

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

"Avaliação do comportamento estrutural de vigas de concreto armado com taliscas de bambu reforçadas nos nós"

NAYRA YUMI TSUTSUMOTO

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Pinheiro Melges

Coorientador: Prof. Dr. Cesar Fabiano Fioriti

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área do conhecimento: Estruturas

Ilha Solteira – SP
Agosto de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

T882a Tsutsumoto, Nayra Yumi.
Avaliação do comportamento estrutural de vigas de concreto armado com taliscas de bambu reforçadas nos nós / Nayra Yumi Tsutsumoto. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016
165 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2016

Orientador: José Luiz Pinheiro Melges

Co-orientador: Cesar Fabiano Fioriti

Inclui bibliografia

1. Bambu. 2. Concreto. 3. Vigas. 4. Aderência. 5. Tração. 6. Ensaios de flexão.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Avaliação do comportamento estrutural de vigas de concreto armado com taliscas de bambu reforçadas nos nós

AUTORA: NAYRA YUMI TSUTSUMOTO

ORIENTADOR: JOSE LUIZ PINHEIRO MELGES

CO-ORIENTADOR: CESAR FABIANO FIORITI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA CIVIL, área: ESTRUTURAS pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSÉ LUIZ PINHEIRO MELGES
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ROMILDO DIAS TOLÊDO FILHO
COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia / Universidade Federal do Rio de Janeiro

Ilha Solteira, 05 de agosto de 2016

*Dedico este trabalho a minha família, pela paciência e amor durante essa jornada, em especial aos meus avós **Takeaki** e **Júlia**, pelo exemplo de caráter e sabedoria, por todo carinho, amor, apoio e admiração.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por mais esta conquista, por sua grandeza e amor incondicional, por estar comigo sempre, em todos os momentos da minha vida, me guiando e iluminando o meu caminho. Agradeço, ainda, pelo apoio e por ter me dado fé nos momentos mais difíceis. Muito obrigada, Senhor!

À minha família pelo amor, apoio, admiração e pela confiança depositada no meu trabalho. Agradeço em especial aos meus avós Takeaki e Júlia, aos quais dedico este trabalho, pelo exemplo de caráter e sabedoria e por terem me ensinado a nunca desistir frente às dificuldades. Agradeço aos meus pais Nelson e Valdirene e aos meus queridos irmãos Lucas e Victor, pelo carinho e cuidado de sempre. À minha madrinha Eliana, às minhas tias Dulce e Lucila, pelas doces palavras e confiança. Aos meus primos, em especial às minhas primas Danielle e Mylla pela amizade, pelo incentivo e pelo amparo nessa jornada.

Agradeço ao meu querido e amado Eduardo, pela paciência, pelo afago nos momentos difíceis, pela alegria nos momentos de vitória, pelo empenho e cuidado, enfim por todo amor a mim dedicado.

Às minhas amigas Aline, Elaine, Fabrícia, Jéssica, Maísa e ao casal de amigos Sylvia e Wilio, pelo carinho e apoio de sempre, e em especial ao meu amigo e colega de mestrado Lucas, pelo encorajamento e pelas palavras de incentivo durante toda a pesquisa.

A todos os meus colegas de trabalho do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), Campus Santa Luzia, pela confiança e por acreditarem na realização deste projeto.

Agradeço ao meu Orientador Prof. Dr José Luiz Pinheiro Melges pela cuidadosa orientação, pela paciência, pela disposição, pelos ensinamentos, e

principalmente, pelo profissionalismo, competência e seriedade dedicada à pesquisa, além da amizade compartilhada.

Também sou eternamente grata ao meu Coorientador e amigo Prof. Dr. Cesar Fabiano Fioriti pela amizade de sempre, pela dedicada orientação, pelos conselhos e aprendizados, pela disposição e paciência e, sobretudo, pelo amparo em todos os momentos. Agradeço, ainda, pela oportunidade de fazer parte do grupo de pesquisa “Manifestações Patológicas em Edificações (MAPE)”, no qual tenho contribuído e adquirido muito conhecimento.

