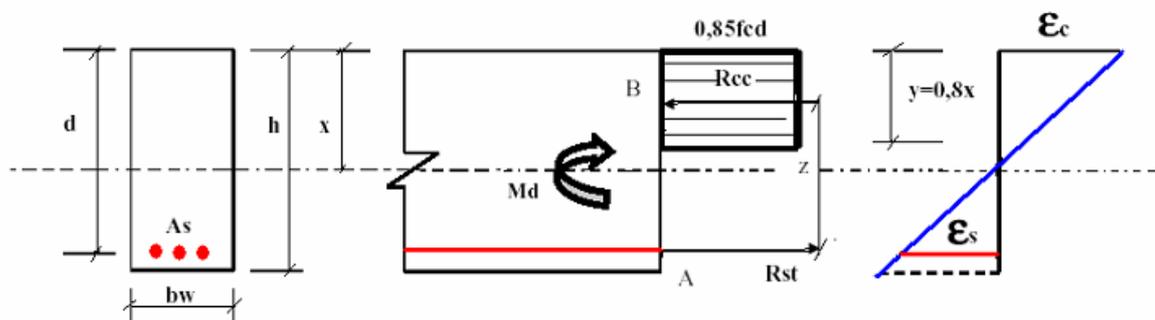


Figura 3.22 - Diagrama de tensões simplificado (FUSCO, 2000)

$R_{cc}$  = Resultante das tensões de compressão no concreto;

$R_{st}$  = Resultante das tensões de tração na armadura;

$M_d$  = Momento fletor de cálculo;

Desenvolvimento das equações:

$$z = d - y/2 = d - 0,8 \cdot x/2 = d - 0,4 \cdot x, \text{ e } z = d - 0,4 \cdot x$$

$$z = (d - 0,4 \cdot x) \quad (3.8)$$

A Equação 3.8 determina o valor de z (braço de alavanca), (FUSCO, 2000).

Sendo:

$$R_{cc} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot y, \text{ e como } y = 0,8 \cdot x, \text{ logo } R_{cc} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,8 \cdot x$$

$$R_{cc} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,8 \cdot x \quad (3.9)$$

Usando a condição de equilíbrio:

$\sum M = M_d$ ;  $M_d = R_{cc} \cdot z$ , ou  $M_d = R_{st} \cdot z$ , substituindo o valor de  $R_{cc}$  da Equação 3.9 e de z da Equação 3.8 tem-se:

$$M_d = (0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,8 \cdot x)(d - 0,4 \cdot x) \quad (3.10)$$

Encontrado o valor de  $M_d$ , calcula-se o valor de  $A_s$ , através da Equação:

$$A_s = \frac{M_d}{z \cdot f_s} \quad (3.11)$$

Admitindo que a peça esteja trabalhando no limite entre os domínios 2 e 3, tem-se  $\epsilon_s \geq \epsilon_{yd}$ , sendo a tensão na armadura a de escoamento  $f_s = f_{yd}$ . Escrevendo a Equação 3.11 da seguinte forma:

$$A_s = \frac{M_d}{z \cdot f_{yd}} \quad (3.12)$$

Após o cálculo de  $A_s$ , deve-se ter  $A_{smin} \geq A_s$ , onde  $A_{smin} = 0,0015 \cdot b_w \cdot h$ , ou  $A_s$  correspondente ao valor encontrado para  $M_{d,min}$ , calculado pela Equação 3.13. Considera-se o valor que for maior (NBR 6118:2004).

Neste trabalho será usado como referência vigas bi-apoiadas de comprimento variando de 1,00 m a no máximo 3,00 m. Fazendo-se variar as dimensões de sua seção transversal, calcula-se o momento de cálculo ( $M_d$ ) correspondente para uma armadura mínima. Com esses valores determina-se o reforço de bambu (*Bambusa vulgaris*), necessário para que a viga de mesmas dimensões suporte a mesma carga, a fim de se verificar a viabilidade da substituição do aço liso pelo bambu.

O dimensionamento será feito para vigas de seção retangular submetida à flexão simples e com armadura simples, isto é, apenas armadura tracionada. Neste caso o maior momento resistido por uma seção retangular é obtido com a seção trabalhando no limite entre os domínios 3 e 4, e o valor numérico depende do tipo de aço (CHUST, 2001).

## 1 - Dimensionamento – 1 - Vigas de concreto com reforço de aço liso

Os dimensionamentos das vigas apresentadas nas Tabelas 3.8, 3.9 e 3.10 são feitos com os valores de  $f_{ck} = 20,00 \text{ MPa}$ , e Aço CA-60,  $\Phi=5,0 \text{ mm}$ , haja vista que esse é o tipo de aço comumente usado em pequenas vigas de concreto armado. As vigas têm seções definidas de modo que  $h = 0,1 \cdot \ell$ , e  $b_w = 0,12 \text{ m}$ .

Tabela 3.8 – Determinação das áreas de aço em função das seções transversais das vigas, para os momentos  $M_{dm\acute{a}x} = M_{dlim3,4} - f_{ck} = 20 \text{ MPa}$

$b_w$ (m)	$\ell$ (m)	altura h(m)	d (m)	lim. 3,4 x(m)	z (m)	$M_{dm\acute{a}x.}$ KN.m	$A_s$ ( $\text{cm}^2$ )	barr. efetivas	$\rho$ %
0,12	1,00	0,10	0,063	0,037	0,048	2,09	0,83	5,00	0,82
0,12	1,25	0,13	0,088	0,052	0,068	4,06	1,15	6,00	0,78
<b>0,12</b>	<b>1,50</b>	<b>0,15</b>	<b>0,113</b>	<b>0,066</b>	<b>0,087</b>	<b>6,70</b>	<b>1,48</b>	<b>8,00</b>	<b>0,87</b>
0,12	1,75	0,18	0,138	0,081	0,106	9,98	1,81	10,00	0,93
0,12	2,00	0,20	0,163	0,096	0,125	13,92	2,13	11,00	0,90
0,12	2,25	0,23	0,188	0,110	0,144	18,51	2,46	13,00	0,94
0,12	2,50	0,25	0,213	0,125	0,163	23,75	2,79	15,00	0,98
0,12	2,75	0,28	0,238	0,139	0,182	29,65	3,11	16,00	0,95
0,12	3,00	0,30	0,263	0,154	0,202	36,20	3,44	18,00	0,98

Tendo em vista que se está pesquisando a substituição do aço liso pelo bambu, para estruturas de pequeno suporte de carga, serão dimensionadas também estas mesmas vigas para  $M_{dmin.}$ , para comparar com os valores calculados com reforço de bambu, e desta forma se fazer a verificação em laboratório, determinando para quais valores de  $M_d$  é adequado à substituição do aço pelo reforço de bambu.

O cálculo para as vigas submetidas à  $M_{dmin.}$ , é dado pela Equação 3.13 (NBR 6118: 2004).

$$M_{d,min.} = 0,8 \cdot W_0 \cdot f_{ctk,sup.} \quad (3.13)$$

Onde  $W_0$  é o módulo de resistência da seção transversal bruta de concreto relativo à fibra mais tracionada, dado por:

$$W_0 = \frac{I}{\bar{Y}} \quad (3.14)$$

Sendo  $I$ , o momento de inércia da seção transversal, neste estudo, considerando apenas as seções retangulares.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3.15)$$

e

$$\bar{Y} = \frac{h}{2} \quad (3.16)$$

$f_{ctk,sup.}$  é a resistência característica superior do concreto à tração, calculada da seguinte forma:

$$f_{ctk,sup.} = 1,3 \cdot f_{ct,m} \quad (3.17)$$

$f_{ct,m}$  dado por:

$$f_{ctk,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (3.18)$$

Dentro desta perspectiva, tem-se o dimensionamento das vigas reforçadas com aço liso para  $M_{d,min.}$ . Observa-se que após o cálculo da área de aço correspondente a  $M_{d,min.}$ , tem-se um número fracionado de barras correspondente a esta área. Como se deve ter um número inteiro de barras, a área de aço correspondente a este número de barras é maior que aquela correspondente ao  $M_{d,min.}$ , de modo que deve-se recalculá-la a nova posição da linha neutra, para verificação do domínio em que a estrutura está trabalhando com essa armadura efetiva, ou seja, a armadura mínima que a viga de fato irá receber. Calcula-se inicialmente a nova posição da linha neutra.

$$X = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0,68 \cdot b_w \cdot f_{cd}} \quad (3.19)$$

Se  $x \leq x_{lim3,4}$ ,  $f_s = f_{yd}$ , tem-se:

$$M_{d \text{ min. efet.}} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,4 \cdot x) \quad (3.20)$$

São esses valores que servirão de referência para o cálculo das áreas de reforço de bambu para as vigas de mesmas dimensões. Nas Tabelas 3.9 e 3.10, os valores de  $M_{d \text{ min.}}$  são calculados para  $f_{ck} = 20$  MPa, e  $b_w = 12$  cm.

Tabela 3.9 – Determinação das áreas de aço mínimas em função das seções transversais das vigas, para os momentos  $M_{d, \text{min.}} = 0,8 \cdot w_0 \cdot f_{ctk \text{ sup}}$

$b_w$ (m)	$\ell$ (m)	altura h(m)	$W_0$ $m^3$	$f_{ctm}$ MPa	$f_{ctk, \text{sup.}}$ MPa	$M_{d, \text{min}}$ KN.m	$A_{s, \text{min}}$ ( $cm^2$ )
0,12	1,00	0,10	0,00020	2,210	2,87	0,46	0,182
0,12	1,25	0,13	0,00031	2,210	2,87	0,72	0,204
<b>0,12</b>	<b>1,50</b>	<b>0,15</b>	<b>0,00045</b>	<b>2,210</b>	<b>2,87</b>	<b>1,03</b>	<b>0,229</b>
0,12	1,75	0,18	0,00061	2,210	2,87	1,41	0,255
0,12	2,00	0,20	0,00080	2,210	2,87	1,84	0,282
0,12	2,25	0,23	0,00101	2,210	2,87	2,33	0,310
0,12	2,50	0,25	0,00125	2,210	2,87	2,87	0,337
0,12	2,75	0,28	0,00151	2,210	2,87	3,48	0,365
0,12	3,00	0,30	0,00180	2,210	2,87	4,14	0,393

Verifica-se que os valores de  $A_{s \text{ min.}}$ , calculados a partir de  $A_{s \text{ min}} = 0,15\%(b_w \cdot h)$ , são maiores que os valores de  $A_{s \text{ min.}}$ , calculados através de  $M_{d \text{ min.}}$ , dado pela Equação 3.13, para o aço CA-60 e concreto de  $f_{ck} = 20$  MPa. Logo, o maior desses valores de  $A_{s \text{ min.}}$ , será usado como referência.

Tabela 3.10 – Determinação de  $M_{dmin-efetivo}$ , reforço de aço.

$*A_{s,min}$ ( $cm^2$ )	** $A_{s,min}$ $0,15\%b_w.h$	nº de bar. efet.	$A_s$ eft. $cm^2$	X m	Z m	$\rho$ %	** $M_{d,min.e}$ KN.m
0,182	0,180	2	0,393	0,018	0,056	0,33	1,15
0,204	0,225	2	0,393	0,018	0,081	0,26	1,66
<b>0,229</b>	<b>0,270</b>	<b>2</b>	<b>0,393</b>	<b>0,018</b>	<b>0,106</b>	<b>0,22</b>	<b>2,17</b>
0,255	0,315	2	0,393	0,018	0,131	0,19	2,69
0,282	0,360	2	0,393	0,018	0,156	0,16	3,20
0,310	0,405	3	0,589	0,026	0,178	0,22	5,46
0,337	0,450	3	0,589	0,026	0,203	0,20	6,23
0,365	0,495	3	0,589	0,026	0,228	0,18	6,99
0,393	0,540	3	0,589	0,026	0,253	0,16	7,76

\*  $A_{smin}$ ., calculado a partir da Equação 3.13

\*\* Valores de referência

### 3.3.2 – Cisalhamento – Determinação da armadura transversal

As condições de cálculo, para elementos lineares, admitem dois modelos que se baseiam na analogia com modelos em treliça, de banzos paralelos, associados com os mecanismos resistentes complementares (treliça generalizada), desenvolvidos no interior do elemento estrutural e que absorvem uma parcela  $V_c$  ou  $\tau_c$  em termos de tensão da força cortante (CHUST, 2001). Para o cálculo das forças nas barras da treliça e, conseqüentemente, das expressões que possibilitam determinar a quantidade de armadura, devem ser feitas as seguintes hipóteses:

- 1 – a treliça é isostática;
- 2 – os banzos são paralelos;
- 3 – a inclinação das fissuras e, portanto, das bielas comprimidas é de 45°;
- 4 – a inclinação ( $\alpha$ ) da armadura transversal pode variar entre 45° e 90°.

## Dimensionamentos de Vigas ao Cisalhamento

Por simplicidade, devido ao objetivo deste trabalho, a determinação do dimensionamento do reforço vertical limita-se apenas a determinação dos espaçamentos dos estribos.

### 1 – Determinação do espaçamento dos estribos

Como os elementos de referência são vigas reforçadas com aço liso CA-60 de  $\Phi = 5,0$  mm, os estribos terão diâmetro  $\Phi = 4,3$  mm, logo temos  $A_{sw} = 0,145$  cm<sup>2</sup>. De acordo com a Equação 3.21, determina-se o espaçamento da armadura transversal, sob ângulo  $\alpha = 90^\circ$  sendo  $\text{sen}\alpha = 1$ .

$$s = \frac{A_{sw} \cdot d \cdot f_{yd}}{1,1 \cdot V_{sd}} \quad (3.21)$$

Sendo:

s – é o espaçamento entre os estribos;

$A_{sw}$  – área da seção transversal dos estribos;

d – a altura útil da viga;

$f_{yd}$  – tensão de escoamento do aço (aço liso CA – 60),  $f_{yd} = 522$  MPa;

$V_{sd}$  – Esforço cortante de cálculo,  $V_{sd} = 1,4 \cdot V_s$ ;

### 2 – Armadura mínima dos estribos (NBR:6118:2004);

$$\rho_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s \cdot \text{sen}\alpha} \geq 0,2 \frac{f_{ct,m}}{f_{ywk}} \quad (3.22)$$

Para as condições deste estudo, temos que:

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (3.23)$$

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{20^2} = 2,21MPa, \text{ e } \rho_{sw} = 0,2 \cdot \frac{2,21MPa}{522MPa} = 8,47 \cdot 10^{-4}$$

Logo  $\rho_{sw} \geq 8,47 \cdot 10^{-4}$ .

### 3.4 - Cálculo das deformações verticais das vigas

O deslocamento transversal de uma viga depende da rigidez do material e de suas dimensões, assim como das cargas aplicadas e dos apoios (RILEY; LEROY; MORRIS, 2005). Para as vigas que possuem comportamento elástico linear, o valor do máximo deslocamento imediato pode ser determinado através da linha elástica do elemento fletido, admitindo-se as hipóteses iniciais de pequenos deslocamentos, das seções permanecerem planas após a deformação, e também a possibilidade de ser desprezada a parcela de deformação devida ao efeito de esforço cortante.

Seja uma viga prismática sujeita à flexão pura, a curvatura da linha neutra (L) representada pela Figura 3.23, é dada pela Equação 3.24.

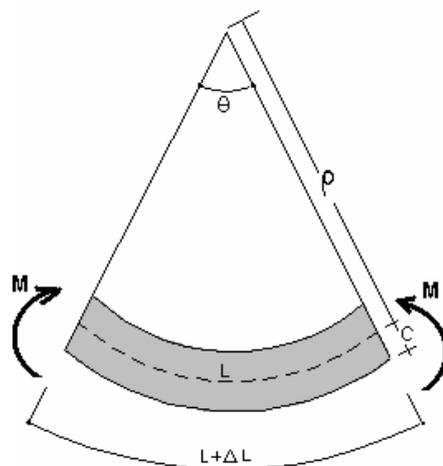


Figura 3.23 - Curvatura de um elemento fletido (RILEY; LEROY; MORRIS, 2005).

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M(x)}{EI} \quad (3.24)$$

M(x) - Momento fletor;

E - Módulo de elasticidade;

I - Momento de inércia da seção transversal;

1/ρ - Curvatura da linha neutra.

Do cálculo elementar a expressão que fornece a curvatura de uma curva plana em um ponto P(x,y) é a seguinte:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (3.25)$$

Nessa Equação, dy/dx e d<sup>2</sup>y/dx<sup>2</sup> são a primeira e a segunda derivadas da função y(x) que a curva representa. No entanto, para a linha elástica de uma viga, a declividade dy/dx é muito pequena, de modo que o seu quadrado pode ser desprezado em face da unidade. Assim, pode-se escrever:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (3.26)$$

Substituindo 1/ρ da Equação 3.24 na Equação 3.26 tem-se:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (3.27)$$

### 3.4.1 - Vigas de seção transversal retangular de concreto reforçado com aço liso

A separação entre o estágio I e o estágio II é definida pelo momento de fissuração. Esse momento pode ser calculado pela seguinte expressão aproximada:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct,m} \cdot I_c}{y_t} \quad (3.28)$$

$\alpha = 1,5$  para seções retangulares.  $\alpha$  é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta;

$Y_t$  – distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada;

$I_c$  – é o momento de inércia da seção bruta;

$f_{ct,m}$  – é a resistência à tração média direta do concreto, no estado limite de deformação excessiva (NBR 6118:2004).

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (3.29)$$

Em seguida calcula-se o valor de  $\alpha_e$ , onde temos:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} \quad (3.30)$$

Sendo:

$$E_{cs} = 4760 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (3.31)$$

Calcula-se então o valor de  $x_{II}$ , dado pela Equação:

$$x_{II} = \frac{\alpha_e \cdot A_s \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b_w \cdot d}{\alpha_e \cdot A_s}} \right)}{b_w} \quad (3.32)$$

O valor de  $I_{II}$  é encontrado usando a Equação:

$$I_{II} = \frac{b_w \cdot x_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s (x_{II} - d)^2 \quad (3.33)$$

Pode-se calcular a rigidez equivalente da viga de concreto baseado no modelo previsto pela NBR 6118:2004.

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \left\{ \left( \frac{Mr}{Ma} \right)^3 I_c + \left[ 1 - \left( \frac{Mr}{Ma} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (3.34)$$

Sendo:

$x_{II}$  - profundidade da linha neutra da viga fissurada;

$I_{II}$  - é o momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II,

$M_a$  - é o momento fletor na seção crítica do vão considerado, momento máximo no vão para vigas bi apoiadas ou contínuas e momento no apoio para balanços, para a combinação de ações considerada nessa avaliação;

$M_r$  - é o momento de fissuração do elemento estrutural, cujo valor deve ser reduzido à metade no caso de utilização de barras lisas;

$E_{cs}$  - é o módulo de elasticidade secante do concreto;

$E_s$  - módulo de elasticidade do aço;

$b_w$  - largura da viga;

$d$  - altura útil da viga;

$A_s$  - área de aço;

A partir da Equação 3.26, o cálculo do maior deslocamento ou flecha segundo a norma NBR 6118:2004. Em uma viga bi-apoiada, com carregamento uniformemente distribuído, considerando a altura constante é dado por:

$$a = \frac{\alpha_c \cdot q \cdot l^4}{(E.I)_{eq}} \quad (3.35)$$

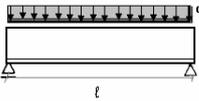
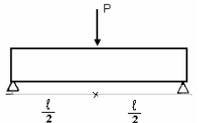
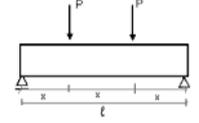
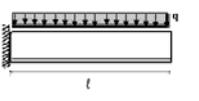
Sendo:

$\alpha_c$  - Coeficiente cujo valor depende da condição estática do sistema considerado (simplesmente apoiado, contínuo) e do tipo de ações atuantes. Valor tabelado e para vigas bi apoiadas com carga uniformemente distribuída tem-se  $\alpha_c = 5/384$ .

q - Carga uniformemente distribuída;

$l$  - Vão da viga;

Tabela 3.11 – Modelo de vigas que serão dimensionadas (TIMOSHENKO; GERE, 1998).

<b>Viga</b>	<b><math>\alpha_c</math></b>	<b>a</b>	<b>Equação</b>
	5/384	$a = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot (E \cdot I)_{eq}}$	(3.36)
	1/24	$a = \frac{P \cdot x(3 \cdot l^2 - 4 \cdot x^2)}{24 \cdot (E \cdot I)_{eq}}$	(3.37)
	1/48	$a = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot (E \cdot I)_{eq}}$	(3.38)
		$a = \frac{q \cdot l^4}{8 \cdot (E \cdot I)_{eq}}$	(3.39)
	1/3	$a = \frac{P \cdot l^3}{3 \cdot (E \cdot I)_{eq}}$	(3.40)

Esta tabela serve como referência para o dimensionamento das vigas de concreto com reforço de bambu, de uso prático, (Ver Tabelas 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5)..

### 3.5 – Abertura máxima de fissuras

Fissuras são inevitáveis em vigas de concreto em que existem tensões de tração, devido aos agentes externos ou internos de tensão ou de deformação (SUSSEKIND, 1984).

A fissuração excessiva de uma viga em concreto armado pode comprometer significativamente sua durabilidade (CHUST, 2001). Deve-se evitar que a viga sofra fissuração excessiva, devida à flexão. Deve-se garantir com razoável probabilidade, que as aberturas das fissuras fiquem dentro de limites que não comprometam as condições de serviço e a durabilidade das vigas.

De acordo com a norma, quando as fissuras apresentarem aberturas que respeitem os limites estabelecidos mostrados na Tabela 3.12, as vigas não apresentaram perda de durabilidade ou segurança quanto aos estados-limites últimos.

Tabela – 3.12 – Abertura máxima das fissuras características ( $w_k$ ), em função da classe de agressividade do ambiente (CHUST, 2001)

I	II	III	IV
$w_k \leq 0,4 \text{ mm}$	$w_k \leq 0,3 \text{ mm}$	$w_k \leq 0,3 \text{ mm}$	<b><math>w_k \leq 0,2 \text{ mm}</math></b>

O dimensionamento para  $M_{d\text{mín.}}$ , será considerado atendido se forem respeitadas as taxas mínimas de armadura ( $\rho_{\text{mín.}}$ ) Tabela 3.13, onde  $w_{\text{mín.}}$ , é o valor mínimo admitido para abertura de fissuras (NBR 6118:2004).

Tabela 3.13 – Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas

Forma da seção	$w_{\text{mín.}}$	Valores de $\rho_{\text{mín.}}(A_{s\text{mín.}}/A_c)$ em % para CA - 50					
		Resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ) em MPa					
		20	25	30	35	40	45
Retangular	0,035	<b>0,150</b>	0,150	0,173	0,201	0,23	0,259

### 3.5.1 – Verificação de fissuras

A NBR 6118:2004, determina que, se  $w$  é a abertura da fissura, deve-se tomar o menor valor entre as equações 3.41 e 3.42.

$$w = \frac{\phi_i}{12,5 \cdot \eta_i} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \frac{3 \cdot \sigma_{si}}{f_{ct,m}} \quad (3.41)$$

$$w = \frac{\phi_i}{(12,5 \cdot \eta_i)} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \left( \frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \quad (3.42)$$

Sendo:

$$\sigma_{si} = \frac{M_{at} \cdot y_{si} \cdot \alpha_e}{I_{xII}} \quad (3.43)$$

$E_{si}$  – Módulo de elasticidade do aço;

$\phi_i$  – Diâmetro da barra que protege a região de envolvimento considerada;

$\rho_{ri}$  – Taxa de armadura passiva ou ativa aderente;

$\eta_i$  – Coeficiente de conformação superficial da armadura considerada;

$f_{ct,m}$  – Resistência média do concreto à tração;

$\sigma_{si}$  – Tensão de tração no centro de gravidade da armadura considerada, calculada no estágio II.

### 3.6 - Caracterização do ensaio para verificação experimental

Os ensaios usados para verificação das resistências das vigas foram organizados da seguinte forma:

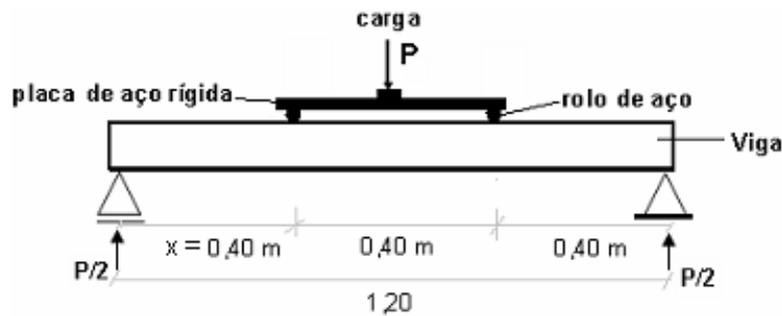


Figura 3.24 - Modelo de ensaio usado - ensaio de Stuttgart

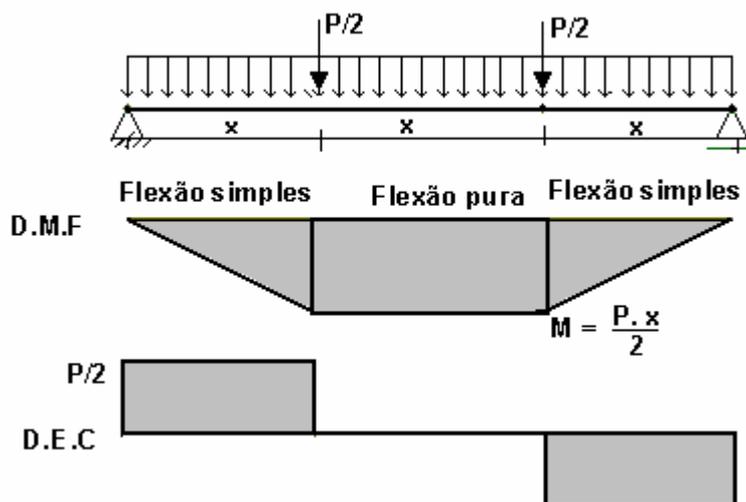


Figura 3.25 - Características dos diagramas verificados nos ensaios

Aplica-se a carga  $P$  em  $Kg_f$  em uma base de aço considerada rígida apoiada em cilindros também de aço. Esta carga  $P$  se divide em duas outras iguais ( $P/2$ ) espaçadas de  $0,40$  m. A carga  $P$  é aplicada a partir do valor de  $50$   $Kg_f$ , sendo acrescida de igual valor até sua ruptura. Os valores correspondentes à deformação vertical e ao alongamento específico na parte central inferior da viga são lidos instantaneamente e registrados no computador através da tecla Print Screen SysRq. Em seguida os valores são fornecidos ao programa excel, calculando-se as variáveis necessárias, organizando-se os valores procurados em Tabelas.

## CAPÍTULO 4

---

### DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO COM REFORÇO DE BAMBU

Pesquisas mostram que vigas de concreto reforçadas com bambu têm comportamento semelhante às reforçadas com aço. As vigas de concreto reforçadas com bambu obedecem à teoria de Bernoulli-Kirkchoff, e observa-se que é possível a aplicação da teoria usual de dimensionamento das vigas de concreto reforçadas por barras de aço no dimensionamento dessas vigas (LIMA JR.et al, 2004).

#### 4.1 – Dimensionamento à flexão – considerações teóricas

O bambu é considerado um material de excelente qualidade devido a suas características estruturais. A relação resistência/peso é mais vantajosa do que a do aço. Verifica-se que o bambu pode ser usado como reforço do concreto em colunas, vigas, lajes, e placas. Na última década houve um aumento considerável do uso do “bambucreto” (concreto com reforço de bambu)

Devem-se observar algumas indicações para bom aproveitamento das vigas de concreto reforçadas com bambu:

1. Ao ser recoberto corretamente, procedendo-se identicamente à utilização do ferro e o concreto, dentro dos limites de serviço, não apresenta fissuras visíveis (GHAVAMI, 2001);
2. Vigas de concreto reforçadas com bambu têm maior resistência que uma viga de dimensão igual e com as mesmas características, mas que não foi reforçada com bambu. (LIMA JR. et al, 2004);
3. A capacidade de aderência do bambu é dada pela sua superfície de contato e é equivalente a 80% da tensão do aço liso-concreto. (CZARNIESKI et al, 2004);

Estudos feitos por GHAVAMI et al. (2000) apud GLENN, (1950), indicam que o rompimento das vigas reforçadas com bambu, ocorre devido à tração no reforço.

Entretanto, existe discordância a este respeito. LIMA JR. et al (2004), apresenta estudos onde mostra que algumas vigas com reforço de bambu podem romper por cisalhamento.

Na Figura 4.1 tem-se a representação da distribuição de tensões no elemento de concreto reforçado com bambu.

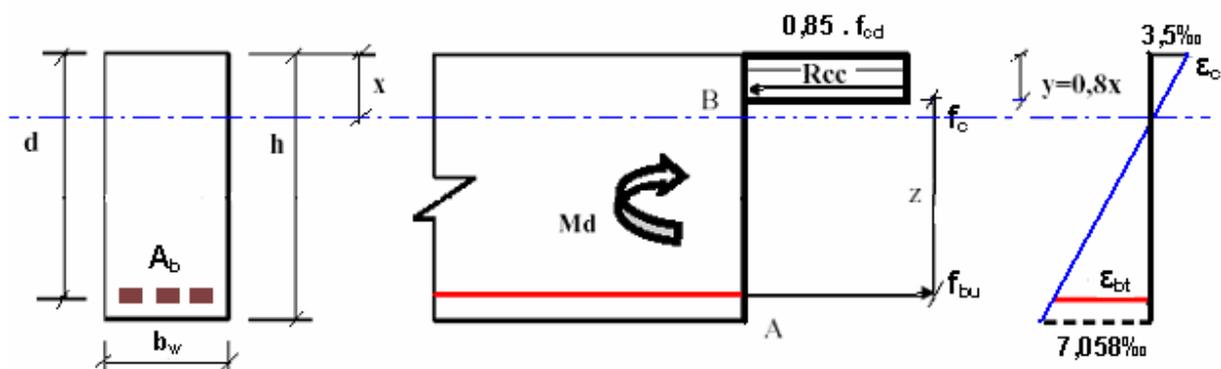


Figura 4.1 – Distribuição de tensões de viga de concreto reforçada com bambu.

O equacionamento para dimensionamento de estruturas de concreto com reforço de bambu segue o mesmo critério de dimensionamento para o concreto com reforço de aço. Observando-se as características do bambu, no que diz respeito à tensão de tração e ao módulo de elasticidade, que são bem menores que o do aço, ficando essas vigas susceptíveis a maiores deformações.

#### 4.1.1 – Equações para o dimensionamento

Sendo:

$R_{cc}$  = Resultante das tensões de compressão no concreto;

$R_{bt}$  = Resultante das tensões de tração no reforço de bambu;

$M_d$  = Momento fletor de cálculo;

$d$  = Altura útil da viga;

$e$  = espessura do recobrimento de concreto;

$e_{sb}$  = espessura do estribo de bambu;

$h_{tb}$  = altura da talisca de bambu.

Tem-se:

$$d = h - \left( e + e_{sb} + \frac{h_{tb}}{2} \right) \quad (4.1)$$

Considerando-se o valor de  $x_{lim}$ . (situação de melhor aproveitamento dos materiais), tem-se:

$$\frac{x}{d} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_{bt}} = \frac{3,5}{3,5 + 7,058} = 0,332, \text{ logo}$$

$$x_{lim} = 0,332 \cdot d \quad (4.2)$$

$z = d - y/2 = d - 0,8 \cdot x/2 = d - 0,4 \cdot x$ , como  $k_x = x/d$ ,  $x = k_x \cdot d$  e  $z = d - 0,4 \cdot x$ , tem-se que:

$$z = (d - 0,4 \cdot x) \quad (4.3)$$

$R_{cc} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot y$ , como  $y = 0,8 \cdot x$ , logo  $R_{cc} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,8 \cdot x$

$$R_{cc} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,8 \cdot x \quad (4.4)$$

Usando-se a condição de equilíbrio:

$\sum M = M_d$ ;  $M_d = R_{cc} \cdot z$ , ou  $M_d = R_{st} \cdot z$ , logo  $M_d = (0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,8 \cdot x) \cdot (d - 0,4 \cdot x)$

$$M_d = (0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,8 \cdot x) \cdot z \quad (4.5)$$

Encontrando-se o valor de  $M_d$ , calcula-se o valor de  $A_b$ , através da equação:

$$A_b = \frac{M_d}{z \cdot f_b} \quad (4.6)$$

Admitindo-se que a peça esteja trabalhando no limite previsto na Equação 4.2, tem-se que a tensão no reforço de bambu é a tensão admissível de cálculo. Logo, se pode escrever a Equação 4.6 da seguinte forma:

$$A_b = \frac{M_d}{z \cdot f_{bd}} \quad (4.7)$$

Pode-se também, determinar  $M_d$  conhecendo-se  $A_b$ ,  $f_{bd}$  e  $z$ .

$$M_d = A_b \cdot z \cdot f_{bd} \quad (4.8)$$

Se for estabelecida inicialmente a área de reforço de bambu tem-se que determinar a posição da linha neutra, valor de  $X$  dado pela Equação 4.9. Em seguida, comparam-se com os valores de  $x_{lim}$  e  $x_{mínimo}$  dados pelas equações 4.2, e 4.10 respectivamente.

Se  $x_{mínimo} < X \leq x_{lim}$ , então se tem  $f_b = f_{bd} = 66,20$  MPa, e  $7,058\% \leq \varepsilon \leq 12,704 \%$ .

$$X = \frac{A_b \cdot f_{bd}}{0,68 \cdot b_w \cdot f_{cd}} \quad (4.9)$$

$$x_{mínimo} = 0,216 \cdot d \quad (4.10)$$

Este limite estabelecido para o dimensionamento das vigas reforçadas com bambu, representado na Figura 4.2, corresponde ao domínio 3 das vigas de concreto armado (Figura 3.20). Deve-se ter  $0,216 \cdot d < X \leq 0,332 \cdot d$ , sendo  $X$  calculado através da Equação 4.9, para que a viga sofra colapso pela ruptura do bambu. Verifica-se, entretanto que se  $x < 0,216 \cdot d$ , a viga sofrerá grandes deformações podendo romper pelo esmagamento do concreto, tendo em vista a pequena área de concreto que será submetida à compressão. Em razão disso procura-se dimensionar as vigas partindo de um valor de  $f_{ck}$  que seja compatível com o percentual de reforço de bambu escolhido (Tabela 4.1).

Sendo:

$$\rho\% = \frac{A_b}{A_c} \cdot 100 \quad (4.11)$$

Tabela – 4.1 – Valores adequados de  $f_{ck}$  de acordo com os percentuais de bambu

%	$\rho = 1$	$\rho = 2$	$\rho = 3$
MPa	$f_{ck} \leq 8$	$8 < f_{ck} \leq 14$	$14 < f_{ck} \leq 20$ MPa

Fazendo-se a verificação para uma viga de seção transversal 15 cm x 30 cm, para  $\rho = 2\%$ , tem-se usando a Equação 4.10.

$X_{\text{mínimo}} = 0,057$  m, substituindo este valor na Equação 4.9, tem - se:

$$0,057 = \frac{9,0 \cdot 10^{-4} \cdot 66,20}{0,68 \cdot 0,15 \cdot f_{cd}} \Rightarrow f_{cd} = \frac{0,05958}{0,00581} \cong 10 \text{ MPa}$$

Como  $f_{ck} = 1,4 \cdot f_{cd} = 1,4 \cdot 10 \cong 14 \text{ MPa}$ .

Verifica-se que para vigas de concreto com reforço de bambu com  $\rho = 2\%$ , deve-se usar concreto com um valor de  $f_{ck} = 14$  MPa.

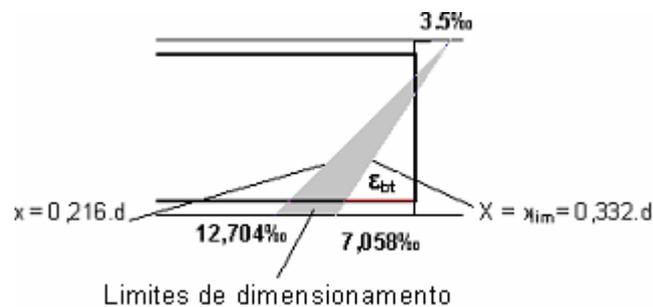


Figura 4.2 – Limites de dimensionamento para vigas de concreto com reforço de *Bambusa vulgaris*

#### 4.1.2 – Parâmetros usados para o dimensionamento

Este estudo tem como orientação básica duas normas, a NBR 6118:2004 para o estudo do trabalho conjunto concreto-bambu, e a NBR 7119:1997 para o estudo e caracterização do bambu.

Para efeito de exemplos de dimensionamento usaremos vigas de seções retangulares, com um valor de  $b_w$  mínimo de 0,10 m e uma relação entre comprimento e a altura de  $h = 10\% \ell$ .

Verifica-se que as vigas de concreto com reforço de *Bambusa vulgaris*, de acordo com a Equação 4.2, o valor mínimo do  $f_{ck}$  é de 8 MPa, observa-se também que não é recomendável trabalhar com concreto de  $f_{ck}$  acima de 20 MPa, pois assim, haveria desperdício de material. Serão usados os seguintes parâmetros para dimensionamento das vigas de concreto reforçadas com bambu:

- 1 -  $f_{ck}$  – Limites da Tabela 4.1;
- 2 - Deformação de cálculo do *Bambusa vulgaris* ( $\epsilon_{bd} = 7,058\%$ );
- 3 - Tensão de cálculo para o bambu ( $f_{bd} = 66,20$  MPa);
- 4 - Cobertura de concreto  $e = 3$  cm, classe de agressividade II(NBR 6118:2004);
- 5 - Estribo de bambu de seção transversal 0,2 cm x 1,0 cm;
- 6 - Seção transversal das taliscas de bambu 1,00x0,60 cm;
- 7 - Diâmetros do agregado graúdo  $\Phi = 0,95$ cm (brita nº0);
- 8 - Espaçamento horizontal e vertical entre as taliscas de bambu  $a_h = a_v = 2,00$  cm;

#### 4.1.3 – Cálculo do máximo momento resistente da seção

Admitindo-se que se conheça as dimensões da seção transversal da viga ( $b_w$  e  $h$ ), o bambu que iremos trabalhar ( $f_{btd}$  e  $\epsilon_{bd}$ ) e a resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ), e que para este material o limite onde se consegue o maior momento resistente é quando  $\epsilon_c = 3,5\%$  e  $\epsilon_{bd} = 7,058\%$ .

Tomando como exemplo de aplicação uma viga que tem os seguintes dados:  $b_w = 12$  cm,  $h = 15$  cm, cobertura de concreto  $e = 3$  cm, espessura dos estribos de bambu de 0,2 cm, e  $f_{ck} = 20$  MPa.

Solução: Usando a Equação 4.1, tem-se:

$$d = h - \left( e + e_{sb} + \frac{h_{tb}}{2} \right) = 0,150 - \left( 0,030 + 0,002 + \frac{0,010}{2} \right) = 0,113m$$

$d = 0,113$  cm, usando a Equação 4.2

$$x_{lim} = 0,332 \cdot 0,113 = 0,038m$$

Tem-se  $x = 0,038m$ , e de acordo com a Equação, 4.3;

$$z = (d - 0,4 \cdot x) = (0,113 - 0,4 \cdot 0,038) = 0,098m$$

$z = 0,098m$ , aplicando a Equação 4.5;

$$M_d = (0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,8 \cdot x) \cdot z$$

$$M_d = \left( 0,85 \cdot \frac{20000}{1,4} \cdot 0,12 \cdot 0,8 \cdot 0,038 \right) \cdot 0,098 = 4,34kN.m$$

Tem-se  $M_{d\text{máx}} = 4,34 \text{ kN.m}$  (momento máximo de cálculo). Logo, o maior momento que pode atuar nesta viga é  $M = \frac{M_d}{1,4} = \frac{4,34}{1,4} = 3,10kN.m$ .

Cálculo da área de bambu:

Aplicando a Equação 4.7;

$$A_b = \frac{M_d}{z \cdot f_{bd}} = \frac{4,34 \cdot 10^3 \text{ N.m}}{0,098m \cdot 66,20 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} = 0,000669m^2 = 6,69cm^2$$

Tem-se uma área de bambu  $A_b = 6,69cm^2$ , correspondendo a um percentual de reforço  $\rho = 3,72\%$ . O valor deste percentual de reforço devido a  $M_{d\text{máx}}$  é próximo de 3%, percentual de reforço de bambu máximo que está sendo admitido neste

trabalho. Verifica-se que este percentual de reforço está próximo do limite permitido pela NBR 6118:2004 para reforço de aço, que admite um percentual máximo de reforço de 4%, que se obtém somando  $A'_s + A_s$ .

Observa-se também que o percentual de 4% de reforço de bambu é grande para ser distribuído na seção transversal de uma viga. Caso se necessite na viga um percentual de reforço acima do limite de 3%, as pesquisas sugerem três alternativas para resolver o problema:

- 1 – Aumentar a seção transversal da viga (NBR 6118:2004);
- 2 – Colocar feixes de barras de bambu, seguindo os mesmos critérios usados para o aço (NBR 6118:2004);
- 3 - Trabalhar com seção em forma de **T** invertido, (JANSSEN, 1995);

Uma vez que este trabalho tem como objetivo a utilização do bambu como substituto do aço em pequenas construções, as alternativas 2 e 3 fogem do objetivo deste trabalho.

Sendo o bambu um material abundante e de baixo custo, considerado como pragas em algumas regiões, e de acordo com o objetivo deste trabalho, foram fixadas como parâmetros de dimensionamentos percentuais fixos de reforço:  $\rho = 1\%$ ,  $\rho = 2\%$  e  $\rho = 3\%$ . O dimensionamento feito a partir da fixação das áreas de reforço tem maior praticidade e simplicidade.

A partir desses parâmetros verificou-se a resistência das vigas quanto à flexão, ao cisalhamento e a deformação, como também a abertura de fissuras.

A metodologia usada para o dimensionamento é a mesma usada para o de reforço de aço liso, conforme já apresentado, fazendo-se uma simplificação no cálculo do valor de  $z$  (braço de alavanca), Figuras 4.3, 4.4, 4.5).

Quando se aumenta a quantidade de reforço na viga, o centro de gravidade deste reforço sofre mudança, se aproximando da linha neutra, e isto faz com que o valor de  $z$  diminua, passando para um valor  $z_1$  (Figura 4.4 e 4.5).

Dada a área de reforço, através da Equação 4.9, determina-se o valor de  $x$  (posição da linha neutra), este valor deve ser menor ou igual à  $x_{lim}$ , isto é  $x \leq x_{lim}$ , onde  $x_{lim}$  é dado pela Equação 4.2, esta condição sendo satisfeita, tem-se  $f_b = f_{bd} = 66,20 \text{ MPa}$ .

Tomando como modelo ilustrativo uma viga de seção transversal 12 cm x 15 cm, têm-se as seguintes considerações:

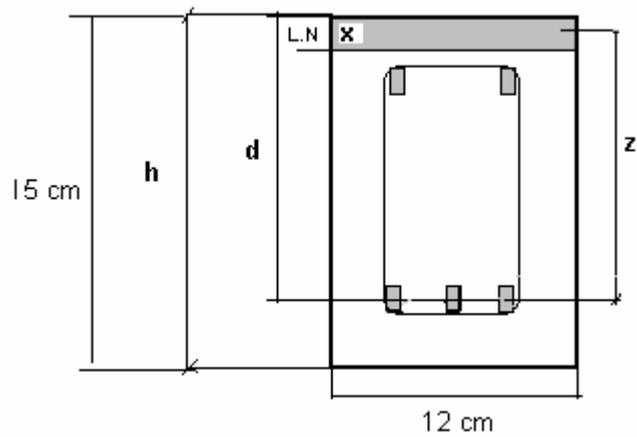


Figura 4.3 - Determinação do valor de  $z$  - Para  $\rho = 1\%$ ,  $z = d - 0,4 \cdot x$ .

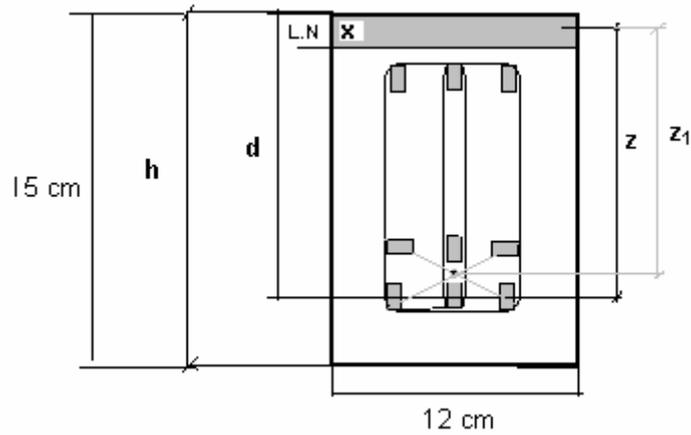


Figura 4.4 - Determinação do valor de  $z$  - Para  $1\% < \rho < 2\%$ ,  $z_1 = \frac{3}{4} \cdot d$ .

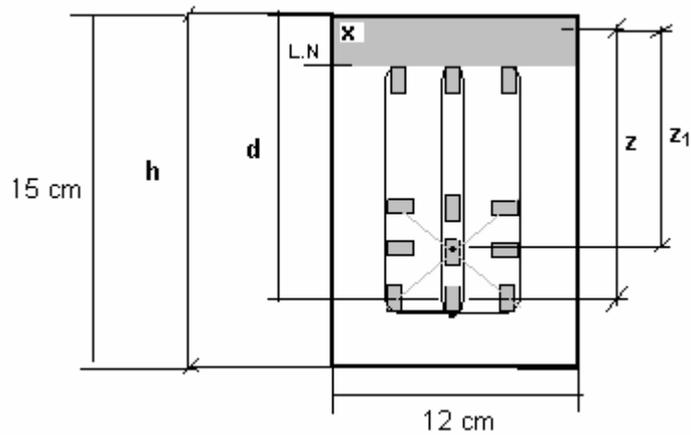


Figura 4.5 - Determinação do valor de  $z$  - Para  $2\% < \rho \leq 3\%$ ,  $z_1 = \frac{2}{3} \cdot d$ .

**4.1.4. – Dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu para  $\rho = 1\%$ ,  $f_{ck} = 8 \text{ MPa}$**

De acordo com as Equações 4.8 e 4.2 pode-se calcular simplificadaamente o valor de  $M_d$  da seguinte forma:

$$M_d = A_b \cdot z \cdot f_{bd} = \frac{b_w \cdot h}{100} (d - 0,4 \cdot x) \cdot 66,20 \cdot 10^3 = 574 \cdot b_w \cdot d \cdot h$$

$$M_d = 574 \cdot b_w \cdot d \cdot h \quad (4.12)$$

Sendo:  $b_w$ , largura da base da seção transversal da viga;  $h$ , altura da viga, e  $d$  a altura útil, dada pela Equação 4.1; dados em metros.