Agradeço ao Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki e ao Prof. Dr. Mauro Mitsuuchi Tashima pelas valiosas contribuições, pela seriedade e profissionalismo, pela amizade e pela oportunidade de fazer parte do grupo de pesquisa Materiais Alternativos de Construção (MAC), no qual pude ampliar meus conhecimentos em materiais de construção civil e estruturas.

Agradeço ao Prof. Dr. Jefferson Sidney Camacho que proporcionou a utilização da estrutura do Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural (NEPAE).

Ao Prof. MsC. João Victor Fazzan, pelos ensinamentos transmitidos para a operação do Sistema de Aquisição de Dados, pelas contribuições e pela amizade compartilhada.

À empresa Jeruelplast, pela doação dos espaçadores do tipo EPR 24-4 utilizados na pesquisa.

Ao Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC), pelo fornecimento da caracterização do cimento CP II Z 32 (Cimento Portland Composto) utilizado na pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da FEIS (UNESP), Mário, Ozias e Ronaldo, em especial aos técnicos Flávio e Gilson pela amizade, apoio e disposição para a realização da ruptura dos corpos de prova do ensaio de

arrancamento, para a colagem dos extensômetros elétricos nos materiais e para a realização da ruptura dos modelos de vigas.

Agradeço em especial aos alunos de Iniciação Científica, Antônio, Paulo, Pedro e Leopoldo, e ao colega de mestrado Lucas, por terem auxiliado no processo de coleta do látex, corte dos colmos e confecção das taliscas de bambu, e, ainda, por terem auxiliado no processo de ensaio das vigas. Agradeço, por fim, aos membros do grupo de pesquisa “Materiais Alternativos de Construção (MAC)” por terem auxiliado no processo de coleta e separação de materiais.

“Tudo posso naquele que me fortalece.”

Filipenses 4:13

RESUMO

O bambu é uma planta renovável, perene, tropical e que apresenta uma série de vantagens, tais como: crescimento rápido, elevada resistência mecânica, grande versatilidade, beleza, e não necessita do replantio de colmos. Certamente, fica evidente que o bambu é um material de grande potencial, para diversos setores, sobretudo da construção civil, em que o mesmo vem sendo utilizado desde os tempos mais remotos. Nas estruturas de concreto, o bambu tem sido estudado como um elemento passível de resistir aos esforços de tração. Entretanto, como desvantagens, o bambu é um material orgânico e higroscópico. Após a concretagem, durante a cura do concreto, o bambu absorve água e, conseqüentemente, tem suas dimensões aumentadas. Com o concreto endurecido, o bambu começa a perder a água absorvida e se retrai, sofrendo uma redução de seu volume, o que diminui a eficiência da aderência entre os materiais. Outra desvantagem do bambu é a região do nó, cuja resistência à tração é muito inferior à da região internodal. O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar o comportamento estrutural de vigas de concreto armado, sem e com reforço adicional de taliscas de bambu, por meio de ensaios de flexão. As taliscas de bambu utilizadas como reforço adicional à armadura são de dois tipos: com e sem reforços nas regiões nodais. Com o intuito de analisar a condição de aderência entre a talisca de bambu e o concreto, foram realizados ensaios de arrancamento. As taliscas foram elaboradas a partir de colmos da espécie *Bambusa vulgaris*, disponível na cidade de Ilha Solteira, algumas com e outras sem reforços nas regiões nodais. Todas as taliscas foram impermeabilizadas com látex de seringueira. Para a colagem dos reforços nos nós das taliscas, foi utilizada uma resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona. As taliscas com reforços colados apresentaram um aumento da resistência à tração. Com relação ao ensaio de arrancamento, a existência do reforço nos nós permitiu acréscimos em relação à tensão normal, provocando a ruptura da talisca e não o seu escorregamento. Quanto ao ensaio de flexão das vigas, concluiu-se que a presença das taliscas de bambu aumentou a capacidade resistente das vigas e, portanto, poderia se pensar na redução da quantidade de aço a ser utilizado. O reforço nos nós das taliscas de bambu proporcionou um melhor comportamento com relação às flechas e um discreto aumento na capacidade resistente das vigas. No que diz respeito ao padrão de fissuração, observou-se que a ruptura das vigas ocorreu na região central, região submetida aos maiores momentos fletores, e, embora as vigas com reforço adicional de taliscas de bambu reforçadas nos nós tenham apresentado maior número de fissuras, aparentemente, o padrão de fissuração foi basicamente o mesmo para todas as vigas ensaiadas.