Esta Equação permite determinar o momento de cálculo das vigas de concreto com reforço de bambu para  $\rho = 1\%$ . Fixando-se a largura das vigas em  $b_w = 0,12 \text{ m}$ , valor comum das vigas usadas em construções rurais, tem-se os valores mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Determinação de  $M_d$  - Momento de cálculo

$\ell$ (m)	altura h(m)	d m	$A_{\text{befe.}}$ cm <sup>2</sup>	* $M_{d\text{máx.}}$ KN.m
1,00	0,10	0,063	1,20	0,43
1,25	0,13	0,088	1,80	0,79
<b>1,50</b>	<b>0,15</b>	<b>0,113</b>	<b>1,80</b>	<b>1,17</b>
1,75	0,18	0,138	2,40	1,71
2,00	0,20	0,163	3,00	2,25
2,25	0,23	0,188	3,60	2,98
2,50	0,25	0,213	4,20	3,67
2,75	0,28	0,238	4,80	4,59
3,00	0,30	0,263	5,40	5,43

\* Valor calculado a partir da Equação 4.12

**4.1.5 – Dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu para  $\rho = 2\%$ ,  $f_{ck} = 14 \text{ MPa}$**

Também de acordo com a Equação 4.8, pode-se calcular o valor de  $M_d$  lembrando que  $z = z_1 = \frac{3}{4} \cdot d$ , tem-se:

$$M_d = A_b \cdot z \cdot f_{bd} = \frac{2 \cdot b_w \cdot h}{100} \cdot \frac{3}{4} \cdot d \cdot 66,20 \cdot 10^3 = 993 \cdot b_w \cdot d \cdot h$$

$$M_d = 993 \cdot b_w \cdot d \cdot h \tag{4.13}$$

Sendo os valores de  $b_w$ , a base da seção transversal da viga,  $h$  sua altura, e  $d$  a altura útil, calculada pela Equação 4.1, todos em metros. Para um valor de  $b_w = 0,12 \text{ m}$ , tem-se os valores na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Determinação de  $M_d$  - Momento de cálculo

$\ell$ (m)	altura h(m)	d m	$A_b$ eft. cm <sup>2</sup>	* $M_{dm\acute{a}x}$ KN.m
1,00	0,10	0,063	2,40	0,75
1,25	0,13	0,088	3,00	1,36
<b>1,50</b>	<b>0,15</b>	<b>0,113</b>	<b>3,60</b>	<b>2,02</b>
1,75	0,18	0,138	4,80	2,96
2,00	0,20	0,163	6,00	3,88
2,25	0,23	0,188	7,20	5,15
2,50	0,25	0,213	8,40	6,35
2,75	0,28	0,238	9,60	7,94
3,00	0,30	0,263	10,80	9,40

\* Valor calculado a partir da Equação 4.13

**4.1.6 Dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu,  $\rho = 3\%$ ,  $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$**

Usando o mesmo critério dos itens anteriores para  $z = z_1 = \frac{2}{3} \cdot d$ , tem-se:

$$M_d = A_b \cdot z \cdot f_{bd} = \frac{3 \cdot b_w \cdot h}{100} \cdot \frac{2}{3} \cdot d \cdot 66,20 \cdot 10^3 = 1324 \cdot b_w \cdot d \cdot h$$

$$M_d = 1324 \cdot b_w \cdot d \cdot h \quad (4.14)$$

Sendo os valores de  $b_w$ , a base da seção transversal da viga,  $h$  sua altura, e  $d$  a altura útil calculada pela Equação 4.1, todos em metros. Para um valor de  $b_w = 0,12 \text{ m}$ , tem-se os valores mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Determinação de  $M_d$  - Momento de cálculo

$\ell$ (m)	altura h(m)	d m	$A_b$ eff. cm <sup>2</sup>	* $M_{dm\acute{a}x}$ KN.m
1,00	0,10	0,063	3,00	1,00
1,25	0,13	0,088	4,20	1,75
<b>1,50</b>	<b>0,15</b>	<b>0,113</b>	<b>5,40</b>	<b>2,69</b>
1,75	0,18	0,138	7,20	3,84
2,00	0,20	0,163	8,40	5,18
2,25	0,23	0,188	10,20	6,72
2,50	0,25	0,213	12,00	8,46
2,75	0,28	0,238	14,40	10,40
3,00	0,30	0,263	16,20	12,54

\* Valor calculado a partir da Equação 4.14

**Exemplo 1 – Verificação do momento máximo de cálculo**

Tomando-se como exemplo de aplicação uma viga de seção transversal retangular com 12 cm x 15 cm, e comprimento de 1,50 m, com um percentual de reforço de *Bambusa vulgaris*  $\rho = 3\%$ , qual o momento de cálculo que esta viga suporta se fabricada com concreto de  $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$ ?

Solução:

Encontra-se na Tabela 4.4 a resposta que corresponde ao valor de 2,68 KN.m, que foi obtido da seguinte forma:

1 – Determinação do valor de x - posição da linha neutra. Equação 4.9.

$$X = \frac{A_s \cdot f_{bd}}{0,68 \cdot b_w \cdot f_{cd}} = \frac{5,4 \cdot 10^{-4} \cdot 66,20 \cdot 10^6}{0,68 \cdot 0,12 \cdot \frac{20 \cdot 10^6}{1,4}} = 0,031m$$

$$x_{lim} = 0,332 \cdot d = 0,332 \cdot 0,113 = 0,038 \text{ m.}$$

Observa-se que  $X < x_{lim}$ , pois  $0,031 \text{ m} < 0,038 \text{ m}$ , logo se tem que  $f_b = f_{bd} = 66,20 \text{ MPa}$ .

$$\text{Fazendo-se } z = z_1 = 2/3d = 2/3 \cdot 0,113 = 0,075 \text{ m.}$$

2 – Determinação do momento de cálculo -  $M_d$ . Equação 4.8.

$$M_d = A_b \cdot z \cdot f_{bd} = 5,4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,075 \cdot 66,20 \cdot 10^6 = 2681,10 \text{ N.m} = 2,69 \text{ kN.m}$$

De forma simplificada a partir da Equação 4.14, tem-se:

$$M_d^{máx.} = 1324 \cdot b_w \cdot h \cdot d = 1324 \cdot 0,12 \cdot 0,15 \cdot 0,113 = 2,69 \text{ kN.m}$$

Sendo  $b_w$ ,  $h$  e  $d$  em metros, logo  $M_{dmáx.}$  é calculado em kN.m.

## 4.2 – Cisalhamento – Cálculo do reforço vertical

Os estribos que serão usados são de bambu com espessura de 0,2 cm e largura de 1 cm. A determinação da quantidade dos mesmos será feita de acordo com as equações já apresentadas no item 3.3.2, que se transformam para o caso de reforço de bambu ficando:

$$s = \frac{A_{bw} \cdot d \cdot f_{bd}}{1,1 \cdot V_{sd}} \quad (4.15)$$

Sendo:

**s** – é o espaçamento entre os estribos de bambu;

**A<sub>bw</sub>** – área da seção transversal dos estribos de bambu;

**d** – a altura útil da viga;

**V<sub>sd</sub>** – Esforço cortante de cálculo,  $V_{sd} = 1,4 \cdot V_s$ ;

**f<sub>bd</sub>** – Tensão de tração de cálculo para os estribos de *Bambusa vulgaris*,

**f<sub>bd</sub> = 66,20MPa**;

Observa-se que os estribos de bambu são feitos da parte externa do mesmo com espessura de 0,2 cm, sendo a parte mais resistente, pois a resistência do bambu aumenta da parte interna para parte externa. Por simplicidade neste trabalho se considera o valor de  $f_{bd}$  para os estribos o mesmo calculado para a tração das varetas, mesmo sabendo-se que a parte externa do colmo de bambu de que são feitos os estribos é bem mais resistente, sendo um fator favorável à segurança. Aplica-se este valor na Equação 4.15.

$$s = \frac{2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,113 \cdot 66,20 \cdot 10^6}{1,1 \cdot 10,06 \cdot 10^3} \cong 0,03m$$

Como se tem uma viga de 1,50 m colocam-se 50 estribos de bambu, conforme a Figura 4.6.



Figura 4.6 – Detalhamento da viga do exemplo 1 – Corte transversal e longitudinal

Deve-se observar, entretanto, que se o espaçamento entre os estribos forem menores que 2 cm, a viga deve ser redimensionada para o esforço cortante, haja vista que o espaçamento mínimo que se está admitindo é  $s = 2$  cm.

#### 4.2.1 – Dimensionamento do reforço vertical

De acordo com a metodologia já apresentada, e usando-se a Equação 4.15, têm-se os resultados apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Espaçamento do reforço vertical para as vigas bi-apoiadas com cargas uniformemente distribuídas e  $\rho = 1\%$

$b_w$ (m)	$\ell$ (m)	altura h(m)	d m	q kN/m	$V_{sd}$ kN	s (cm)
0,12	1,00	0,10	0,063	3,47	2,43	6
0,12	1,25	0,13	0,088	4,03	3,53	6
<b>0,12</b>	<b>1,50</b>	<b>0,15</b>	<b>0,113</b>	<b>4,15</b>	<b>4,36</b>	<b>6</b>
0,12	1,75	0,18	0,138	4,47	5,48	6
0,12	2,00	0,20	0,163	4,49	6,29	6
0,12	2,25	0,23	0,188	4,71	7,41	6
0,12	2,50	0,25	0,213	4,69	8,22	6
0,12	2,75	0,28	0,238	4,86	9,35	6
0,12	3,00	0,30	0,263	4,83	10,14	6

Usando a mesma metodologia, para as vigas com 2% de reforço se tem os resultados apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Cálculo dos espaçamentos do reforço vertical para as vigas bi-apoiadas com cargas uniformemente distribuídas e  $\rho = 2\%$

$b_w$ (m)	$\ell$ (m)	altura h(m)	d m	q kN/m	$V_{sd}$ kN	s (cm)
0,12	1,00	0,10	0,063	6,01	4,20	3
0,12	1,25	0,13	0,088	6,98	6,11	3
<b>0,12</b>	<b>1,50</b>	<b>0,15</b>	<b>0,113</b>	<b>7,18</b>	<b>7,54</b>	<b>3</b>
0,12	1,75	0,18	0,138	7,73	9,47	3
0,12	2,00	0,20	0,163	7,77	10,88	3
0,12	2,25	0,23	0,188	8,14	12,82	3
0,12	2,50	0,25	0,213	8,12	14,21	3
0,12	2,75	0,28	0,238	8,40	16,17	3
0,12	3,00	0,30	0,263	8,36	17,55	3

De acordo com a metodologia já apresentada, para as vigas com reforço de bambu  $\rho = 3\%$ , se tem os valores apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Cálculo dos espaçamentos do reforço vertical para as vigas bi-apoiadas com cargas uniformemente distribuídas e  $\rho = 3\%$

$b_w$ (m)	$\ell$ (m)	altura h(m)	d m	q kN/m	$V_{sd}$ kN	s (cm)
0,12	1,00	0,10	0,063	8,01	5,61	3
0,12	1,25	0,13	0,088	9,31	8,14	2
<b>0,12</b>	<b>1,50</b>	<b>0,15</b>	<b>0,113</b>	<b>9,58</b>	<b>10,05</b>	<b>3</b>
0,12	1,75	0,18	0,138	10,31	12,63	2
0,12	2,00	0,20	0,163	10,36	14,50	3
0,12	2,25	0,23	0,188	10,86	17,10	2
0,12	2,50	0,25	0,213	10,83	18,95	3
0,12	2,75	0,28	0,238	11,20	21,56	2
0,12	3,00	0,30	0,263	11,14	23,40	3

#### 4.3 – Verificação do comprimento de ancoragem das taliscas de bambu

Neste trabalho, conforme já mencionado anteriormente, será usado com tensão de aderência de cálculo bambu-concreto ( $\tau_{bd}$ ) o valor correspondente a 80% da tensão de aderência de cálculo aço liso-concreto. Para o valor de  $f_{ck} = 20$  MPa usando a Equação 2.5.

$$f_{ctd} = \frac{0,21 \cdot (f_{ck})^{\frac{2}{3}}}{1,4} = \frac{0,21 \cdot 20^{\frac{2}{3}}}{1,4} = 1,105 MPa$$

Considerando o aço liso para um diâmetro de 8 mm, para região de boa aderência, e usando a Equação 2.4, tem-se:

$$f_{ad.u} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,105 = 1,105 MPa$$

Fazendo  $\tau_{bd} = 80\%$  de  $f_{bd}$  tem-se  $\tau_{bd} = \mathbf{0,884 MPa}$ , este é o valor que será usado para verificação do comprimento de ancoragem das taliscas de bambu.

Utilizando-se a Equação (2.8), se obtém:

$$l_b = \frac{B \cdot H \cdot f_{bd}}{2 \cdot (B + H) \cdot \tau_{bd}} = \frac{0,6 \cdot 1,0 \cdot 66,20}{2 \cdot (0,6 + 1,0) \cdot 0,884} = 14,04 cm$$

Observa-se que é necessário um comprimento de ancoragem reto de no mínimo 14,04 cm para as vigas, ou um gancho de comprimento  $L = 9,83$  cm.

Como não é possível se fazer ganchos com varetas de bambu, sugerem-se a colocação de pinos de aço ou do próprio bambu (CZARNIESKI, et al, 2004).

## 4.4 – Determinação da deformação vertical de vigas de concreto reforçadas com bambu.

### 4.4.1 - Considerações de cálculo

Para o cálculo das deformações das vigas de concreto reforçadas com bambu, será usado o mesmo equacionamento utilizado para o cálculo das deformações imediatas das vigas reforçadas com aço, com algumas observações. De acordo com as pesquisas o fator limitante de vigas de concreto reforçadas com bambu é sua deformação. Portanto, é importante verificar a deformação que a viga sofre, mesmo que ela suporte bem o carregamento determinado.

1 - O momento de fissuração de vigas de concreto reforçadas com o aço liso é  $M_{r1} = M_r/2$ , com o reforço de bambu será usado o mesmo critério;

2 - Para as vigas reforçadas com bambu, como o  $E_b \ll E_s$ , o fator  $\alpha_e = E_b/E_{cs} < 1$ ;

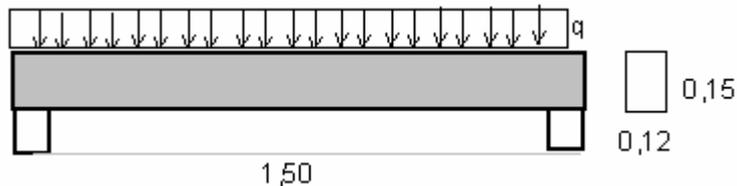
3 - O valor das deformações verticais admissíveis (flechas) das vigas de concreto reforçadas com bambu será considerado  $a = l/350$ , para vigas bi-apoiadas, e  $a = l/175$  para vigas engastadas, previsto para vigas de madeira (NBR 7190: 1997), tendo em vista que não existe norma que regulamente estes valores para vigas de concreto com reforço de bambu. Será usado um valor menor do que prevê a norma, para vigas de concreto reforçadas com aço, que considera o valor para vigas bi-apoiadas  $a_{m\acute{a}x.} = l/250$ , porque sendo o reforço de bambu mais frágil é importante se trabalhar favorável a segurança.

4 - Neste estudo  $\alpha_e = E_b/E_{cs}$ ,  $\alpha_e = 0,441$ , para  $f_{ck} = 20$  MPa, usando as Equações 3.32 e 3.33 calcula-se  $x_{II}$  e  $I_{II}$ , respectivamente, para a viga reforçada com bambu. Onde  $x_{II}$  é a profundidade da linha neutra e  $I_{II}$  é o momento de inércia da peça no estágio II puro (CHUST, 2001).

Usam-se as equações já apresentadas no item 3.4.1 para o cálculo das deformações das vigas reforçadas com bambu com as observações apresentadas.

#### 4.4.2 - Exemplo 2 - Verificação da deformação vertical

1 – Determinar a deformação que a viga bi-apoiada do exemplo 1 sofre, para o momento de cálculo correspondente, supondo que ela está submetida a um carregamento uniformemente distribuído.



Dados:

Concreto  $f_{ck} = 20$  MPa

Seção transversal  $0,12$  cm x  $0,15$  cm

$l = 1,50$  m

$A_b = 3\%A_c = 0,03 \times 0,12 \times 0,15 = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$

Solução:

1 – Determinação do valor de M

$$M = \frac{M_d}{1,4} = \frac{2,68}{1,4} = 1,92 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

2 – Determinação de q (carregamento uniformemente distribuído).

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} \Rightarrow q = \frac{8 \cdot M}{l^2} = \frac{8 \cdot 1,92}{1,5^2} = 6,83 \text{ kN} / \text{m}$$

3 – Cálculo do valor de  $x_{II}$  (profundidade da linha neutra da seção fissurada).

Substituindo os valores correspondentes na Equação 3.32, tem-se:

$$x_{II} = \frac{\alpha_e \cdot A_s \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b_w \cdot d}{\alpha_e \cdot A_b}} \right)}{b_w}$$

$$x_{II} = \frac{0,441 \cdot 5,4 \cdot 10^{-4} \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 0,12 \cdot 0,113}{0,441 \cdot 5,4 \cdot 10^{-4}}} \right)}{0,12} = \frac{2,38 \cdot 10^{-4} \left( -1 + \sqrt{114,883} \right)}{0,12} = 0,019m$$

4 - Cálculo de  $I_{II}$  (Momento de Inércia da viga fissurada).

Substituindo os valores na Equação 3.33, para a área de bambu correspondente tem-se:

$$I_{II} = \frac{b_w \cdot x^3}{3} + \alpha_e \cdot A_b \cdot (x_{II} - d)^2$$

$$I_{II} = \frac{0,12 \cdot 0,019^3}{3} + 0,441 \cdot 5,4 \cdot 10^{-4} (0,113 - 0,019)^2 = 2,864 \cdot 10^{-7} + 2,104 \cdot 10^{-6} = 2,391 \cdot 10^{-6}$$

Logo,  $I_{II} = 2,391 \cdot 10^{-6} m^4$

5 – Determinação de  $I_c$  (momento de inércia da viga de concreto).

$$I_c = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,12 \cdot 0,15^3}{12} = 3,375 \cdot 10^{-5} m^4$$

6 – Cálculo do momento de fissuração  $M_r$ .

Substituindo os valores na Equação 3.28, tem-se:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct,m} \cdot I_c}{y_i} = \frac{1,5 \cdot 2,213 \cdot 10^6 \cdot 3,375 \cdot 10^{-5}}{\frac{0,15}{2}} = 1,494 kN \cdot m$$

Para o caso do reforço de bambu, considera-se o mesmo critério usado para o aço liso.

$$M_{r1} = \frac{M_r}{2} = \frac{1,494}{2} = 0,747 kN \cdot m$$

## 7 - Cálculo de $(E.I)_{eq}$ .

Lembrando-se que:

$$E_{cs} = 4760 \cdot \sqrt{f_{ck}} = 4760 \cdot \sqrt{20} = 21287,367 MPa$$

Substituindo os valores encontrados na Equação 3.34, tem-se:

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \left\{ \left( \frac{Mr}{Ma} \right)^3 I_c + \left[ 1 - \left( \frac{Mr}{Ma} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c$$

$$(EI)_{eq} = 21287,367 \cdot 10^6 \cdot \left\{ \left( \frac{0,747}{1,921} \right)^3 \cdot 3,375 \cdot 10^{-5} + \left[ 1 - \left( \frac{0,747}{1,921} \right)^3 \right] \cdot 2,391 \cdot 10^{-6} \right\}$$

$$(EI)_{eq} = 90118,119 \text{ N.m}^2 = \mathbf{90,118 \text{ kN.m}^2}$$

## 8 – Determinação de $E_{cs} \cdot I_c$

$$E_{cs} \cdot I_c = 21287,367 \cdot 10^6 \cdot 3,375 \cdot 10^{-5} = 718448,636 \text{ N.m} = 718,449 \text{ kN.m}$$

Observa-se que  $(EI)_{eq} \leq E_{cs} I_c$

## 9 – Cálculo da flecha imediata – $a$ (mm)

Substituindo os dados encontrados na Equação 3.35, tem-se:

$$a = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot (E.I)_{eq}} = \frac{5 \cdot 6,81 \cdot 10^3 \cdot 1,5^4}{384 \cdot 90,118 \cdot 10^3} = 4,981 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 4,981 \text{ mm}$$

Logo, a deformação que a viga bi-apoiada sofre com o carregamento admitido é 4,981 mm, maior que o valor admissível que é de 4,17 mm. Esta viga deve ser redimensionada para uma seção transversal maior.

Observa-se que o fator determinante no dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu é sua deformação vertical.

Resumindo o cálculo dos parâmetros para determinação das flechas, em função das cargas, tem-se na Tabela 4.8 os parâmetros geométricos.

Tabela 4.8 – Cálculo dos parâmetros para determinação da flecha da viga bi-apoiada com reforço de bambu

$b_w$ (m)	altura h(m)	$\ell$ m	x m	$y_t$ m	X (m)	d (m)	$I_c$ m <sup>4</sup>
0,120	0,15	1,50	0,50	0,075	0,0192	0,1130	0,0000338

Na Tabela 4.9, tem-se os parâmetros relativos aos materiais.

Tabela 4.9 – Determinação do momento de fissuração da viga reforçada com bambu

$f_{ck}$ MPa	$E_{cs}$ MPa	$E_b$ MPa	$f_{ct. m.}$ MPa	$\alpha e$	$\alpha$	$I_{II}$ m <sup>4</sup>
20,00	21287,3671	9380,0	2,210	0,441	1,5	2,3689E-06

Considerando-se o momento de fissuração  $M_{r1} = Mr/2 = 0,747 \text{ kN.m}$ ,  $E_{cs} \cdot I_c = 0,718 \text{ MN.m}^2$ , e sendo  $a_{\text{máx.adm.}} = a = \ell/350 = 4,29 \text{ mm}$  tem-se na Tabela 4.10 o cálculo das flechas em função das cargas.

Tabela 4.10 – Cálculo das flechas imediatas das vigas bi apoiadas com reforço de bambu em função dos carregamentos,

Cargas q(KN/m)	$M_a$ KN.m	$(E.I)_{eq.}$ MN.m <sup>2</sup>	a mm
1,96	0,55	1,706E+00	7,57E-02
2,45	0,69	8,982E-01	1,80E-01
2,94	0,83	5,410E-01	3,58E-01
3,43	0,96	3,594E-01	6,29E-01
3,92	1,10	2,575E-01	1,00E+00
4,41	1,24	1,959E-01	1,48E+00
4,90	1,38	1,565E-01	2,06E+00
5,39	1,52	1,302E-01	2,73E+00
5,88	1,65	1,119E-01	3,46E+00
<b>6,39</b>	<b>1,80</b>	<b>9,836E-02</b>	<b>4,28E+00</b>
6,88	1,94	8,886E-02	5,10E+00

Observa-se, portanto que a carga máxima que esta viga suporta de acordo com sua deformação admissível é de **6,39 kN/m**

#### 4.5 - Dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu, em função da deformação vertical admissível.

De acordo com o item anterior, verificou-se que é de fundamental importância o cálculo da deformação vertical das vigas de concreto com reforço de bambu. De modo geral, as deformações destas vigas, quando submetidas às cargas dimensionadas, de acordo com o critério da carga admissível, são maiores que o limite previsto,  $a = l/350$ . Observa-se que não se devem permitir grandes deformações específicas do bambu, tendo em vista que quando submetido à tração, o mesmo não apresenta patamar de escoamento, indicativo do colapso da estrutura, como o apresentado pelo aço. Desta forma se conclui que o dimensionamento dessas vigas deve ser feito tendo como referência sua flecha admissível.

Para se definir o dimensionamento adequado de estruturas de engenharia, devem-se prever as condições de falha da mesma. Define-se falha como o estado ou condição na qual um elemento ou estrutura não funciona mais como se pretendia (RILEY; LEROY; MORRIS, 2005). Assim, deve-se observar a falha elástica destas vigas, que ocorre em consequência de uma deformação elástica excessiva. Quando uma estrutura destina-se a evitar a falha elástica, a rigidez do material, indicado pelo seu módulo de elasticidade longitudinal, é a principal propriedade a ser considerada (RILEY; LEROY; MORRIS, 2005).

Observa-se que esta é uma característica que deve ser verificada neste estudo, haja vista que o bambu como reforço do concreto em substituição ao aço, tem módulo de elasticidade longitudinal à tração bem menor. Sendo então esta viga, susceptível a deformações maiores para as mesmas cargas.

A maior parte dos problemas de projeto e dimensionamento ocorre porque envolve muitas variáveis desconhecidas. As tensões reais que surgiram na estrutura são desconhecidas porque os cálculos baseiam-se em hipótese quanto à distribuição de tensões no material. Por causa dessas e outras variáveis desconhecidas, é comum fazer um dimensionamento para a carga exigida para produzir a falha do material, que é maior do que a carga real estimada, ou usar uma tensão admissível, abaixo da tensão exigida para produzir a falha.

Verificação feita para vigas com reforço de bambu,  $\rho = 3\%$ , percentual definido para se colocar nas vigas sugerido nesta pesquisa, haja vista que o bambu

é um material abundante, e que, as mesmas apresentam maior rigidez com esse percentual.

Fazendo-se a análise de correlação linear entre os valores de  $M_d$  e os valores de  $M$ , para vigas bi-apoiadas se obtêm os seguintes resultados:

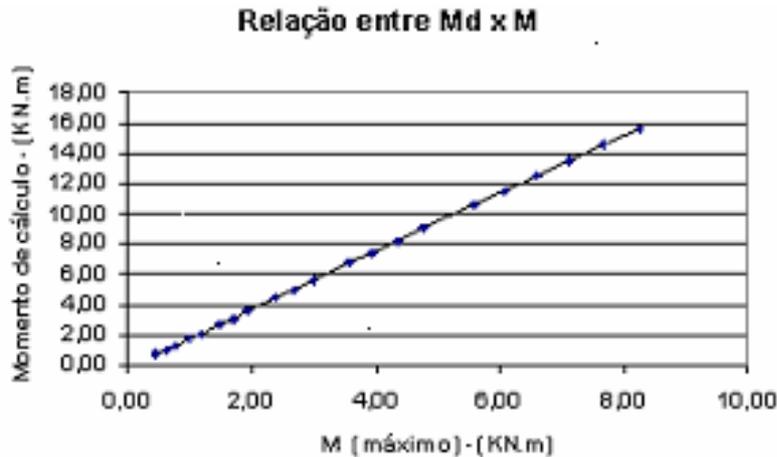


Figura 4.7 - Gráfico que representa a relação entre o momento ( $M_d$ ) calculado pela Equação 4.14, e o momento ( $M$ ), que provoca a flecha admissível  $a = l/350$ .

De acordo com o gráfico 4.7 se tem:

$$M_d = 1,896 \cdot M, \text{ para um coeficiente de correlação de } 0,999996117.$$

Assim, se conclui que para vigas bi-apoiadas, tem-se:

$$M = \frac{M_d}{1,9} \tag{4.16}$$

Tomando-se como ilustração a viga do exemplo 2, têm-se:  $M_{dmáx.} = 2,69 \text{ kN.m}$

$$M = \frac{2,69}{1,9} = 1,42 \text{ kN.m}, \text{ logo: } M_{amáx.} = 1,42 \text{ kN.m}.$$

Conclui-se que, o momento máximo para o qual a viga deve ser dimensionada é de 1,42 kN.m.

#### 4.5.1-Vigas bi-apoiadas

Observa-se que o valor de  $M_{dmáx.}$ , calculado pela Equação 4.14 precisa ser corrigido por um fator para se adequar a verificação da flecha admissível. Para vigas bi-apoiadas de concreto reforçadas com bambu verifica-se que este fator de correção em função da flecha admissível  $\gamma_d = 1,90$ . Assim, encontra-se a Equação 4.17, obtida da correção da Equação 4.14.

Sendo a Equação 4.17 definida para o dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu, e este dimensionamento, deve ser feito em função da deformação vertical admissível.

Para vigas com percentual de reforço  $\rho = 3\%$ .

$$M = \frac{M_d máx}{\gamma_d} = \frac{1324}{1,90} \cdot b_w \cdot h \cdot d$$
$$M_{máx.} = 697 \cdot b_w \cdot h \cdot d \quad (4.17)$$

#### 4.5.2 - Vigas em balanço

Para vigas em balanço observa-se que devido às condições de estaticidade suas flechas adquirem valores maiores que as bi-apoiadas. Considera-se neste trabalho o comprimento máximo das vigas em balanço  $\ell = 1,50$  m. Sendo assim os valores dos momentos atuantes  $M$  calculados a partir da Equação 4.12, devem ser corrigidos por um fator  $\gamma_d = 2,50$ , afim de se ter valores compatíveis com suas deformações verticais. Logo para vigas em balanço, com  $\rho = 3\%$ , o valor do momento máximo atuante é dado pela Equação 4.18.

$$M = \frac{M_d máx}{\gamma_d} = \frac{1324}{2,50} \cdot b_w \cdot h \cdot d$$
$$M_{máx.} = 530 \cdot b_w \cdot h \cdot d \quad (4.18)$$

## 4.6 – Verificação de fissuras

A verificação de fissuras nas vigas de concreto com reforço de bambu será feita usando as equações 3.41 e 3.42.

Será admitido como critério o valor limite de aberturas de fissuras estabelecido considerando a classe de agressividade IV, isto permite uma abertura de fissuras  $w_k = 0,2$  mm, tendo em vista que o bambu é uma fibra vegetal, sendo susceptível a ataque de fungos.

Fazendo-se a verificação para a viga do exemplo 2, tem-se:

Admitindo-se que o momento máximo que a viga pode suportar é de 1,42 kN.m, em função da sua deformação (Equação 4.17), procede-se da seguinte forma:

### 1. Determinação de $\sigma_{si}$ usando a Equação 3.43

$$\sigma_{si} = \frac{M_{at} \cdot y_{si} \cdot \alpha_e}{I_{xII}}$$

Sendo  $y_{si}$  (distância da armadura  $i$  até a linha neutra no estágio II)  
 $y_{si} = h - x_{II} - e = 0,15 - 0,0193 - 0,03 = 0,101m$

$I_{II}$  é o momento de inércia da viga fissurada  $I_{II} = 2,38 \cdot 10^{-6} m^4$

$$\alpha_e = 0,441, \left( \alpha_e = \frac{E_{cs}}{E_b} \right)$$

Substituindo os dados na Equação 4.11 tem-se:

$$\sigma_{si} = \frac{M_{at} \cdot y_{si} \cdot \alpha_e}{I_{xII}} = \frac{1,42 \cdot 10^3 \cdot 0,101 \cdot 0,441}{2,38 \cdot 10^{-6}} \cong 27MPa$$

2 – Determinação de  $\Phi_i$  - para taliscas de bambu de seção transversal de 0,6 cm x 1,00 cm.

Fazendo uma equivalência da seção transversal retangular como sendo uma seção circular equivalente tem-se:

$$\pi \cdot d = (0,6 + 1) \cdot 2 \Rightarrow d = \frac{3,20}{\pi} = 1,019 \text{ cm} \Rightarrow \phi \cong 10,19 \text{ mm}$$

1 – Determinação de  $f_{ct,m}$ .

Usando a Equação 3.18

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 0,3 \sqrt[3]{20^2} = 2,213 \text{ MPa}$$

Fazendo  $\eta_1 = 1$ , mesmo valor usado para barras lisas, e  $E_b = 9,38 \text{ GPa}$ , substituindo na Equação 3.41, tem-se:

$$w = \frac{10,19}{12,5 \cdot 1} \cdot \frac{27 \cdot 10^6}{9,38 \cdot 10^9} \cdot \frac{3 \cdot 27}{2,213} = \frac{2,229 \cdot 10^{10}}{2,60 \cdot 10^{11}} = 0,086 \text{ mm} \quad (3.41)$$

Comparando com a Tabela 3.11, observa-se que este valor é menor que  $w_k$  recomendável para estruturas de concreto, classe de agressividade IV, cujo valor é de 0,2 mm, portanto quanto à abertura de fissuras o dimensionamento dessa viga está atendido sendo favorável à segurança.

Não é necessário verificar a abertura de fissuras também através da Equação 3.41, pois esta dá valores maiores, e deve-se tomar o menor valor entre as duas Equações (NBR 6118:2004).

Verifica-se finalmente que o fator determinante no dimensionamento à flexão de vigas de concreto com reforço de bambu é sua deformação vertical (HIDALGO, 2003 apud GLENN, 1955).

#### 4.6.1 - Determinação da carga de ruptura

A falha por ruptura (fratura) é uma separação (rompimento) completa do material. O limite de resistência estática de um material é índice de resistência à ruptura sob carregamento estático no qual a fluência não é levada em consideração (RILEY; LROY; MORRIS, 2005).

Define-se nesta pesquisa, como carga de ruptura em vigas de concreto com reforço de bambu, a carga correspondente a uma abertura de fissuras fixadas pelo nível de agressividade IV da Tabela 3.13 cujo valor  $w = 0,2$  mm. Tendo em vista que, sendo o bambu um material natural, é suscetível às intempéries. Assim neste trabalho se procura ser conservador.

Isto significa que quando a viga apresentar fissuras características ( $w_k$ ) com aberturas iguais ou superiores a este valor, considera-se que ela entrou em ruptura, e a carga correspondente à primeira abertura de fissuras com este valor é a carga de ruptura.

#### 4.7 – Análise comparativa entre vigas de concreto reforçadas com aço liso e com reforço de bambu

##### Vigas bi apoiadas

Tomando-se os resultados obtidos nas Tabelas 3.8 e 4.3, onde se tem os valores de  $M_d$  para as vigas de concreto reforçadas com aço liso CA-60, e os valores correspondentes a  $M_d$  para as mesmas vigas de concreto reforçadas com bambu, com  $\rho = 3\%$  respectivamente.

Verifica-se que a substituição do aço liso pelo bambu em vigas submetidas à flexão simples é perfeitamente viável, desde que as vigas reforçadas com aço liso estejam submetidas a um momento  $M_a = M_d/1,4$ .

Sendo  $M_d$  igual à  $M_{dmin}$ , ou no máximo a  $M_{dmin.efet.}$ , que é aquele momento a que a viga está submetida quando se coloca a armadura mínima efetiva, isto é, aproximando-se  $A_s$  para a área de aço correspondente a um número inteiro de barras.

Considerando-se  $b_w = 0,12$  m, valor tomado constante, tendo em vista ser comumente usado em construções rurais, ou pequenas construções, tem-se os resultados apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Determinação de  $M_a = M_d / 1,4$ , vigas com reforço de aço liso CA-60

$\ell$ (m)	altura h(m)	nº de barr. efet.	$A_s$ eft. cm <sup>2</sup>	$\rho$ %	$M_a = M_d / 1,4$ KN.m
1,0	0,10	1	0,196	0,22	0,430
1,1	0,11	1	0,196	0,18	0,500
1,2	0,12	2	0,393	0,33	1,090
1,3	0,13	2	0,393	0,27	1,250
1,4	0,14	2	0,393	0,25	1,400
<b>1,5</b>	<b>0,15</b>	<b>2</b>	<b>0,393</b>	<b>0,22</b>	<b>1,550</b>
1,6	0,16	2	0,393	0,20	1,700
1,7	0,17	2	0,393	0,19	1,850
1,8	0,18	2	0,393	0,17	2,000
1,9	0,19	2	0,393	0,16	2,150
2,0	0,20	2	0,393	0,15	2,290
2,1	0,21	3	0,589	0,20	3,600
2,2	0,22	3	0,589	0,19	3,820
2,3	0,23	3	0,589	0,18	4,040
2,4	0,24	3	0,589	0,18	4,260
2,5	0,25	3	0,589	0,16	4,490
2,6	0,26	3	0,589	0,15	4,710
2,7	0,27	4	0,785	0,19	6,490
2,8	0,28	4	0,785	0,19	6,790
2,9	0,29	4	0,785	0,18	7,080
3,0	0,30	4	0,785	0,17	7,370

Da mesma forma que no cálculo anterior, considera-se a largura da viga constante e igual a 0,12 m, e de acordo com a metodologia apresentada, de dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu, em função da flecha admissível, têm-se os resultados apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Determinação de  $M_b = M_d/1,9$  - *Bambusa vulgaris*,  $\rho = 3\%$ .

$\ell$ (m)	altura h(m)	$V_c$ $m^3$	nºde varetas	d(m)	$M_a \text{ máx.} = M_d/1,9$ KN.m
1,0	0,10	0,012	5	0,063	0,53
1,1	0,11	0,015	6	0,073	0,67
1,2	0,12	0,017	6	0,083	0,83
1,3	0,13	0,020	7	0,093	1,01
1,4	0,14	0,024	8	0,103	1,21
<b>1,5</b>	<b>0,15</b>	<b>0,027</b>	<b>9</b>	<b>0,113</b>	<b>1,42</b>
1,6	0,16	0,031	10	0,123	1,65
1,7	0,17	0,035	10	0,133	1,89
1,8	0,18	0,039	12	0,143	2,15
1,9	0,19	0,043	12	0,153	2,43
2,0	0,20	0,048	13	0,163	2,73
2,1	0,21	0,053	15	0,173	3,04
2,2	0,22	0,058	15	0,183	3,37
2,3	0,23	0,063	16	0,193	3,71
2,4	0,24	0,069	17	0,203	4,07
2,5	0,25	0,075	19	0,213	4,45
2,6	0,26	0,081	20	0,223	4,85
2,7	0,27	0,087	20	0,233	5,26
2,8	0,28	0,094	21	0,243	5,69
2,9	0,29	0,101	22	0,253	6,14
3,0	0,30	0,108	23	0,263	6,60

Comparando-se o comportamento das vigas, com reforço de aço liso CA-60 e com reforço de *Bambusa vulgaris*, com percentual de reforço  $\rho = 3\%$ , verifica-se uma compatibilidade entre essas duas situações, conforme representado na figura 4.8.

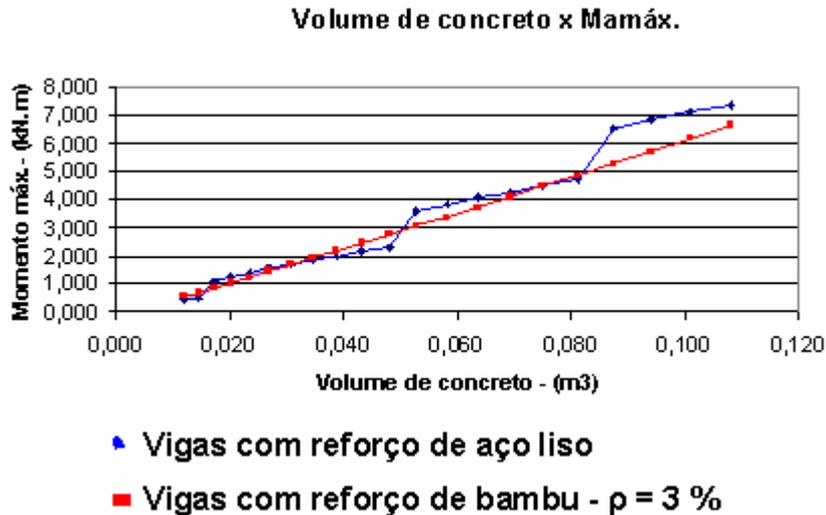


Figura 4.8 – Representação gráfica dos comportamentos das vigas de concreto com reforço de aço, com  $A_{s\text{mín-efetiva}}$ , e com reforço de bambu  $\rho = 3 \%$ .

Observa-se que o comportamento dos dois gráficos são bem próximos, mostrando que os momentos que as vigas suportam, para os dois tipos de reforço são semelhantes, havendo uma pequena diferença para seções maiores.

Verifica-se assim, que é possível a substituição do aço liso por taliscas de bambu como reforço do concreto em vigas bi-apoiadas, nos moldes apresentados por este trabalho, para serem usadas em construções rurais ou em pequenas construções, quando estas estiverem com área de aço mínima.

Desta forma fica claro que a substituição do reforço de aço pelo de bambu é adequado para vigas, com um percentual de reforço de bambu  $\rho = 3\%$ .

Assim, quando uma viga for dimensionada para uma área de aço mínima efetiva, e para concreto com um  $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$ , conforme mostram as Tabelas 3.10 e 4.11, e ilustrada pela Figura 4.8, pode-se substituir o aço, por um percentual de reforço de bambu de 3% da área da seção transversal da viga.

## CAPÍTULO 5

---

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a avaliação da formulação apresentada de dimensionamento de vigas de concreto reforçadas com bambu, e do cálculo de flechas e abertura de fissuras, descreve-se o comportamento teórico de três vigas de concreto com reforço de bambu com os percentuais de 1%, 2% e 3%, e comparam-se essas características de resistência e deformação com os resultados dos ensaios de laboratório.

A viga 3 tem mesmas características geométricas da viga 4, esta foi dimensionada também para um concreto com  $f_{ck} = 20$  MPa, mas com armadura de aço CA-60, que é o tipo de aço usado comumente.

Considera-se nesta parte do trabalho a viga padrão para aplicação teórica e ensaios de verificação experimental o modelo com seção transversal de 0,12 m x 0,15 m e comprimento de 1,20 m.

Os cálculos das flechas são obtidos a partir das equações 3.28 a 3.35, (ver exemplo teórico 1). O valor de  $M_d$  é dado pela Equação 4.12 e 4.13, para vigas com reforço de bambu e 3.10 com reforço de aço, os valores de  $P$  são calculados usando-se as equações 5.1, 5.2, e 5.3.

$$M = \frac{M_d}{1,9} \quad (5.1)$$

$$M = \frac{M_d}{1,4} \quad (5.2)$$

$$P = \frac{2.M}{x} \quad (5.3)$$

## 5.1 – Verificação experimental

### 5.1.1 – Procedimentos

#### 5.1.1.1 - Elaboração dos concretos usados

As determinações dos traços do concreto usados nas vigas foram feitos de acordo com RODRIGUES (1998).

Tabela 5.1 – Composição dos concretos usados nos ensaios

Viga	$f_{ck28}$ (MPa)	a/c (l/kg)	$D_{m\acute{a}x}$ (mm)	MF	$A_{btc}$ (mm)	Traço
1	8	0,80	9,50	2,80	60	1:3,7:3
2	14	0,61	9,50	2,80	60	1:2,62:2,27
3, 3.1 e 4	20	0,60	9,50	2,80	60	1:2,55:2,23

#### 5.1.2 - Preparação do ensaio

##### 1 - Instrumentação da viga 3

A viga foi instrumentada com dois strain gage, colocados na parte inferior no meio da viga.

Foi colocado também, um extensômetro com strain gage, com capacidade de 10 mm, equipamento usado para medir deformação vertical, ambos ligados ao computador para aquisição de dados.

A máquina usada para realização dos ensaios (Figura 5.1), tem capacidade para 50 t<sub>f</sub>.



Figura 5.1 - Viga instrumentada para o ensaio à flexão pura.

### 5.1.3 - Ensaio da viga 3

Observou-se com o aumento de carga a partir da carga de fissuração, o aparecimento da 1ª fissura para uma carga de 3,50 kN

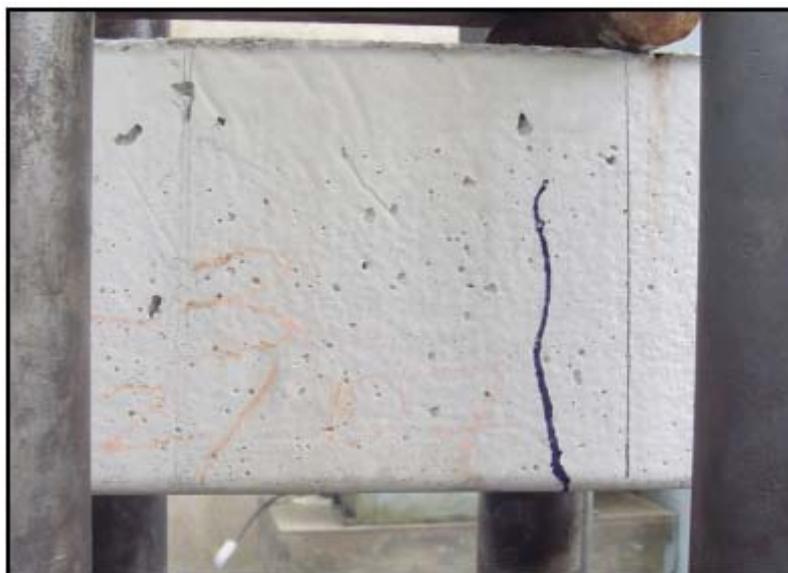


Figura 5.2 - Abertura da 1ª fissura com abertura inferior a 0,2 mm



Figura 5.3 - Abertura da 2ª fissura - abertura aproximada de 0,4 mm. Carga de ruptura



Figura 5.4 - Destruição completa da viga para verificação da posição do reforço

## 5.2 - Resultados

### 5.2.1 – Resultado teórico para a viga 3 – $\rho = 3\%$

Para determinação dos parâmetros de resistência da viga, inicialmente foram rompidos dois corpos de prova moldados com o mesmo concreto. Os resultados obtidos para o teste de compressão aos 28 dias foram de 28,00 MPa e 29,40 MPa, resultando um valor médio de 28,70 MPa, valor usado na determinação dos resultados teórico e experimental da viga. Inicialmente verificaram-se os parâmetros de resistência teórica a partir do modelo apresentado, e em seguida, comparado com os valores verificados experimentalmente.

Observa-se que houve deslocamento na posição da armação de bambu, quando o concreto da viga foi vibrado na mesa vibratória, como também se verificou que houve um afrouxamento das taliscas dentro do concreto, caracterizando perda de aderência.

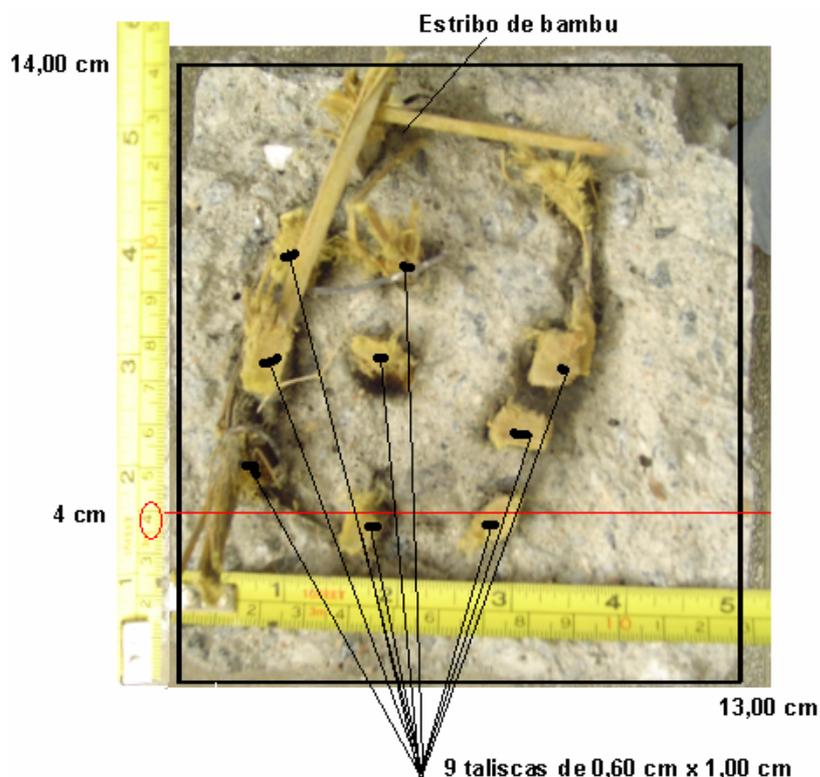


Figura 5.5 - Seção transversal da viga 3, após ruína para verificação da posição da armação de bambu

1 - Determinação experimental dos parâmetros para verificação da resistência da viga - 3.

De acordo com a Figura 5.7 tem-se:

$$d = 14 - (4,5 + 0,5 + 0,2) = 8,8\text{cm} \Rightarrow d = 0,088\text{m}$$

$$b_w = 0,128\text{ m}$$

$$h = 0,140\text{ m}$$

$$z_1 = \frac{2}{3} \cdot 0,088 = 0,059\text{m}$$

1.1 - Determinação do momento de serviço  $M$ , e carga correspondente  $P$ .

Aplicando a Equação 4.14, calculam-se os valores de resistência da viga apresentados na Tabela 5.2.

$$M_d = 1324 \cdot b_w \cdot h \cdot d$$

Tabela 5.2 – Cálculo do momento e da carga de serviço da viga 3

$b_w$ (m)	$d$ (m)	altura $h$ (m)	$\ell$ (m)	$M_d$ kN.m	$M = M_d/1,9$ kN.m	$P$ kN
0,128	0,088	0,140	1,200	2,09	1,10	5,50

2 – Cálculo da deformação vertical da viga - (a mm)

De acordo com os dados geométricos verificados na Figura 5.7, calculam-se os valores apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Parâmetros 1 - para o cálculo da flecha da viga 3

$b_w$ (m)	altura $h$ (m)	$\ell$ m	$x$ m	$y_t$ m	$X$ (m)	$d$ (m)
0,128	0,140	1,200	0,400	0,070	0,0150	0,0880

Com os valores calculados na Tabela 5.3, calculam-se os parâmetros para o cálculo das flechas no estágio II, apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Parâmetros 2 para o cálculo da flecha da viga 3

$I_c$ m <sup>4</sup>	* $f_{ck}$ MPa	$E_{cs}$ MPa	$E_b$ MPa	$f_{ct}$ . Inf. MPa	$\alpha_e$	$\alpha$	$I_{II}$ m <sup>4</sup>
0,0000293	28,70	25500,45	9380,0	1,969	0,368	1,5	1,198E-06

\* Valor obtido fazendo-se a média aritmética dos ensaios à compressão de dois corpos de provas cilíndricos de 10 cm de diâmetro e altura de 20 cm, com concreto dimensionado para  $f_{ck} = 20$  MPa.

Com os parâmetros já determinados, e com o momento de fissuração  $M_{r1} = 0,882$  kN.m, e  $E_{cs} \cdot I_c = 0,746$  MN.m<sup>2</sup>, determina-se as flechas em função das cargas, para a viga em estudo, observando-se que o valor da flecha admissível é  $a = 3,43$  mm.