Palavras-chave: bambu, concreto, aderência, vigas, tração, ensaios de arrancamento, ensaios de flexão, látex.

ABSTRACT

Bamboo is a renewable, perennial and tropical plant, and that presents a number of advantages, such as: growth quickly, high mechanical resistance, versatility, beauty, and does not require the replanting of culms. Certainly it is clear that bamboo is a great potential material for various industries, especially construction, in which it has been used since ancient times. In concrete structures, bamboo has been studied as an element capable of resisting the traction efforts. However, as disadvantages, bamboo is an organic and hygroscopic material. After the concrete, during curing of the concrete, bamboo absorbs water and, therefore, has increased their dimensions. With the hardened concrete, bamboo begins to lose water absorbed and retracts suffering a reduction of its volume, which decreases the efficiency of adhesion between the materials. Another disadvantage of bamboo is the node region, whose tensile strength is much lower than the internode region. This study has as main objective to evaluate the structural behavior of reinforced concrete beams, with and without additional reinforcement bamboo splints through bending tests. The bamboo splints used as additional reinforcement to armor are of two types: with and without reinforcements in the node regions. In order to examine the condition of adhesion between the concrete and bamboo splint pull out tests were done. The splints were prepared from culms of *Bambusa vulgaris* species, available in the city of Ilha Solteira, some with and some without reinforcements in the node regions. All splints were coated with rubber trees latex. For bonding reinforcements in nodes of splints, we used a two-component polyurethane resin oil-based of castor plant. Samples with glued reinforcements showed an increase in the tensile strength. Regarding the pull out test, the existence of reinforcement in the nodes allowed increases in relation to normal tension, causing the rupture of splint and not its slipping. As for the bending test of the beams, it is concluded that the presence of bamboo splints increased bearing capacity of the beams and, therefore, could think of reducing the amount of steel to be used. Strengthening the nodes of bamboo splints provide better performance with respect to deflections and a slight increase in resistance capacity of beams. With regard to the crack pattern, it was observed that the breakage of the beams occurred in the central region, region subjected to higher bending moments, and, although the beams with additional reinforcement bamboo splints reinforced in the nodes had a higher number of cracks, apparently, the crack pattern was essentially the same for all tested beams.

Keywords: bamboo, concrete, bond, beams, tensile, pull out tests, bending tests, latex rubber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo do esquema a ser usado para reforçar uma talisca na região dos nós.....	23
Figura 2 – Viga de suporte feita de bambu em ponte.....	27
Figura 3 – Catedral Alternativa Nuestra Señora de La Pobreza, Colômbia	27
Figura 4 – Pavilhão ZERI, Alemanha	28
Figura 5 – Cobertura de bambu do Aeroporto Internacional de Barajas.....	29
Figura 6 – Cobertura de bambu do Centro Max Feffer, em Pardinópolis (SP)	29
Figura 7 – Perspectiva da estrutura do galpão-oficina do assentamento rural Horto de Aimorés	30
Figura 8 – Projeto dos pórticos	31
Figura 9 – Componentes e peças usadas na cobertura	31
Figura 10 – Içamento do pórtico do galpão com cobertura em bambu.....	32
Figura 11– Detalhe da ligação dos colmos de bambu com o pilar de madeira roliça, por meio de chapas metálicas	32
Figura 12 – Ensaio de tração	33
Figura 13 – Ensaio de compressão.....	33
Figura 14 – Taj Mahal, localizado na Índia.....	34
Figura 15 – Centro de Referência do Bambu e das Tecnologias Sociais (CERBAMBU RAVENA), localizado em Sabará (MG).....	35
Figura 16 – Dispositivo usado para a obtenção da geometria do filme tensionado e estrutura da cobertura feita com colmos de bambu	35
Figura 17 – Estrutura proposta no projeto com bambu	37
Figura 18 – Laje mista	38
Figura 19 – Pilar sendo ensaiado.....	40
Figura 20 – Detalhes dos pilares reforçados com bambu	41
Figura 21 – Fissuração ocorrida nas vigas ensaiadas.....	43
Figura 22 – Taliscas de bambu com pinos de aço e de bambu.....	43
Figura 23 – Viga sendo ensaiada.....	44
Figura 24 – Seringueiras localizadas na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), da UNESP – Campus de Ilha Solteira	46
Figura 25 – Ensaio de absorção	47
Figura 26 – Comparação do teor de absorção de água	47
Figura 27 – Ensaio de arrancamento	48
Figura 28 – Ensaio de arrancamento e empuxamento	49