Tabela 5.5 – Cálculo das flechas da viga 3, em função das cargas

Cargas P(KN)	$M_a$ KN.m	$(E.I)_{eq}$ MN.m <sup>2</sup>	$a$ mm
0,49	0,10	5,217E+02	5,76E-05
0,98	0,20	6,524E+01	9,21E-04
1,47	0,29	1,935E+01	4,66E-03
1,96	0,39	8,181E+00	1,47E-02
2,45	0,49	4,204E+00	3,57E-02
2,94	0,59	2,446E+00	7,37E-02
3,43	0,69	1,551E+00	1,36E-01
3,92	0,78	1,049E+00	2,29E-01
4,41	0,88	7,461E-01	3,63E-01
4,90	0,98	5,522E-01	5,44E-01
<b>5,50</b>	<b>1,10</b>	<b>3,994E-01</b>	<b>8,45E-01</b>
5,99	1,20	3,161E-01	1,16E+00
6,48	1,30	2,561E-01	1,55E+00
6,97	1,39	2,118E-01	2,02E+00
7,46	1,49	1,784E-01	2,57E+00
7,95	1,59	1,527E-01	3,19E+00
8,44	1,69	1,326E-01	3,90E+00
8,93	1,79	1,167E-01	4,69E+00

Observa-se que a flecha que esta viga sofre com a carga para a qual foi dimensionada, de acordo com o critério apresentado, é de 0,85 mm, menor que o limite admissível que é de 3,43 mm. Isto significa que para a carga de serviço a viga se comporta de forma adequada.

#### 1 - Verificação de abertura de fissuras

Considera-se neste trabalho, o valor máximo de abertura de fissuras o correspondente ao limite permitido para um meio de agressividade IV,  $w_k = 0,2$  mm.

A carga de ruptura é considerada a carga que proporciona a primeira fissura de abertura igual ao limite estabelecido. Para esta viga, onde se tem um valor de  $f_{ctk,m} = 2,81$  MPa, obtém-se os valores da Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Cálculo da abertura de fissuras em função das cargas e as tensões médias correspondentes no concreto e no reforço de bambu

<b>Cargas P(KN)</b>	<b>M<sub>a</sub> KN.m</b>	<b>σ<sub>c</sub> MPa</b>	<b>σ<sub>b</sub>(média) MPa</b>	<b>w mm</b>
0,49	0,10	1,23	2,19	0,00
0,98	0,20	2,46	4,39	0,00
1,47	0,29	3,68	6,58	0,00
1,96	0,39	4,91	8,78	0,01
2,45	0,49	6,14	10,97	0,01
2,94	0,59	7,37	13,17	0,01
3,43	0,69	8,60	15,36	0,02
3,92	0,78	9,83	17,57	0,02
4,41	0,88	11,06	19,77	0,03
4,90	0,98	12,29	21,96	0,03
<b>5,50</b>	<b>1,10</b>	<b>13,79</b>	<b>24,65</b>	<b>0,04</b>
5,99	1,20	15,02	26,85	0,05
6,48	1,30	16,25	29,05	0,05
6,97	1,39	17,48	31,24	0,06
7,46	1,49	18,71	33,44	0,07
7,95	1,59	19,93	35,64	0,08
8,44	1,69	21,16	37,83	0,09
8,93	1,79	22,39	40,03	0,10

Observa-se que a abertura de fissuras para a carga de serviço é de 0,06 mm, menor que o limite previsto que é de 0,20 mm. Logo, quanto à abertura de fissuras para a situação de serviço a viga corresponde adequadamente, do ponto de vista teórico.

## 2 - Cálculo da carga de ruptura teórica

De acordo com a teoria apresentada a Tabela 5.7 apresenta o cálculo da carga de ruptura teórica.

Tabela 5.7 - Determinação da carga de ruptura teórica

<b>Cargas</b> <b>P<sub>rt</sub>(KN)</b>	<b>M<sub>a</sub></b> <b>KN.m</b>	<b>a</b> <b>mm</b>	<b>σ<sub>c</sub></b> <b>MPa</b>	<b>σ<sub>b</sub>(média)</b> <b>MPa</b>	<b>w</b> <b>mm</b>
<b>12,50</b>	2,50	1,24E+01	31,34	56,03	0,20

Para o modelo teórico apresentado o valor da carga de ruptura é P<sub>rt</sub> = 12,50 kN.

### 5.2.2 – Resultado experimental obtido para a viga 3 – ρ = 3%

A cura das vigas 3, 2 e 1 foi feita em um ambiente desfavorável, ou seja, em meio úmido. Os dados coletados e processados têm os resultados apresentados na Tabela 5.8, sabendo-se que o valor médio de f<sub>ck</sub> verificado nos ensaios foi de 28,70 MPa.

Tabela 5.8 - Resultado experimental obtido no ensaio da viga 3

<b>Carga</b> <b>P(kN)</b>	<b>M</b> <b>(kN.m)</b>	<b>ε</b> <b>μm/m</b>	<b>a</b> <b>μm</b>	<b>a</b> <b>mm</b>
0,49	0,10	0	0	0,00
0,98	0,20	0	0	0,00
1,47	0,29	12	0	0,00
1,96	0,39	41	10	0,01
2,45	0,49	70	16	0,02
2,94	0,59	99	82	0,08
3,33	0,67	122	140	0,14
3,50	0,70	132	157	0,16
3,67	0,73	142	180	0,18
3,83	0,77	147	200	0,20
4,02	0,80	163	227	0,23
4,22	0,84	175	254	0,25
4,41	0,88	194	260	0,26
4,63	0,93	199	308	0,31
4,86	0,97	212	339	0,34
5,10	1,02	222	380	0,38
<b>5,50</b>	<b>1,10</b>	<b>250</b>	<b>425</b>	<b>0,42</b>

### 5.2.3 - Análise dos resultados teórico e experimental - viga 3

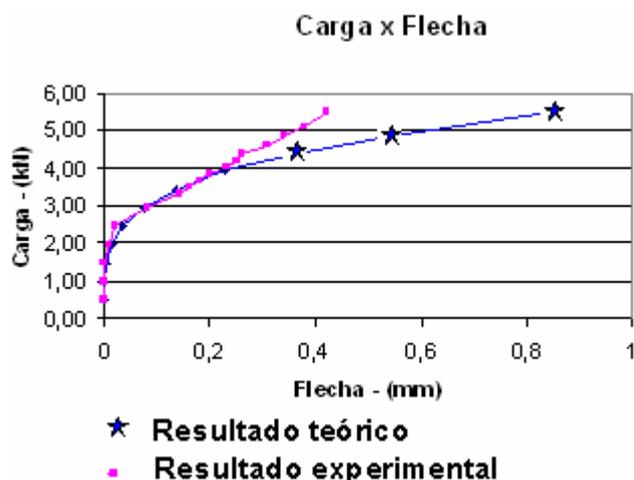


Figura 5.6 - Gráfico que representa as deformações verticais correspondentes aos resultados experimental e teórico em função das cargas.

Observa-se que no que diz respeito à resistência de serviço desta viga, o seu comportamento é adequado e compatível com o modelo. Verifica-se também que para cargas de serviço as deformações verticais sofridas experimentalmente são menores que as previstas pelo modelo teórico (Figura 5.6), e dentro do limite admissível.

No entanto, quanto à carga de ruptura, que é a carga que provoca uma fissura de 0,20 mm no concreto, houve uma diferença entre o valor teórico e o valor experimental, sendo este valor menor que o valor previsto teoricamente.

### 5.2.4 – Resultados teóricos para a viga 2 – $\rho = 2\%$

Da mesma forma que foi feito para o estudo da viga 3, após o ensaio foi verificado a posição do reforço de bambu, para obtenção da posição do reforço, e assim, se ter os valores reais dos parâmetros que serão usados no cálculo de resistência da viga.

Assim como na viga anterior, observou-se afrouxamento do reforço em relação ao concreto, caracterizando perda de aderência entre os materiais.

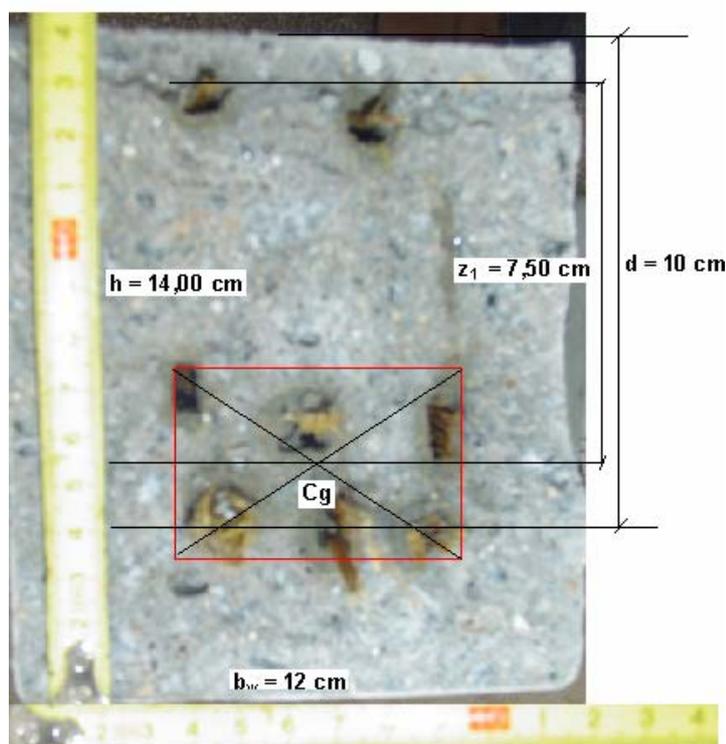


Figura 5.7 - Seção transversal da viga 2, após ruína, para verificação da posição da armação de bambu

#### 1 – Determinação do momento de serviço $M$ , e da carga de serviço $P$

Aplicando a Equação 4.13, calculam-se os parâmetros de resistência da viga, apresentados na Tabela 5.9.

$$M_d = 993 \cdot b_w \cdot d \cdot h$$

Tabela 5.9 – Cálculo do momento e da carga de serviço da viga 2

$b_w$ (m)	$d$ (m)	altura $h$ (m)	$\ell$ (m)	$M_d$ kN.m	$M=M_d/1,9$ kN.m	$P$ kN
0,12	0,100	0,14	1,20	1,67	0,88	4,40

#### 2 – Cálculo da deformação vertical da viga 2

Com os parâmetros geométricos reais da viga apresentados na Figura 5.10, e o valor do  $f_{ck}$  do concreto verificado no ensaio de compressão, calculam-se os valores das Tabelas 5.10 e 5.11.

Tabela 5.10 – Parâmetros 1, para o cálculo da flecha da viga 2

$b_w$ (m)	altura h(m)	$\ell$ m	x m	$y_t$ m	$A_b$ $m^2$	X (m)	d (m)	$I_c$ $m^4$
0,128	0,14	1,20	0,40	0,070	0,000358	0,0134	0,0880	0,0000293

Observa-se que o valor de  $f_{ck}$  do concreto para essa viga, verificado no ensaio de compressão para 28 dias foi de 20,75 MPa. Obtido fazendo-se a média de dois corpos-de-prova.

Tabela 5.11 – Parâmetros 2, para o cálculo da flecha

$f_{ck}$ MPa	$E_{cs}$ MPa	$E_b$ MPa	$f_{ct.m.}$ MPa	$\alpha_e$	$\alpha$	$I_{II}$ $m^4$
20,75	21682,8319	9380,0	2,265	0,433	1,5	9,6550E-07

Tendo em vista que o momento de fissuração para esta viga é  $M_{r1} = 0,710 \text{ kN.m}$ , e  $E_{cs} \cdot I_c = 0,635 \text{ MN.m}^2$ , calculam-se os valores das flecha em função das cargas, dados apresentados na Tabela 5.12, sendo a flecha máxima admissível  $a = 3,43 \text{ mm}$ .

Tabela 5.12 – Cálculo da flecha da viga 2 em função da carga

Cargas P(KN)	$M_a$ KN.m	$(E \cdot I)_{eq,2}$ MN.m <sup>2</sup>	a mm
0,49	0,10	2,338E+02	1,29E-04
0,98	0,20	2,924E+01	2,06E-03
1,47	0,29	8,680E+00	1,04E-02
1,96	0,39	3,674E+00	3,27E-02
2,45	0,49	1,891E+00	7,95E-02
2,94	0,59	1,103E+00	1,63E-01
3,43	0,69	7,025E-01	2,99E-01
3,92	0,78	4,775E-01	5,03E-01
<b>4,41</b>	<b>0,88</b>	<b>3,416E-01</b>	<b>7,92E-01</b>
4,90	0,98	2,547E-01	1,18E+00
5,50	1,10	1,862E-01	1,81E+00
5,99	1,20	1,489E-01	2,47E+00
6,48	1,30	1,220E-01	3,26E+00
6,97	1,39	1,022E-01	4,18E+00
7,46	1,49	8,718E-02	5,25E+00

Observa-se que a flecha que esta viga deve sofrer para carga de serviço é de 0,79 mm, assim verifica-se que quanto à deformação a viga não apresenta problema tendo em vista que o limite estabelecido para a deformação vertical é de 3,43 mm.

## 2 - Verificação das aberturas de fissuras

Considera-se neste trabalho o valor máximo de abertura de fissuras, o correspondente ao limite permitido para um meio de agressividade IV,  $w_k = 0,2$  mm.

A carga de ruptura é considerada a carga que provoca a primeira fissura com esse valor.

O valor calculado para  $f_{ctk,m}$ , usado para determinação da carga de ruptura teórica, apresentado na Tabela 5.13, é  $f_{ctk,m} = 3,24$  MPa.

Tabela 5.13 - Cálculo das aberturas de fissura teóricas para a viga 2

<b>Cargas P(KN)</b>	<b><math>\sigma_c</math> MPa</b>	<b><math>\sigma_b</math>(média) MPa</b>	<b>w mm</b>
0,49	1,36	3,27	0,00
0,98	2,73	6,55	0,00
1,47	4,09	9,82	0,01
1,96	5,46	13,10	0,01
2,45	6,82	16,37	0,02
2,94	8,18	19,64	0,03
3,43	9,55	22,92	0,04
3,92	10,91	26,19	0,06
4,41	12,28	29,47	0,07
4,90	13,64	32,74	0,09
5,50	15,31	36,75	0,11
5,99	16,68	40,02	0,13
6,48	18,04	43,30	0,15
6,97	19,40	46,57	0,17
<b>7,46</b>	<b>20,77</b>	<b>49,84</b>	<b>0,20</b>

De acordo com a verificação de fissuras para o ambiente de agressividade IV, considerado neste trabalho, observa-se que a abertura de fissuras da viga para a carga de serviço está dentro do limite imposto de  $w_k = 0,2$  mm.

Considerando o critério já apresentado para a determinação da carga de ruptura, observa-se que esta é de 7,46 kN.

### 5.2.5 - Resultado experimental para a viga 2

Os dados coletados e processados têm os resultados apresentados na Tabela 5.14, sabendo-se que o valor médio de  $f_{ck}$  verificado nos ensaios é de 20,75 MPa, obtido fazendo-se a média entre os resultados de dois corpos-de-prova.

No ensaio a viga tem um vão de 1,20 m, e assim a distância entre as cargas e os apoios é  $x = 0,40$  m.

Tabela 5.14 - Resultados experimentais de deformação específica e flecha observados no ensaio para a viga 2

<b>Carga P(KN)</b>	<b><math>M_a</math> (KN.m)</b>	<b><math>\epsilon</math>(médio) <math>\mu\text{m/m}</math></b>	<b>a <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>a mm</b>
0,49	0,10	12,5	1,0	0,00
0,98	0,20	23,5	1,2	0,00
1,47	0,29	30,0	20,0	0,02
1,96	0,39	39,5	60,0	0,06
2,45	0,49	47,5	100,0	0,10
2,94	0,59	57,0	150,0	0,15
3,43	0,69	68,5	200,0	0,20
3,92	0,78	77,0	250,0	0,25
4,41	0,88	87,0	310,0	0,31
<b>4,90</b>	<b>0,98</b>	<b>88,5</b>	<b>400,0</b>	<b>0,40</b>

Observa-se que a carga de ruptura verificada experimentalmente é  $P_{re} = 4,90$  kN.

### 5.2.6 - Análise entre os resultados teórico e experimental.

Observando-se os resultados teórico e experimental desta viga verifica-se que as deformações são maiores usando-se o modelo teórico (Figura 5.11). As aberturas de fissuras ocorrem para uma carga menor que a prevista para o modelo teórico. Enquanto para o modelo a carga de ruptura é  $P = 7,46$  kN, no ensaio o valor da carga de ruptura é  $P_{re} = 4,90$  kN.

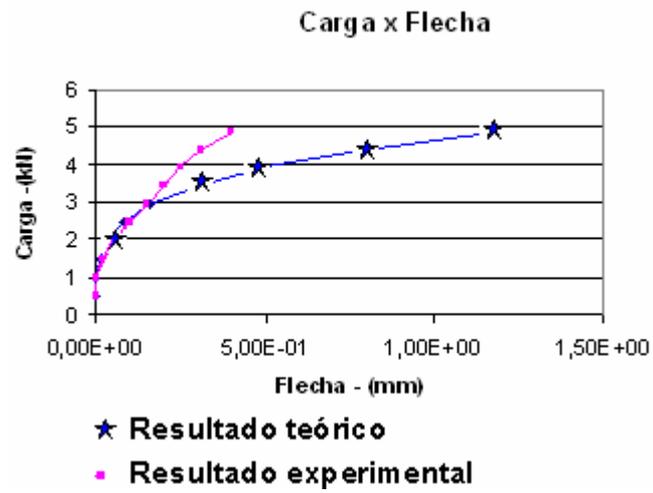


Figura 5.8 - Gráfico das deformações verticais dos resultados experimental e teórico em função das cargas.

### 5.2.7 – Resultado teórico para a viga 1 – $\rho = 1\%$

Da mesma forma que foi feito para os estudos anteriores, após o ensaio foi verificada a posição do reforço de bambu, para se ter convicção do posicionamento da armação do reforço, e assim, têm-se os valores reais das medidas que serão usadas no cálculo dos parâmetros de resistência da viga.

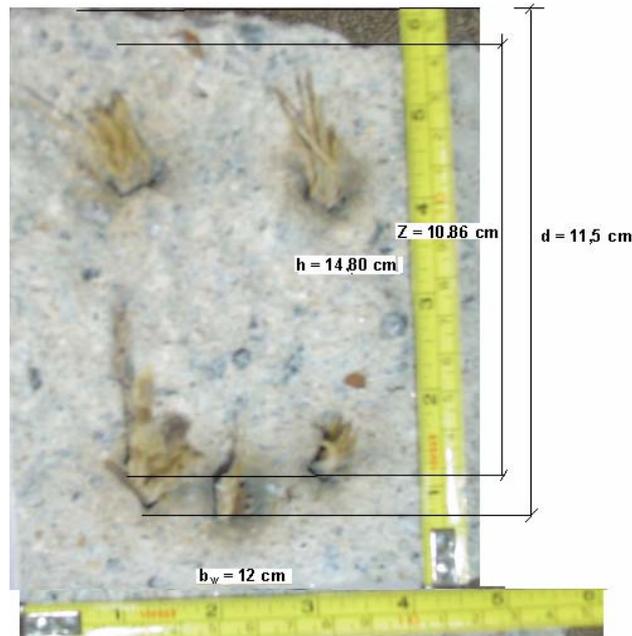


Figura 5.9 - Seção transversal da viga 1, após destruição completa para verificação da posição da armação de bambu.

1 – Dimensionamento em função da Equação 4.12

$$M_d = 574 \cdot b_w \cdot d \cdot h$$

De acordo com os valores observados na Figura 5.9, obtêm-se os valores apresentados na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Cálculo do momento e da carga de serviço da viga 1

$b_w$ (m)	d (m)	altura h(m)	$\ell$ (m)	$M_d$ kN.m	$M_a=M_d/1,9$ kN.m	P kN
0,12	0,115	0,148	1,20	1,17	0,62	3,10

Este resultado mostra que de acordo com o arranjo da Figura 5.1, a viga 1 deve trabalhar com uma carga máxima de 3,10 kN.

## 2 - Verificação da deformação vertical

Dados os parâmetros geométricos já apresentados, calculam-se os parâmetros apresentados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Parâmetros 1 para o cálculo da flecha da viga 1

$b_w$ (m)	altura h(m)	$\ell$ m	x m	$y_t$ m	$A_b$ $m^2$	X (m)	d (m)	$I_c$ $m^4$
0,120	0,148	1,20	0,40	0,074	0,000178	0,0107	0,0960	0,0000324

Com os parâmetros apresentados na Tabela 5.16, e o  $f_{ck} = 19,25$  MPa, calculado fazendo-se a média entre dois corpos-de-prova, tem-se os dados da tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Parâmetros 2 para o cálculo da flecha da viga 1

$f_{ck}$ MPa	$E_{cs}$ MPa	$E_b$ MPa	$f_{ct.m.}$ MPa	$\alpha_e$	$\alpha$	$I_{II}$ $m^4$
19,25	20884,4152	9380,0	2,155	0,449	1,5	6,2939E-07

O momento de fissuração dessa viga apresentou valor  $M_{r1} = 0,708$  kN.m, e  $E_{cs} \cdot I_c = 0,677$  MN.m<sup>2</sup>, assim o cálculo das flechas em função das cargas apresenta-se na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Cálculo da flecha da viga 1, em função da carga

<b>Cargas P(KN)</b>	<b>M<sub>a</sub> KN.m</b>	<b>(E.I)<sub>eq.</sub> MN.m<sup>2</sup></b>	<b>a mm</b>
0,49	0,10	2,503E+02	1,20E-04
0,98	0,20	3,130E+01	1,92E-03
1,47	0,29	9,284E+00	9,71E-03
1,96	0,39	3,924E+00	3,06E-02
2,45	0,49	2,016E+00	7,45E-02
2,94	0,59	1,172E+00	1,54E-01
<b>3,10</b>	<b>0,62</b>	<b>1,002E+00</b>	<b>1,90E-01</b>
3,59	0,72	6,496E-01	3,39E-01
4,00	0,80	4,733E-01	5,18E-01
4,49	0,90	3,385E-01	8,14E-01
5,50	1,10	1,901E-01	1,77E+00

Observa-se que a flecha verificada para a carga determinada no item um é de 0,19 mm, menor que o valor máximo admissível, que é de 3,43 mm.

### 3 - Verificação das aberturas de fissuras e da carga de ruptura

O valor calculado para  $f_{ctk,m}$ , usado para determinação da carga de ruptura teórica, apresentado na Tabela 5.19, é  $f_{ctk,m} = 3,08 \text{ MPa}$ .

Tabela 5.19 – Cálculo da abertura de fissuras da viga 1

<b>Cargas P(KN)</b>	<b>M<sub>a</sub> KN.m</b>	<b><math>\sigma_c</math> MPa</b>	<b><math>\sigma_b</math>(média) MPa</b>	<b>w mm</b>
0,49	0,10	1,66	5,97	0,00
0,98	0,20	3,32	11,94	0,01
1,47	0,29	4,98	17,91	0,03
2,94	0,59	9,95	35,81	0,11
3,10	0,62	10,49	37,76	0,12
3,59	0,72	12,15	43,73	0,16
<b>4,00</b>	<b>0,80</b>	<b>13,54</b>	<b>48,72</b>	<b>0,20</b>
4,49	0,90	15,20	54,69	0,25
5,50	1,10	18,62	67,00	0,38

A verificação teórica de aberturas de fissuras para o ambiente de agressividade IV, considerado neste trabalho, sendo o limite imposto de  $w_k = 0,2 \text{ mm}$  a carga de ruptura teórica para esta viga é  $P_{rt} = 4,00 \text{ kN}$ .

### 5.2.8 – Resultado experimental para a viga 1

De acordo com os dados apresentados na Tabela 5.20, esta viga apresentou uma carga de ruptura experimental de  $P_{re} = 4,41$  kN, próximo do valor teórico.

Tabela 5.20 - Resultados obtidos do ensaio apresentado para viga 1

Carga P(kN)	$M_a$ (kN.m)	$\epsilon$ (médio) $\mu\text{m}/\text{m}$	a ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	a mm
0,49	0,10	6,5	5,0	0,05
0,98	0,20	14,0	10,0	0,10
1,47	0,29	20,0	14,0	0,14
1,96	0,39	27,5	20,0	0,20
2,45	0,49	33,5	26,0	0,26
2,94	0,59	43,5	32,0	0,32
3,43	0,69	51,0	39,0	0,39
3,92	0,78	58,0	44,0	0,44
<b>4,41</b>	<b>0,88</b>	<b>72,5</b>	<b>52,0</b>	<b>0,52</b>
4,90	0,98	56,0	78,0	0,78
5,39	1,08	71,5	61,0	0,61

### 5.2.9 - Análise entre os resultados teórico e experimental.

Observando-se os resultados teórico e experimental desta viga quanto à deformação vertical, verifica-se uma deformação maior usando-se o modelo teórico.

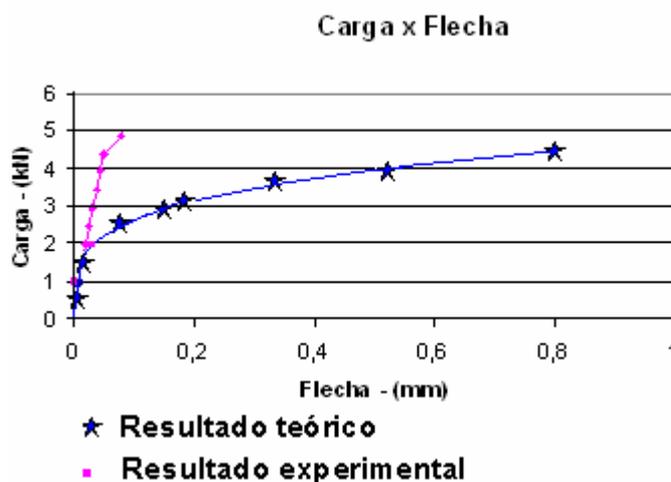


Figura 5.10 - Gráfico carga x flecha dos resultados experimental e teórico, viga 1

### 5.2.10 – Resultado teórico para a viga 3.1– $\rho = 3\%$

Diante dos resultados apresentados, se observou a necessidade de se fazer um outro ensaio com a viga de concreto com reforço de 3% de bambu, com a cura feita a seco, a fim de se verificar a compatibilidade dos resultados.

Foram colocados dois strain gage na parte inferior do reforço de bambu.

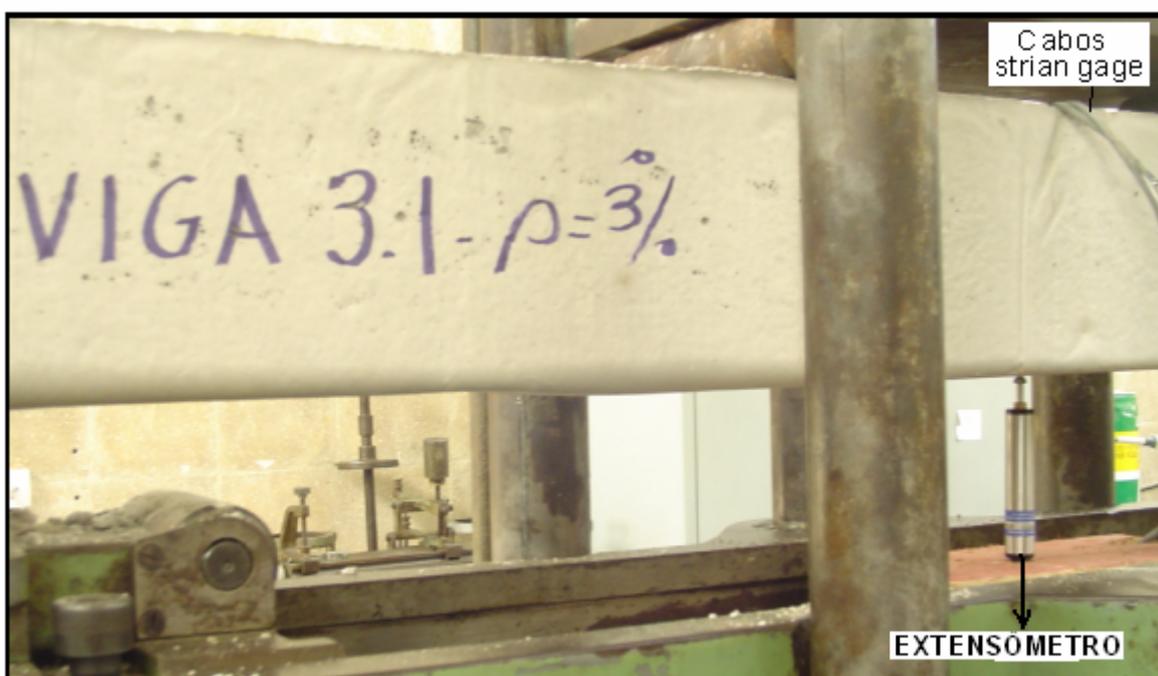


Figura 5.11 – Ensaio da Viga 3.1.

Os resultados obtidos para o teste de compressão aos 28 dias, para os dois corpos de prova, foi de 27,67 MPa, valor usado na determinação dos resultados teórico e experimental da viga.

Inicialmente verificam-se os parâmetros de resistência teórica a partir do modelo apresentado e em seguida será comparado com os valores verificados experimentalmente.

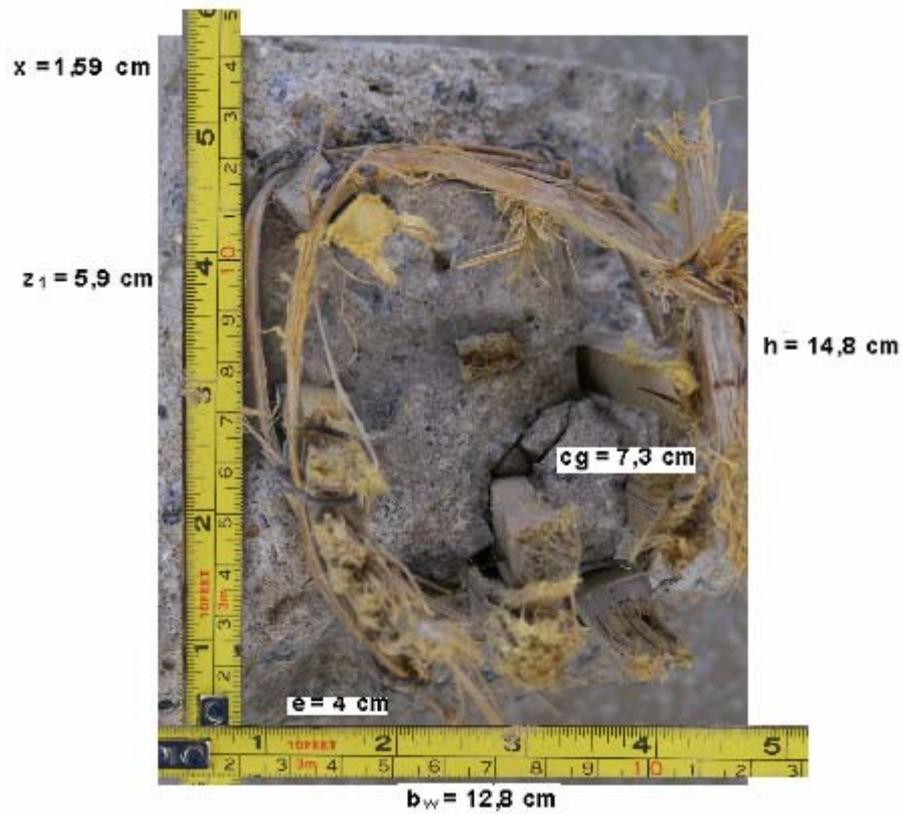


Figura 5.12 - Corte transversal da viga 3.1

De acordo com a Figura 5.12, tem-se:

$$d = 14,8 - (4 + 0,5 + 0,2) = 10,1\text{cm} \Rightarrow d = 0,101\text{m}$$

$$b_w = 0,128\text{ m}$$

$$h = 0,148\text{ m}$$

$$z_1 = \frac{2}{3} \cdot 0,101 = 0,067\text{m}$$

1- Determinação do momento de serviço  $M$ , e carga correspondente  $P$

Aplicando a Equação 4.13

$$M_d \text{ máx.} = 1324 \cdot b_w \cdot h \cdot d$$

Tabela 5.21 – Cálculo do momento e da carga de serviço da viga 3.1

$b_w$ (m)	d (m)	altura h(m)	$\ell$ (m)	$M_d$ kN.m	$M = M_d/1,9$ kN.m	P kN
0,128	0,101	0,148	1,200	2,53	1,33	6,67

2 – Cálculo da Deformação vertical da viga - (a mm).

De acordo com os valores observados na Figura 5.12, obtêm-se os valores apresentados na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 – Parâmetros para o cálculo da flecha da viga 3.1

$b_w$ (m)	altura h(m)	$\ell$ m	x m	$y_t$ m	X (m)	d (m)
0,128	0,148	1,20	0,40	0,074	0,0163	0,0960

Fazendo-se a média aritmética dos ensaios à compressão de dois corpos de provas cilíndricos de 10 cm de diâmetro e altura de 20 cm, com concreto dimensionado para  $f_{ck} = 20$  MPa, calculam-se os valores apresentados na Tabela 5.23.

Tabela 5.23 – Parâmetros para o cálculo da flecha da viga 3.1

$I_c$ $m^4$	$f_{ck}$ MPa	$E_{cs}$ MPa	$E_b$ MPa	$f_{ct.m.}$ MPa	$\alpha_e$	$\alpha$	$I_{II}$ $m^4$
0,0000346	27,67	25038,68	9380,0	2,744	0,375	1,5	1,5372E-06

O momento de fissuração dessa viga apresentou valor  $M_{r1} = 0,962$  kN.m, e  $E_{cs} \cdot I_c = 0,866$  MN.m<sup>2</sup>, assim o cálculo das flechas em função das cargas apresenta-se na Tabela 5.24.

Tabela 5.24 – Cálculo da flecha da viga 3.1 em função das cargas

<b>Cargas P(KN)</b>	<b>M<sub>a</sub> KN.m</b>	<b>(E.I)<sub>eq.</sub> MN.m<sup>2</sup></b>	<b>a mm</b>
0,49	0,10	7,822E+02	3,84E-05
0,98	0,20	9,781E+01	6,15E-04
1,47	0,29	2,901E+01	3,11E-03
1,96	0,39	1,226E+01	9,81E-03
2,45	0,49	6,296E+00	2,39E-02
2,94	0,59	3,660E+00	4,93E-02
3,43	0,69	2,319E+00	9,07E-02
3,92	0,78	1,566E+00	1,54E-01
4,41	0,88	1,111E+00	2,43E-01
4,90	0,98	8,207E-01	3,66E-01
5,50	1,10	5,916E-01	5,70E-01
5,99	1,20	4,667E-01	7,87E-01
6,48	1,30	3,767E-01	1,06E+00
<b>6,67</b>	<b>1,33</b>	<b>3,486E-01</b>	<b>1,17E+00</b>
7,16	1,43	2,892E-01	1,52E+00
7,65	1,53	2,440E-01	1,92E+00
8,14	1,63	2,091E-01	2,39E+00
8,63	1,73	1,817E-01	2,91E+00
9,12	1,82	1,598E-01	3,50E+00

Observa-se que a flecha que esta viga sofre com a carga para a qual foi dimensionada de acordo com o critério apresentado é de 1,17 mm, menor que o limite admissível que é de 3,43 mm. Isto significa que para a carga de serviço a viga se comporta de forma adequada.

### 3 - Verificações da abertura de fissuras.

Considera-se neste trabalho o valor máximo de abertura de fissuras, o correspondente ao limite permitido para um meio de agressividade IV,  $w_k = 0,2$  mm.

A carga de ruptura é considerada a carga que proporciona a primeira fissura de abertura igual ao limite estabelecido.

De acordo com os dados já apresentados, e para um valor de  $f_{ctk,m} = 3,92$  MPa, calcula-se a carga de ruptura experimental desta viga, conforme apresentam as Tabelas 5.25 e 5.26.

Tabela 5.25 – Cálculo da abertura de fissuras em função da carga e as tensões médias correspondentes no concreto e no reforço de bambu e da carga de ruptura

<b>Cargas P(KN)</b>	<b>M<sub>a</sub> KN.m</b>	<b>σ<sub>c</sub> MPa</b>	<b>σ<sub>b</sub>(média) MPa</b>	<b>w mm</b>
0,49	0,10	1,04	1,90	0,00
0,98	0,20	2,08	3,81	0,00
1,47	0,29	3,11	5,71	0,00
1,96	0,39	4,15	7,62	0,00
2,45	0,49	5,19	9,52	0,01
2,94	0,59	6,23	11,42	0,01
3,43	0,69	7,27	13,33	0,01
3,92	0,78	8,31	15,23	0,02
4,41	0,88	9,34	17,13	0,02
4,90	0,98	10,38	19,04	0,02
5,50	1,10	11,65	21,37	0,03
5,99	1,20	12,69	23,27	0,04
6,48	1,30	13,73	25,18	0,04
6,67	1,33	14,13	25,92	0,04
7,16	1,43	15,17	27,82	0,05
7,65	1,53	16,21	29,72	0,06
8,14	1,63	17,25	31,63	0,07
8,63	1,73	18,28	33,53	0,07
9,12	1,82	19,32	35,44	0,08

Observa-se que a abertura de fissuras para a carga de serviço é de 0,04 mm, menor que o limite previsto que é de 0,20 mm. Logo, quanto à abertura de fissuras para a situação de serviço, a viga corresponde adequadamente, do ponto de vista teórico.

## 2 - Cálculo da carga de ruptura teórica

Tabela 5.26 - Determinação da carga de ruptura teórica

<b>Cargas P<sub>rt</sub>(KN)</b>	<b>M<sub>a</sub> KN.m</b>	<b>σ<sub>c</sub> MPa</b>	<b>σ<sub>b</sub>(média) MPa</b>	<b>w mm</b>
<b>14,00</b>	2,80	29,66	54,40	0,20

De acordo com o modelo teórico apresentado o valor da carga de ruptura é  $P_r = 14,00$  kN.

### 5.2.11 – Resultado experimental para a viga 3.1

Realizando-se o ensaio de Stuttgart para esta viga, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.27.

Tabela 5.27 - Ensaio de Stuttgart da viga 3.1

Carga	$M_a$		$\sigma_{mb}$	
	kN	kN.m	$\epsilon_{cg}$ ( $\mu\text{m}$ )	a(mm)
0,49	0,1	38,43	3,24	0,005
0,98	0,2	49,9	4,21	0,04
1,47	0,29	60,01	5,07	0,084
1,96	0,39	71,47	6,03	0,089
2,45	0,49	74,17	6,26	0,094
2,94	0,59	74,84	6,32	0,099
3,43	0,69	74,17	6,26	0,105
3,92	0,78	74,17	6,26	0,112
4,41	0,88	74,17	6,26	0,118
4,9	0,98	72,82	6,15	0,125
5,39	1,08	72,15	6,09	0,131
5,88	1,18	70,12	5,92	0,139
6,37	1,27	67,43	5,69	0,147
6,86	1,37	79,56	6,72	0,156
<b>7,35</b>	<b>1,47</b>	<b>305,44</b>	<b>25,79</b>	<b>0,172</b>
7,84	1,57	606,84	51,23	0,377
8,33	1,67	1039,05	87,72	0,688

De acordo com os resultados do extensômetro, verifica-se que a aderência bambu-concreto não foi suficiente para o aproveitamento da capacidade de resistência do reforço. Isto fica caracterizado pelo baixo valor da carga de ruptura correspondente, que neste caso foi de 7,35 kN. Este resultado é menor que o valor da carga de ruptura teórica que é de 14,000 kN.

### 5.2.12 - Análise comparativa entre os resultados teórico e experimental para a viga 3.1

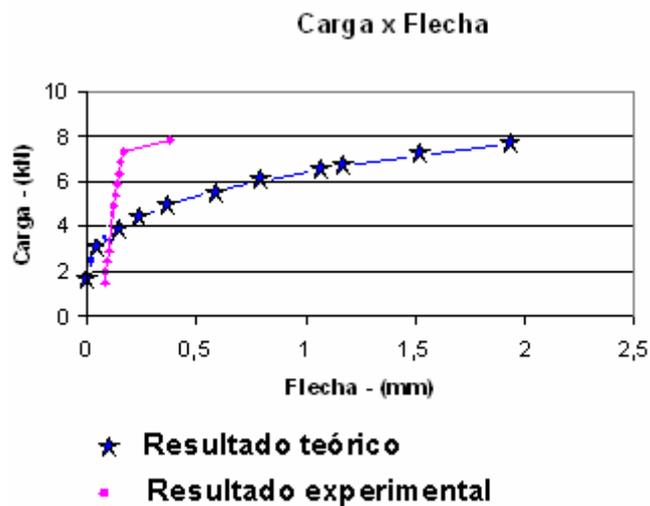


Figura 5.13 - Gráfico comparativo dos comportamentos da viga 3.1

Observa-se no Gráfico 5.13, que para o estado de serviço, a flecha real, da viga de concreto com reforço de bambu é menor que o previsto no modelo teórico.

Entretanto os valores tendem a se aproximar à medida que se aproxima da carga de ruptura.

No gráfico da Figura 5.14, o comportamento das tensões no reforço, teórica e experimental, tem comportamento linear, até próximo às cargas de ruptura.

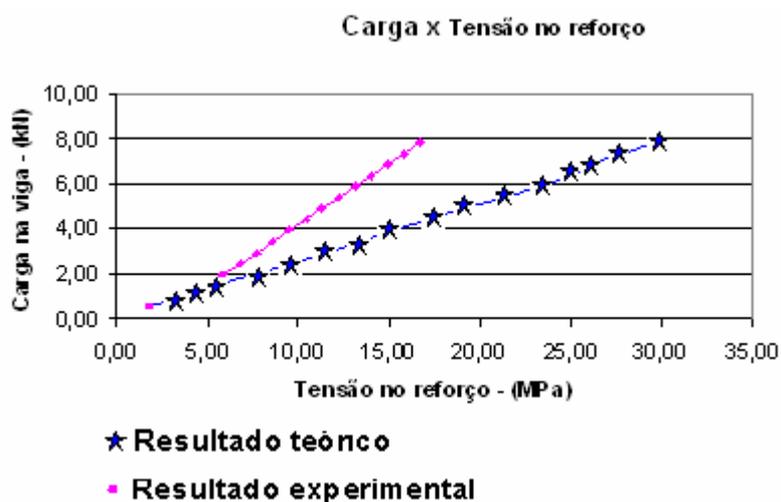


Figura 5.14 - Gráfico comparativo dos comportamentos teórico e experimental da viga 3.1

### 5.2.13 – Resultado teórico para a viga - 4

Os resultados obtidos para o teste de compressão aos 28 dias, para os dois corpos de prova, foi uma compressão média de 26,92 MPa, valor usado na determinação dos resultados teórico e experimental desta viga. Inicialmente verificam-se seus parâmetros a partir da seção transversal, obtida após o rompimento da mesma.

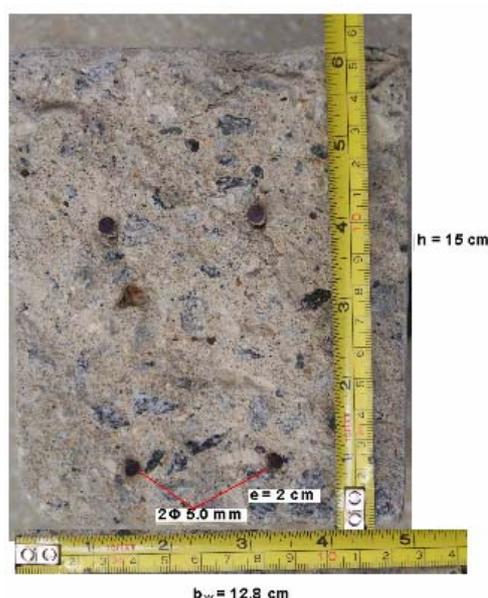


Figura 5.15 - Corte transversal da viga 4 após a ruptura

#### 1 – Cálculo do momento e da carga de serviço – P

De acordo com os resultados verificados na Figura 5.15, obtem-se os valores apresentados na Tabela 5.28.

Tabela 5.28 – Cálculo da carga e momento de serviço da viga 4

$b_w$ (m)	$\ell$ (m)	altura h(m)	nº de bar. Efet.	As eft. $cm^2$	$M_{d,min.e}$ kN.m	M N	P kN
0,128	1,20	0,150	2	0,393	2,42	1,73	8,65

#### 2– Cálculo da Deformação vertical - flecha (a mm)

Para o cálculo da deformação vertical desta viga, inicialmente determinam-se os parâmetros geométricos, apresentados na Tabela 5.29.

Tabela 5.29 – Parâmetros para o cálculo da flecha da viga 4

$b_w$ (m)	altura h(m)	$\ell$ m	X m	$y_t$ m	d (m)	$A_s$ m <sup>2</sup>	x (m)	$I_{II}$ (m <sup>4</sup> )
0,128	0,15	1,20	0,40	0,075	0,123	0,0000393	0,023	0,00000387

De acordo com os ensaios à compressão do concreto usado na viga, se calcula os valores apresentados na Tabela 5.30.

Tabela 5.30 – Parâmetros para o cálculo da flecha da viga 4

$I_c$ m <sup>4</sup>	$f_{ck}$ MPa	$E_{cs}$ MPa	$E_s$ MPa	$f_{ct. m.}$ MPa	$\alpha_e$	$\alpha$
0,000036	26,92	24697,02	210000,0	2,69	8,50	1,5

O momento de fissuração dessa viga apresentou valor  $M_{r1} = 0,970 \text{ kN.m}$ , e  $E_{cs} \cdot I_c = 0,889 \text{ MN.m}^2$ , assim o cálculo das flechas em função das cargas, apresenta-se na Tabela 5.31.

Tabela 5.31 – Cálculo da flecha da viga, em função da carga.

Carga P (KN)	$M_a$ KN.m	$(E \cdot I)_{eq.}$ MN.m <sup>2</sup>	a mm
0,49	0,098	7,70E+02	3,90E-05
0,98	0,196	9,63E+01	6,24E-04
1,47	0,294	2,86E+01	3,15E-03
1,96	0,392	1,21E+01	9,92E-03
2,45	0,490	6,25E+00	2,40E-02
2,94	0,588	3,66E+00	4,93E-02
3,43	0,686	2,34E+00	8,99E-02
3,92	0,784	1,60E+00	1,50E-01
4,41	0,882	1,15E+00	2,35E-01
4,90	0,980	8,65E-01	3,47E-01
5,39	1,078	6,74E-01	4,91E-01
5,88	1,176	5,41E-01	6,67E-01
6,37	1,274	4,46E-01	8,76E-01
6,86	1,372	3,76E-01	1,12E+00
7,35	1,470	3,24E-01	1,39E+00
7,84	1,568	2,84E-01	1,70E+00
8,33	1,666	2,52E-01	2,02E+00
<b>8,65</b>	<b>1,730</b>	<b>2,36E-01</b>	<b>2,25E+00</b>
11,10	2,220	1,62E-01	4,21E+00

Observa-se que a flecha que esta viga deve sofrer para carga mencionada é de 2,24 mm, menor que o limite estabelecido que é de 4,8 mm.

### 3 - Verificações da abertura de fissuras e da carga de ruptura

De acordo com a formulação usada para o concreto armado, para um valor de  $f_{ctk,m} = 3,85 \text{ MPa}$ , tem-se os valores apresentados na Tabela 5.42, considerando-se uma abertura de fissura máxima  $w_k = 0,2 \text{ mm}$ .

Tabela 5.32 – Cálculo das aberturas de fissuras e da carga da ruptura

<b>Carga P (KN)</b>	<b>M<sub>a</sub> KN.m</b>	<b>σ<sub>c</sub> MPa</b>	<b>σ<sub>s</sub> médio MPa</b>	<b>w mm</b>
0,49	0,098	0,58	21,58	0,00
0,98	0,196	1,16	43,15	0,00
1,47	0,294	1,74	64,73	0,01
1,96	0,392	2,32	86,31	0,01
2,45	0,490	2,89	107,88	0,02
2,94	0,588	3,47	129,46	0,02
3,43	0,686	4,05	151,04	0,03
3,92	0,784	4,63	172,61	0,04
4,41	0,882	5,21	194,19	0,06
4,90	0,980	5,79	215,77	0,07
5,39	1,078	6,37	237,34	0,08
5,88	1,176	6,95	258,92	0,10
6,37	1,274	7,53	280,50	0,12
6,86	1,372	8,10	302,07	0,14
7,35	1,470	8,68	323,65	0,16
7,84	1,568	9,26	345,23	0,18
<b>8,33</b>	<b>1,666</b>	<b>9,84</b>	<b>366,80</b>	<b>0,20</b>
8,65	1,730	10,22	380,89	0,22
9,14	1,828	10,80	402,47	0,24
9,63	1,926	11,38	424,05	0,27
10,12	2,024	11,96	445,62	0,29
10,61	2,122	12,54	467,20	0,32
11,10	2,220	13,11	488,78	0,35

Observa-se que considerando o mesmo critério estabelecido para a viga com reforço de bambu, isto é uma abertura de fissuras característica de 0,2 mm, a carga correspondente para esta viga é de aproximadamente de 8,33 kN, sendo esta considerada a carga de ruptura.

#### 5.2.14 – Resultado experimental para a viga 4

Realizado o ensaio de stuttgart para esta viga, obtiveram-se os resultados apresentado pela Tabela 5.33.

Tabela 5.33 - Ensaio de Stuttgart da viga 4

Carga	$M_a$	$\sigma_s$		
		$\epsilon(\mu\text{m})$	MPa	a(mm)
0,49	0,1	34	14,28	0,0010
0,98	0,2	39	16,38	0,0050
1,47	0,29	46	19,32	0,0100
1,96	0,39	52	21,84	0,0140
2,45	0,49	57	23,94	0,0180
2,94	0,59	62	26,04	0,0230
3,43	0,69	68	28,56	0,0280
3,92	0,78	73	30,66	0,0320
4,41	0,88	79	33,18	0,0350
4,9	0,98	88	36,96	0,0410
5,39	1,08	92	38,64	0,0440
5,88	1,18	101	42,42	0,0510
6,37	1,27	107	44,94	0,0560
6,86	1,37	113	47,46	0,0610
7,35	1,47	121	50,82	0,0660
7,84	1,57	130	54,6	0,0720
8,33	1,67	132	55,44	0,0740
8,82	1,76	139	58,38	0,0790
9,31	1,86	161	67,62	0,0910
<b>9,8</b>	<b>1,96</b>	<b>167</b>	<b>70,14</b>	<b>0,1020</b>
10,29	2,06	681	286,02	0,1710

Esta viga apresentou uma carga de ruptura experimental de 9,80 kN. Comparando com a carga de ruptura da viga 3.1, observa-se que a viga 4 apresentou uma resistência 34% maior que a viga 3.1. Entretanto para o estagio de serviço elas têm comportamentos semelhantes.

### 5.2.15 - Análise entre os resultados teórico e experimental

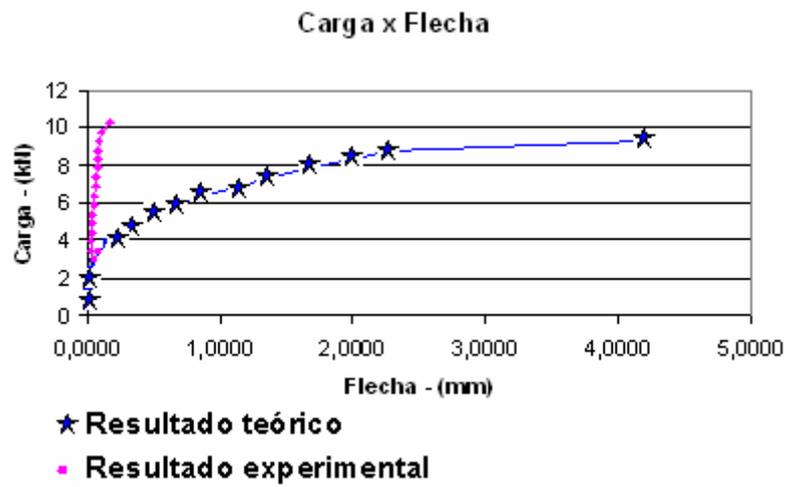


Figura 5.16 - Gráfico mostrando o desempenho teórico e experimental da viga com reforço de aço

### 5.2.16 - Comparação entre resultados experimentais das vigas 3.1 e 4

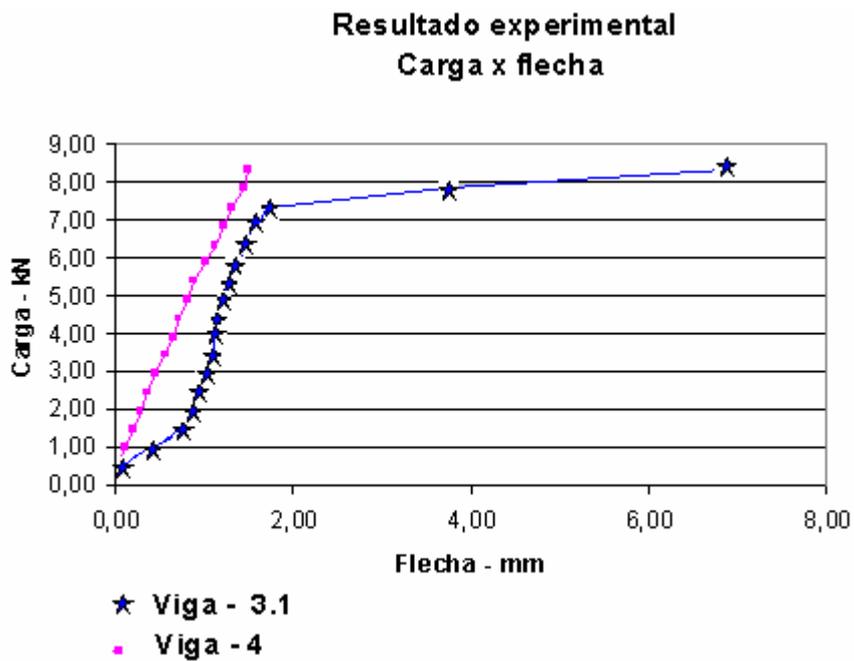


Figura 5.17 - Gráfico que mostra o desempenho das duas vigas

Verifica-se que a viga de concreto com reforço de bambu,  $\rho = 3\%$ , apresenta deformações verticais cerca de 74% maiores que a mesma viga com armadura mínima de aço, conforme apresentado na Tabela 5.34. Este resultado mostra que as vigas de concreto com reforço de bambu são mais flexíveis, o que já foi constatado por outras pesquisas. No estágio de serviço, a viga com reforço de bambu se comporta de forma compatível com o modelo apresentado, assim como a viga com reforço de aço.

Tabela 5.34 - Comparação das flechas experimentais, entre as vigas 3.1 e 4.

<b>Carga(kN)</b>	<b>aço</b>	<b>bambu</b>	<b>%</b>
	<b>a(mm)</b>	<b>a(mm)</b>	
0,49	0,001	0,005	80,00
0,98	0,005	0,04	87,50
1,47	0,01	0,084	88,10
1,96	0,014	0,089	84,27
2,45	0,018	0,094	80,85
2,94	0,023	0,099	76,77
3,43	0,028	0,105	73,33
3,92	0,032	0,112	71,43
4,41	0,035	0,118	70,34
4,9	0,041	0,125	67,20
5,39	0,044	0,131	66,41
5,88	0,051	0,139	63,31
6,37	0,056	0,147	61,90
6,86	0,061	0,156	60,90
7,35	0,066	0,172	61,63
7,84	0,072	0,377	80,90
8,33	0,074	0,688	89,24
		Média	74,36

Diante do que foi apresentado fica evidente que é adequado o uso do bambu, como substituto do aço, sempre que a viga estiver com área de aço mínima prevista pela NBR 6118:2004. Esta situação é comum em instalações rurais ou pequenas construções.

Considerando que as vigas 3.1 e 4, foram produzidas com concreto de mesma dosagem, e os reforços de aço e bambu foram colocados sem ganchos, se acredita que em ambos os casos as vigas entraram em colapso por deficiência de aderência.

## CAPÍTULO 6

---

### CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

De acordo com o estudo desenvolvido, chegam-se as seguintes conclusões:

- ▶ O modelo proposto para dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu, é compatível com os resultados experimentais encontrados, entretanto, é necessário melhorar a aderência bambu-concreto;
- ▶ A substituição do aço liso pelo *Bambusa vulgaris* em vigas de concreto armado é possível dentro de determinados limites. Verifica-se que sempre que uma viga está submetida à  $M_{dmin.}$ , isto é, tem uma área de aço mínima prevista pela NBR 6118:2004,  $A_s = 0,0015.b_w.h$ . Essa quantidade de aço pode ser substituída por um percentual de 3% taliscas de *Bambusa vulgaris*, dentro da metodologia apresentada neste trabalho;
- ▶ É viável o uso de *Bambusa vulgaris* como reforço do concreto, em vigas destinadas a construções rurais ou pequenas construções, visando à redução do consumo de aço;
- ▶ Deve-se ter um cuidado especial no uso de taliscas de *Bambusa vulgaris*, sem tratamento, para que as mesmas não sejam atacadas por insetos, notadamente o *Dinoderus minutus*, tendo em vista sua susceptibilidade ao seu ataque.
- ▶ Não se deve fazer a cura das vigas de concreto reforçadas com bambu em ambiente úmido. Isto acarreta perda de aderência bambu-concreto pelo fato do bambu ser um material higroscópico;
- ▶ Deve-se usar nas vigas de concreto com reforço de bambu, concretos com baixo fator  $a/c$ , ( $a/c < 0,50$ ), a fim de evitar a absorção de água pelo bambu durante a cura do mesmo.

Como sugestões de aplicação de vigas de concreto com reforço de bambu foram confeccionadas tabelas de uso prático.

## 6.1 - Tabelas de dimensionamento para uso prático

A fim de tornar este trabalho um instrumento de uso prático, foi dimensionado vigas de seções transversais e comprimentos variados, para várias situações de cargas e de apoio, com o critério de dimensionamento apresentado.

Estas vigas podem ser usadas em pequenas construções ou em instalações comuns ao meio rural.

- 1- Viga bi apoiada com duas cargas concentradas simétricas em relação aos apoios;
- 2 - Viga bi apoiada com carga uniformemente distribuída;
- 3 - Viga bi apoiada com uma carga concentrada aplicada no meio do vão;
- 4 - Vigas em balanço com carga concentrada em sua extremidade;
- 5 - Vigas em balanço com carga uniformemente distribuída.

### 1 – Viga bi-apoiada com duas cargas concentradas simétricas em relação aos apoios

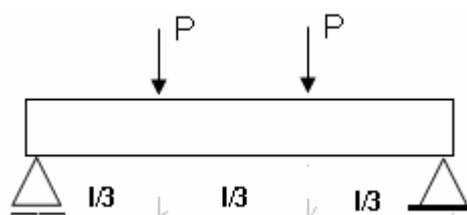


Figura 6.1 – Modelo de viga para o dimensionamento apresentado na Tabela 6.1.

Para efeito de dimensionamento das vigas segundo a situação mostrada na Figura 6.1, e apresentada na Tabela 6.1, considera-se a largura da seção transversal constante  $b_w = 0,12$  m, o concreto com  $f_{ck} = 20$  MPa, fator água/cimento ( $a/c = 0,50$ ) e um consumo de cimento de  $300\text{kg/m}^3$ .

Dimensionando-se o traço para os valores indicado tem-se a composição aproximada: 1:4:3, indicando as quantidade de cimento, areia e brita, respectivamente. Esta composição foi usada nas Tabelas 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, e 6.5.

Tabela 6.1 – Resumo do dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu,  $\rho = 3\%$ , e  $b_w = 12$  cm.

$\ell$ m	h m	d m	$V_c$ $m^3$	nºde varetas	s (cm)	$P(máx.)$ kgf	cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita nº0 (Kg)	Água (litros)
1,00	0,12	0,085	0,014	7	3	260	4	17	12	2
1,10	0,12	0,085	0,016	7	3	237	5	19	13	2
1,20	0,12	0,085	0,017	7	3	217	5	20	14	3
1,30	0,13	0,095	0,020	8	3	243	6	24	17	3
1,40	0,14	0,105	0,024	8	3	268	7	28	19	4
<b>1,50</b>	<b>0,15</b>	<b>0,115</b>	<b>0,027</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	<b>294</b>	<b>8</b>	<b>32</b>	<b>22</b>	<b>4</b>
1,60	0,16	0,125	0,031	10	3	319	9	36	25	5
1,70	0,17	0,135	0,035	10	3	345	10	41	28	5
1,80	0,18	0,145	0,039	11	3	371	12	46	32	6
1,90	0,19	0,155	0,043	11	2	396	13	51	35	6
2,00	0,20	0,165	0,048	12	2	422	14	57	39	7
2,10	0,21	0,175	0,053	13	2	447	16	62	43	8
2,20	0,22	0,185	0,058	13	2	473	17	68	48	9
2,30	0,23	0,195	0,063	14	2	499	19	75	52	10
2,40	0,24	0,205	0,069	14	2	524	21	81	57	10
2,50	0,25	0,215	0,075	15	2	550	23	88	61	11
2,60	0,26	0,225	0,081	16	2	575	24	96	66	12
2,70	0,27	0,235	0,087	16	2	601	26	103	72	13
2,80	0,28	0,245	0,094	17	2	627	28	111	77	14
2,90	0,29	0,255	0,101	17	2	652	30	119	83	15
3,00	0,30	0,265	0,108	18	2	678	32	127	88	16

Sendo  $M_d$  dado pela Equação 4.14

$$M_d máx. = 1324 \cdot b_w \cdot h \cdot d$$

O momento máximo que deve atuar na viga é:

$$M = 697 \cdot b_w \cdot h \cdot d$$

## 2 – Vigas bi-apoiadas com carga uniformemente distribuída

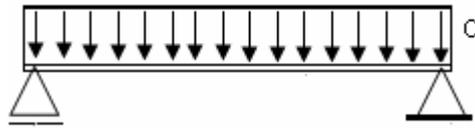


Figura 6.2 – Modelo da viga para o dimensionamento apresentado na Tabela 6.2.

Usando-se o mesmo equacionamento já citado, considerando uma viga bi-apoiada com carga uniformemente distribuída, têm-se os resultados apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Resumo do dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu,  $\rho = 3\%$  e  $b_w = 12$  cm.

$\ell$	$h$	$d$	$V_c$	nºde	$s$	$q$	cimento	Areia	Brita	Água
m	m	m	m <sup>3</sup>	varetas	(cm)	kgf/m	(Kg)	(Kg)	nº.0 (Kg)	(litros)
1,00	0,12	0,085	0,016	7	3	658	5	19	13	2
1,10	0,12	0,085	0,017	7	3	537	5	21	14	3
1,20	0,12	0,085	0,019	7	3	446	6	22	16	3
1,30	0,13	0,095	0,022	8	3	458	7	26	18	3
1,40	0,14	0,105	0,026	8	3	468	8	30	21	4
<b>1,50</b>	<b>0,15</b>	<b>0,115</b>	<b>0,030</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	<b>477</b>	<b>9</b>	<b>35</b>	<b>24</b>	<b>4</b>
1,60	0,16	0,125	0,034	10	3	483	10	40	28	5
1,70	0,17	0,135	0,038	10	3	489	11	45	31	6
1,80	0,18	0,145	0,043	11	2	494	13	50	35	6
1,90	0,19	0,155	0,048	11	2	498	14	56	39	7
2,00	0,20	0,165	0,053	12	2	501	16	62	43	8
2,10	0,21	0,175	0,058	13	2	504	17	69	48	9
2,20	0,22	0,185	0,064	13	2	506	19	75	52	10
2,30	0,23	0,195	0,070	14	2	508	21	82	57	10
2,40	0,24	0,205	0,076	14	2	509	23	90	62	11
2,50	0,25	0,215	0,083	15	2	510	25	97	67	12
2,60	0,26	0,225	0,089	16	2	511	27	105	73	13
2,70	0,27	0,235	0,096	16	2	511	29	113	79	14
2,80	0,28	0,245	0,103	17	2	511	31	122	85	16
2,90	0,29	0,255	0,111	17	2	511	33	131	91	17
3,00	0,30	0,265	0,119	18	2	511	36	140	97	18

Sendo  $M_d$  dado pela Equação 4.14

### 3 – Vigas bi apoiadas com uma carga concentrada no meio do vão

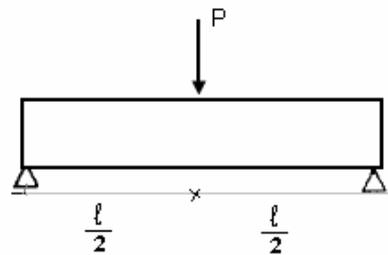


Figura 6.3 – Modelo da viga para o dimensionamento apresentado na Tabela 6.3

Usando o mesmo equacionamento já citado, considerando uma viga bi-apoiada com uma carga concentrada no centro, encontra-se os resultados da Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Resumo do dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu,  $\rho = 3\%$  e  $b_w = 12$  cm.

$\ell$	$h$	$d$	$V_c$	nºde	$s$	$P$	cimento	Areia	Brita	Água
m	m	m	m <sup>3</sup>	varetas	(cm)	kgf	(Kg)	(Kg)	nº.0	(litros)
1,00	0,12	0,085	0,016	7	3	347	5	19	13	2
1,10	0,12	0,085	0,017	7	3	316	5	21	14	3
1,20	0,12	0,085	0,019	7	3	289	6	22	16	3
1,30	0,13	0,095	0,022	8	3	324	7	26	18	3
1,40	0,14	0,105	0,026	8	3	358	8	30	21	4
<b>1,50</b>	<b>0,15</b>	<b>0,115</b>	<b>0,030</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	<b>392</b>	<b>9</b>	<b>35</b>	<b>24</b>	<b>4</b>
1,60	0,16	0,125	0,034	10	3	426	10	40	28	5
1,70	0,17	0,135	0,038	10	3	460	11	45	31	6
1,80	0,18	0,145	0,043	11	2	494	13	50	35	6
1,90	0,19	0,155	0,048	11	2	528	14	56	39	7
2,00	0,20	0,165	0,053	12	2	562	16	62	43	8
2,10	0,21	0,175	0,058	13	2	597	17	69	48	9
2,20	0,22	0,185	0,064	13	2	631	19	75	52	10
2,30	0,23	0,195	0,070	14	2	665	21	82	57	10
2,40	0,24	0,205	0,076	14	2	699	23	90	62	11
2,50	0,25	0,215	0,083	15	2	733	25	97	67	12
2,60	0,26	0,225	0,089	16	2	767	27	105	73	13
2,70	0,27	0,235	0,096	16	2	801	29	113	79	14
2,80	0,28	0,245	0,103	17	2	836	31	122	85	16
2,90	0,29	0,255	0,111	17	2	870	33	131	91	17
3,00	0,30	0,265	0,119	18	2	904	36	140	97	18

Sendo  $M_d$  dado pela Equação 4.14

#### 4 - Vigas em balanço com carga uniformemente distribuída

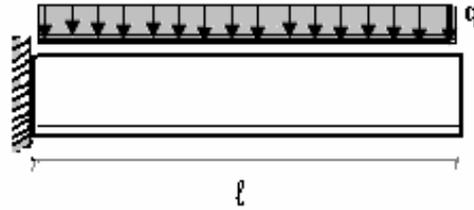


Figura 6.4 – Modelo da viga para o dimensionamento apresentado na Tabela 6.4

Usando-se a metodologia de dimensionamento já apresentada tem-se os resultados da Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Resumo do dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu,  $\rho = 3\%$  e  $b_w = 12$  cm.

$\ell$ m	h m	d m	$V_c$ $m^3$	nºde varetas	q kgf/m	cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita nº0 (Kg)	Água (litros)
1,0	0,20	0,165	0,0264	12	428	8	31	22	4
1,1	0,22	0,185	0,0319	13	528	10	38	26	5
1,2	0,24	0,205	0,0380	14	638	11	45	31	6
1,3	0,26	0,225	0,0446	16	759	13	53	36	7
1,4	0,28	0,245	0,0517	17	890	16	61	42	8
1,5	0,30	0,265	0,0594	18	1031	18	70	49	9

$M_{m\acute{a}x.}$  calculado de acordo com a Equação 4.18.

$$M = \frac{M_d máx}{\gamma_d} = \frac{1324}{2,50} \cdot b_w \cdot h \cdot d$$

$$M_{m\acute{a}x.} = 530 \cdot b_w \cdot h \cdot d$$

## 5 - Vigas em balanço com carga concentrada na extremidade

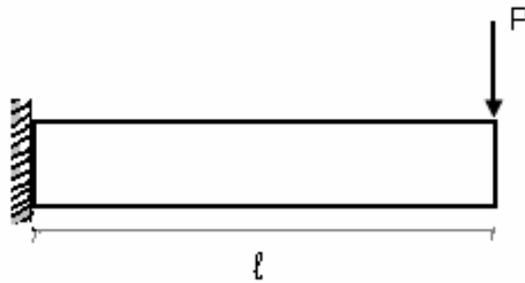


Figura 6.5 – Modelo da viga para o dimensionamento apresentado na Tabela 6.5.

Usando-se a metodologia de dimensionamento já apresentada, têm-se os resultados da Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Resumo do dimensionamento de vigas de concreto com reforço de bambu,  $\rho = 3\%$  e  $b_w = 12$  cm.

$\ell$ m	h m	d m	$V_c$ $m^3$	nºde varetas	P kgf	cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita nº0 (Kg)	Água (litros)
1,0	0,20	0,165	0,0264	12	367	8	31	22	4
1,1	0,22	0,185	0,0319	13	413	10	38	26	5
1,2	0,24	0,205	0,0380	14	458	11	45	31	6
1,3	0,26	0,225	0,0446	16	504	13	53	36	7
1,4	0,28	0,245	0,0517	17	550	16	61	42	8
1,5	0,30	0,265	0,0594	18	596	18	70	49	9

$M_{máx.}$  calculado de acordo com a Equação 4.18.

$$M_{máx.} = 530 \cdot b_w \cdot h \cdot d$$

## 1 - Vigas de fechamento de vãos de portas e janelas



Figura 6.6 - Detalhe da aplicação de vigas, colunas e placas de concreto com reforço de bambu, em galpões de instalações rurais

## 2 - Estacas e mourões para cercas

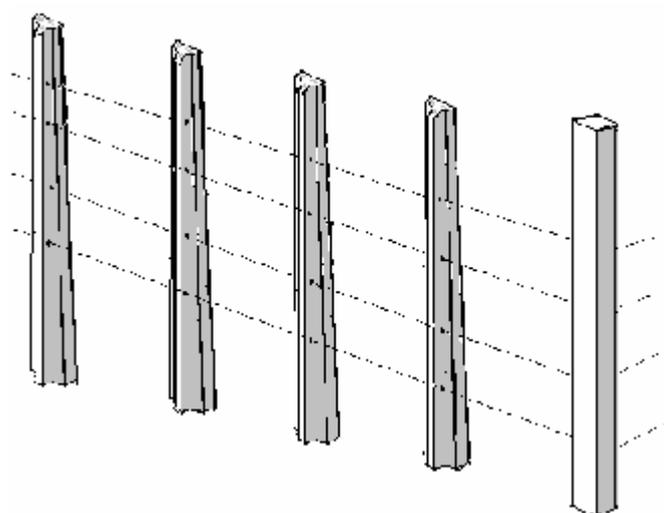


Figura 6.7 - Estacas e mourão pré-moldados para cercas

### 3 - Construções de casas populares

Este trabalho apresenta a possibilidade real do uso de vigas de concreto com reforço de bambu em substituição ao aço. Entretanto, pesquisas mostram que este material pode ser usado em todas as partes estruturais de pequenas construções, como também nas paredes e coberturas.

Sob o ponto de vista técnico a utilização do bambu como reforço do concreto é possível. Pode-se programar um processo construtivo industrializável que habilite este material como elemento estruturante em um sistema formal.

A utilização de resíduos como agregados e esta fibra vegetal carrega um conceito ambiental importante. O baixo consumo de energia e as reciclagens dos resíduos de construções resultam em um produto atrativo economicamente, e que pode facilitar o processo construtivo, contribuindo para a redução de déficit habitacional do Brasil.

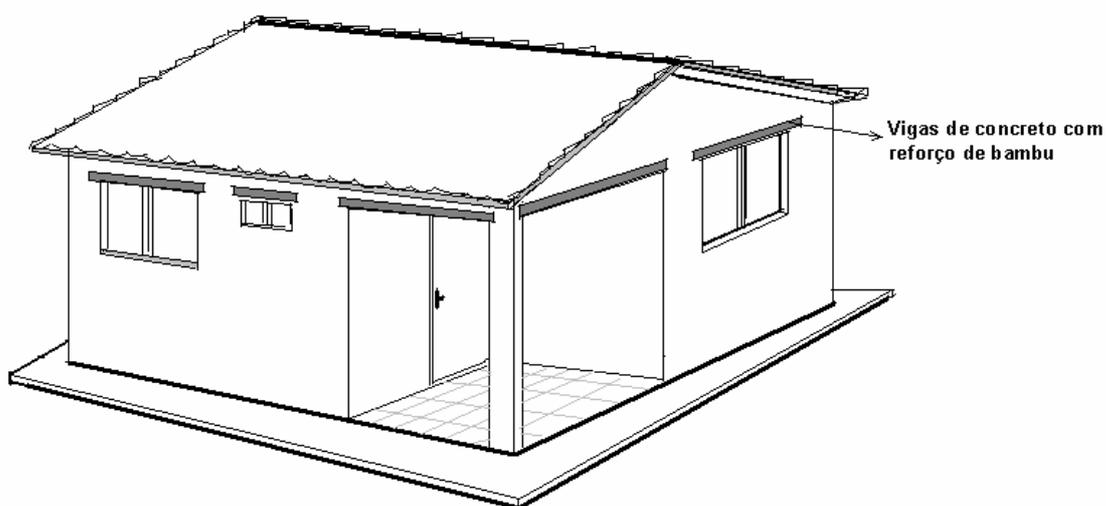


Figura 6.8 - Modelo de casa popular cujas vigas podem ser construídas com o material sugerido por este trabalho.

Dando continuidade ao estudo sobre a substituição do aço pelo *Bambusa vulgaris* em vigas de concreto, tem-se como sugestões as seguintes pesquisas:

- 1 - Aplicação do *Bambusa vulgaris* com tratamento químico, de modo a evitar o ataque das varetas pelo *Dinoderus minutus*, antes do seu uso;
- 2 - O uso de concreto reciclado com reforço de Bambusa Vulgaris, verificando o comportamento estrutural desse material;
- 3 - O uso de pinos de aço e de bambu, fixados nas varetas, para melhorar a aderência bambu-concreto, desta forma melhorando a capacidade de resistência destas vigas;
- 4 - Verificar o uso de cabos de bambu como reforço do concreto;
- 5 - Dimensionamento de outros elementos estruturais de concreto com reforço de bambu;
- 6 - Estudos de durabilidade do material bambu-concreto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADA, S.; MUNEKATA, T.; NAGASE, Y.; ICHIKAWA Y.; KIRIGAI, A.; ZHIFEI, Y. **The mechanical structures of bamboos in viewpoint of functionally gradient and composite materials**. Journal of Composite Materials, Thousand Oaks, v.30, n.7, p.801-819, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 2003. "**Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**". NBR-6118. Rio de Janeiro, Brasil.

BERALDO, A.L. BAMBUCRETO - **O uso do bambu como reforço do concreto**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 16, 1987, Jundiaí. Anais... Jundiaí: SBEA, v.2, 1987, p.521-530.

CARDOSO JUNIOR, Rubens, **Arquitetura com bambu**. Porto Alegre: UFRGS, 2000 (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação).

CHUST, ROBERTO CARVALHO; FILHO, JASSON RODRIGUES DE FIGUEREDO. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de Concreto Armado**. 2ª edição. São Paulo: Eduscar, 2001. 374p.

CULZONI, R.A.M. **Caraterísticas dos bambus e sua utilização como material alternativo no concreto**. Rio de Janeiro: PUCRio, 1986. 134 p. Dissertação Mestrado.

CZARNIESKI, C. J.; MESQUITA, L. P.; WILLRICH, F. L.; BRAGA, A. C.; LIMA JÚNIOR, H. C.; BARBOSA, N. P. **Avaliação da aderência bambu-concreto**. In: **XXXI Jornadas Sul-Americanas de Ingeniería Estructural, Mendoza**. Anais ..., CDROOM, 2004. p.1-16.

FIB. **Strutural concrete - Textbook on behavior, design and performance, Update knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990**. Comité Euro International da Béton, London, v.1 1999. 244p.

FUSCO, P. B. **Estruturas de Concreto Estrutural Armado Estruturas de Concreto**. 2ª edição. São Paulo. 2000.

GEYMAYER, H.G. E COX, F.B. **Bamboo reinforced concrete.** *Journal of the American Concrete Institute*, v.67,n.10, 1970, pp.841-846.

GHAVAMI, K AND HOMBEEK, R.V. **Mechanical properties and water-repellent treatment of bamboo.** In: Latin American Symposium Rational Organization of Building Applied to Low Cost Housing. 1981, São Paulo. Proceedings... São Paulo, v.1, 1981, p.49-55.

GHAVAMI, K. E MARINHO. A. B. **Determinação das propriedades dos Bambus das espécies: Mosó, Matake, guadua angustifolia, Guadua tigoara e Dendrocalamus giganteus para utilização na Engenharia.** Publicação – RMNC Bambu 01/2001 do Departamento de Engenharia Civil da PUC – Eio. 53p.

GHAVAMI, K. **Estruturas de Concreto Armadas com bambu.** Anais do 6º CECAP – PUC-Rio . Agosto 1990, Vol.1.

GHAVAMI, K. **O bambu, forte como o aço.** DC Tecnologia , p. 24-26, Março,1992.

GHAVAMI, K. **Ultimate load behaviour of bamboo** - reinforced lightweight concrete beams, Cement and concrete composites, London. 1995.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A.B. **Propriedades Mecânicas dos colmos dos bambus das Espécies: Mosó e Guadua angustifolia para utilização em Engenharia.** Publicação – RMNC - 2 Bambu: 02/2002 do Departamento de Engenharia Civil da PUC – Rio de Janeiro, 45p.

GHAVAMI, K.; SOUZA, M.V. de. **Propriedades mecânicas do bambu.** Rio de Janeiro: Relatório Interno apresentado ao PIBIC, PUC Rio. Ago., 2000.

GLENN, H. E. "**Bamboo reinforcement in portland cement concrete.**" Engineering Experiment Station, Clemson Agricultural College, Clemson, South Carolina, Bulletin No. 4, May 1950.

HIDALGO, OSCAR LOPEZ. "**Bambu: Su cultivo y aplicaciones em fabricación de papel, construcción,** Cali, Estudos Técnicos Colombianos Ltda, 1974.

HIDALGO, OSCAR LOPEZ. **Bamboo The Gift of The Gods** – 1ª Edição Printed Colombia by D'VINNI LTDA, 2003.

ICBO- Ac 162: **Acceptance criteria for structural bamboo**: ICBO Evaluation Service Ltd. California, 2000.

INBAR- **The International Network on Bamboo and Rattan**. In: International model building code for bamboo. Jan., 1999.

JANSSEN, J.J.A. **Building with Bamboo**. London, UK. Intermediate Technology Publications, 65p. 1995.

JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil** – Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo: Tese (Livre Docência) Escola Politécnica – USP, 2000.

KURIAN, N.P.; KALAM, A.K.A. Bamboo reinforced soil-cement for rural use. Indian Concrete Journal, New Delhi, n.51, p.382-389, 1977.

LEONHARDT, F. **Construções de Concreto** – Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. Interciência LTDA, v. 1 , Rio de Janeiro, 1977, p.305.

LIESE, W. **The anatomy of bamboo culms**. Technical Report, International Network for Bamboo and Rattan, Beijing, Eindhoven, New Delhi, 1998, 208p.

LIESE, W. **The Anatomy of Bamboo Culms**. Technical Report. International Network for Bamboo and Rattan, Beijing. Peoples Republic of China, 1998. 203p.

LONDOÑO, XIMENA. **Evaluation of Bamboo Resources in Latin America**. A Summary of the Final Report of Project N 96-8300-01-4 – International Network for Bamboo and Rattan, 1999.

LOPEZ, O. H. **Nuevas Técnicas de construcción con Bambú**. Estudios Tecnicos Colombianos. Ltda Bogotá, Colombia. 1978. 95 p.

MACGREGOR, J.G. **Reinforced concrete, mechanics and design**. New Jersey: Prentice Hall, 1997, 939p. PUC-Rio - Certificação Digital N° 0025026/CA.

QISHENG, ZHANG; BIN, XU. **Bamboo Flooring Manufacturing Unit**. International Network for Bamboo and Rattan - INBAR. Transfer of Technology Model-TOTEM.

Bamboo Engineering and Research Center/ Nanjing Forestry University / Nanjing, Jiangsu Province, China, 2001.

RILEM – FIP – CEB. **Bond test for reinforced steel** – Pull-Out test. *Materiaux et construction*, v.6, n.32, 1973, pp.102-105. 1973.

RILEY, WILLIAM F STURGES, LEROY D e MORRIS, DON H. **Mecânica dos materiais**. 3ª edição, 2005; LTC Rio de Janeiro - RJ.

ROSA, M.A.; CUNHA, B.S.; LIMA JÚNIOR, H.C.; WILLRICH, F.L; BARBOSA, N.P. **bamboo as concrete reinforcement: durability study**. Anais das XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural Maio / 2006 ISBN 85-99956-01-9 Materiais Estruturais Trabalho JOR0022 - p. 1005-1013

RODRIGUES, PÚBLIO PENNA FIRME. **Parâmetros de dosagem do concreto**. 3ª.ed. São Paulo, ABCP,1998. 32p. (ET-67).

S. R. MEHRA AND R. G. GHOSH. "**Bamboo-reinforced soil-cement**," *Civil Engineering and Public Works Review*, Vol. 60, no. 711, October 1965; vol. 60, no. 712. November 1965.

SEBRAE Artesanato. Um **Instrumento de Inserção Social**. Brasília: Revista Sebrae nº5, Julho/Agosto de 2002.

SILVA, ADRIANA VÁLIO Roque da. **Nossa Estrela: O sol**. 1ª edição. São Paulo, editora Livraria da física, 2006.

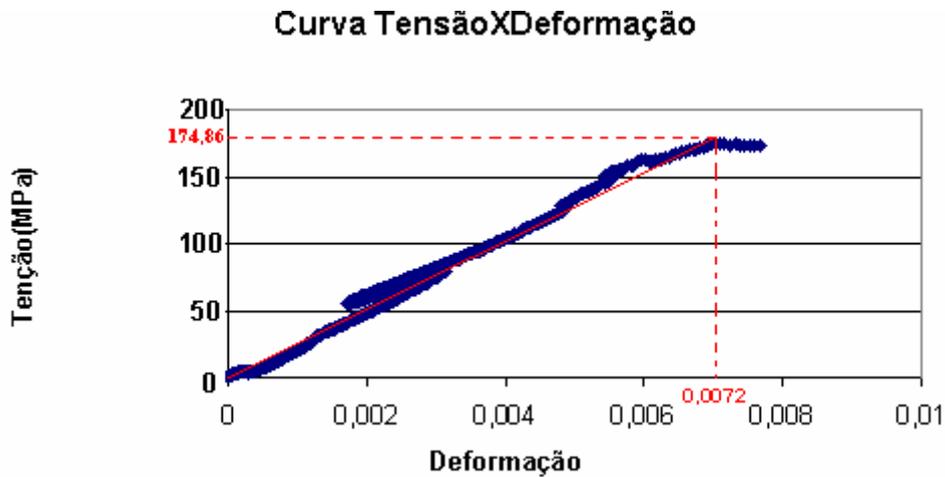
SUSSEKIND, JOSÉ CARLOS, 1984. **Curso de Concreto Armado**. 2 edição. Rio de Janeiro: Globo Vol. I e II.1985.

TIMOSHENKO, S. P; GERE, J.E.. **Mecânica dos Sólidos Vol. 1 e 2**. 3ª edição. LTC. São Paulo, 1998.

TOLEDO FILHO, R. D. **Utilização de materiais não convencionais nas construções rurais**. Relatório Técnico Nº. 40,1800/88.1. Campina Grande, 1991.92p.

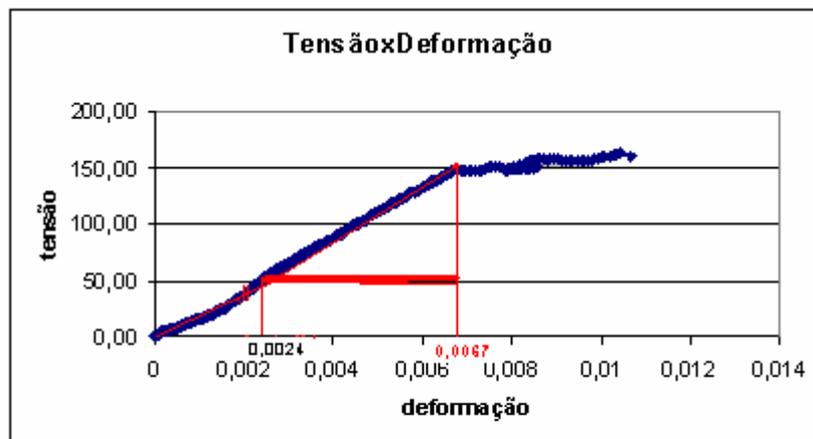
# Apêndice

Determinação do Módulo de Elasticidade na tração (**E**), do bambusa vulgaris, usando 2/3 da espessura externa das taliscas de bambu.



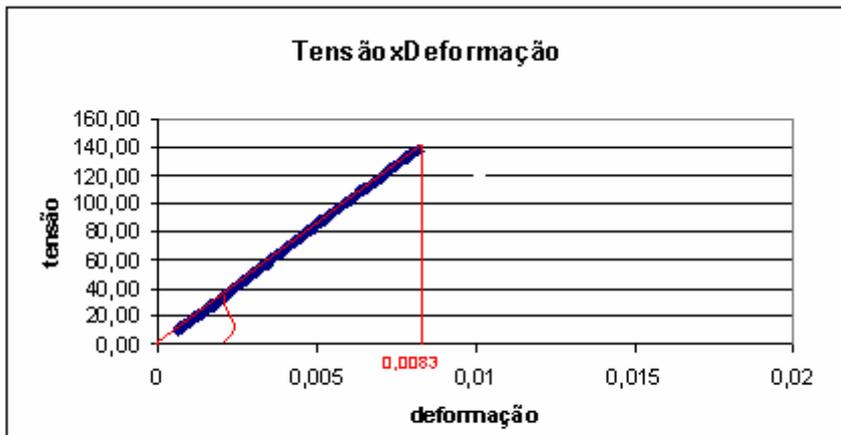
$$\operatorname{tg}\alpha = E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{174,86}{0,0072} = 24,41\text{GPa}$$

Gráfico 1 - Ensaio 01 – corpo-de-prova com nó, seção mediana



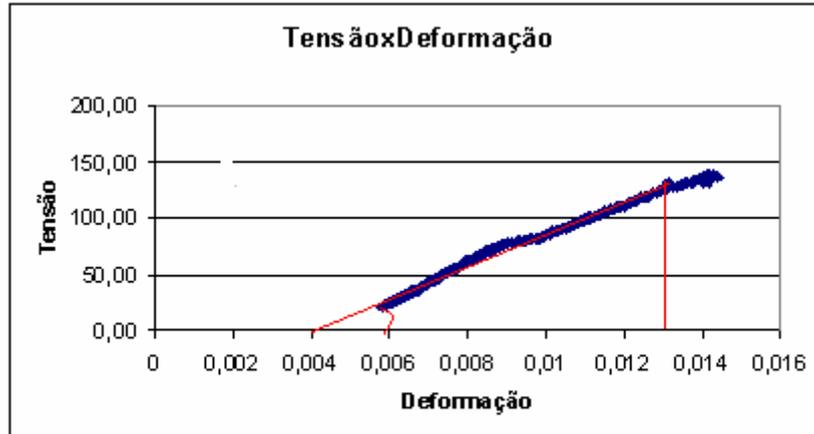
$$\operatorname{tg}\alpha = E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{100}{0,0043} = 23,25\text{GPa}$$

Gráfico 2 - Ensaio 02 – corpo-de-prova com nó, seção mediana



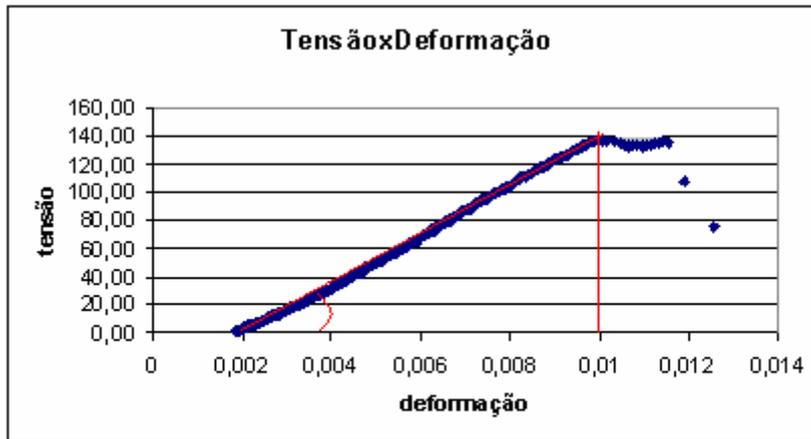
$$\text{tg}\alpha = E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{140,00}{0,0083} = 16,86 \text{ GPa}$$

Gráfico 3 - Ensaio 03 – corpo-de-prova com nó, seção mediana



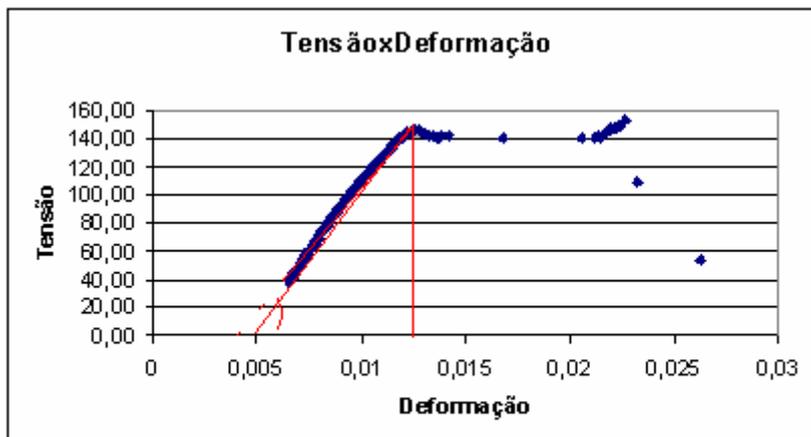
$$\text{tg}\alpha = E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{125,00}{0,009} = 13,89 \text{ GPa}$$

Gráfico 4 - Ensaio 04 – corpo-de-prova com nó, seção mediana



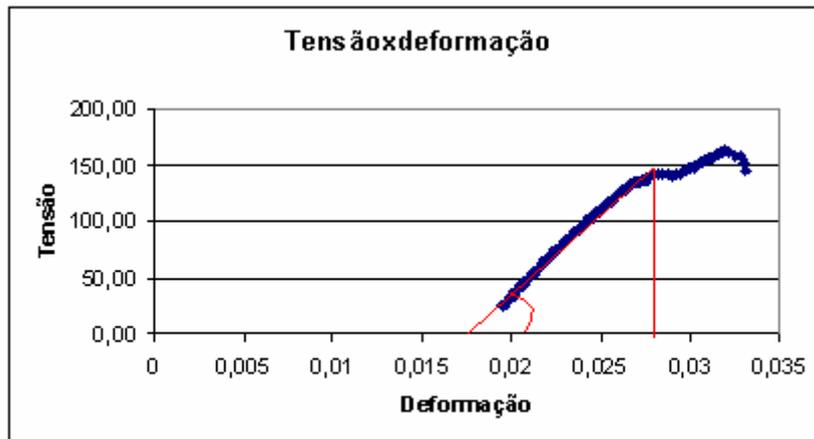
$$\text{tg}\alpha = E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{140,00}{0,0080} = 17,50\text{GPa}$$

Gráfico 5 - Ensaio 05 – corpo-de-prova com nó, seção mediana



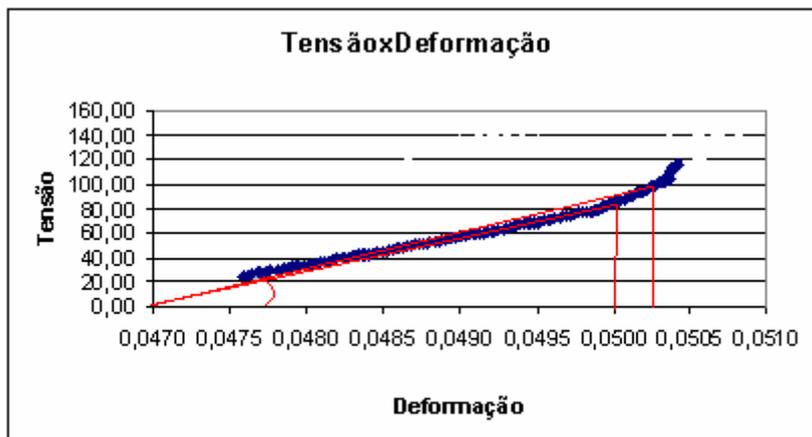
$$\text{tg}\alpha = E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{145,00}{0,0075} = 19,33\text{GPa}$$

Gráfico 6 - Ensaio 06 – corpo-de-prova com nó, seção mediana



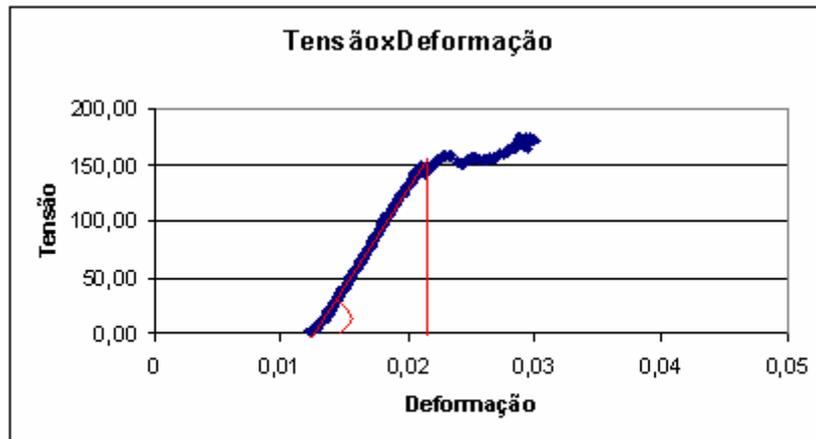
$$\operatorname{tg} \alpha = E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{148,00}{0,0092} = 16,08 \text{ GPa}$$

Gráfico 7 - Ensaio 07 – corpo-de-prova com nó, seção mediana



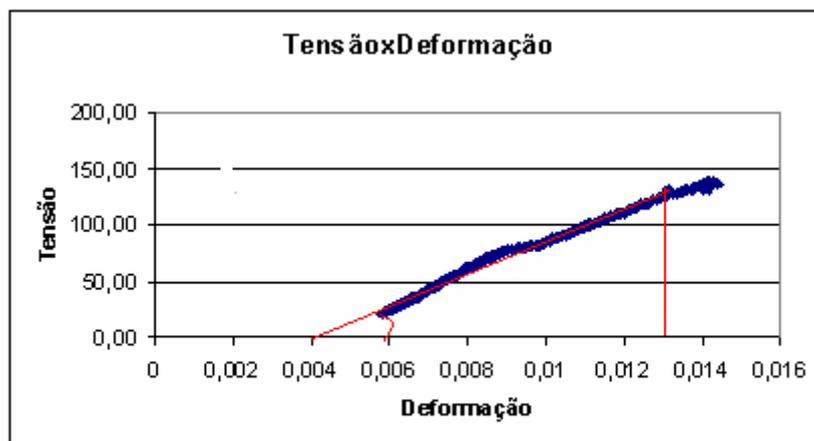
$$\operatorname{tg} \alpha = E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{80,00}{0,003} = 26,67 \text{ GPa}$$

Gráfico 8 - Ensaio 08 – corpo-de-prova com nó, seção mediana



$$\operatorname{tg} \alpha = E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{150,00}{0,01} = 15,00 \text{ GPa}$$

Gráfico 9 - Ensaio 09 – corpo-de-prova com nó, seção mediana



$$\operatorname{tg} \alpha = E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{125,00}{0,009} = 13,89 \text{ GPa}$$

Gráfico 10 - Ensaio 10 – corpo-de-prova com nó, seção mediana