Figura 29 – Características dos corpos de prova utilizados no ensaio de arrancamento	50
Figura 30 – Ensaio de tração	51
Figura 31 – Corpos de prova depois do ensaio de arrancamento	51
Figura 32 – Ensaio de tração da barra de aço com diâmetro de 5 mm	56
Figura 33 – Taliscas instrumentadas com um extensômetro elétrico	57
Figura 34 – Ensaio de tração das taliscas.....	58
Figura 35 – Coleta do látex.....	60
Figura 36 – Colmos de bambu.....	60
Figura 37 – Retirada de imperfeições na região dos galhos.....	61
Figura 38 – Corte com a serra circular.....	61
Figura 39 – Desempenamento da face interna da talisca	62
Figura 40 – Retirada da casca da face externa e padronização da espessura da talisca	62
Figura 41 – Desempenamento das faces laterais das taliscas.....	62
Figura 42 – Corte da talisca de modo a se obter a largura desejada	62
Figura 43 – Corpo de prova envolvido pelo filme plástico	64
Figura 44 – Aplicação de pressão, perpendicular ao plano da colagem.....	64
Figura 45 – Máquina Instron EMIC, já com o corpo de prova posicionado.....	64
Figura 46 – Detalhe das taliscas usadas no ensaio de arrancamento.....	65
Figura 47 – Pressão perpendicular à colagem por meio de um sargento.....	66
Figura 48 – Talisca reforçada nos nós	66
Figura 49 – Recipiente de PVC utilizado no processo de impermeabilização	67
Figura 50 – Varal usado no processo de impermeabilização	67
Figura 51 – Detalhe do tratamento feito no comprimento da talisca imerso no concreto, para taliscas com e sem reforço	68
Figura 52 – Taliscas prontas para serem utilizadas na concretagem dos corpos de prova do ensaio de arrancamento.....	69
Figura 53 – Colagem de reforços nos nós da talisca a ser utilizada na viga	70
Figura 54 – Detalhe da colagem do reforço	70
Figura 55– Taliscas instrumentadas com extensômetro elétrico	70
Figura 56 – Planilha utilizada para a dosagem do concreto	71
Figura 57 – Elaboração do corpo de prova	74
Figura 58 – Corpos de prova moldados	74
Figura 59 – Cura em câmara úmida.....	74
Figura 60 – Capeamento com gesso e chapa metálica.....	75
Figura 61 – Rótula	75

Figura 62 – Corpo de prova capeado e com a rótula posicionada.....	75
Figura 63 – Corpo de prova pronto para ser ensaiado.....	75
Figura 64 – Prensa hidráulica utilizada no ensaio de arrancamento	76
Figura 65 – Relógio comparador utilizado no ensaio de arrancamento.....	77
Figura 66 – Ensaio de compressão diametral usado para seccionar os corpos de prova	77
Figura 67 – Corpo de prova seccionado longitudinalmente.....	77
Figura 68 – Fôrmas de madeira usadas para a concretagem das vigas	80
Figura 69 – Armadura pronta para ser utilizada na concretagem.....	80
Figura 70 – Detalhe dos espaçadores utilizados.....	81
Figura 71 – Armadura principal longitudinal instrumentada com extensômetros elétricos.....	81
Figura 72 – Armaduras com (à esquerda) e sem (à direita) reforço adicional de taliscas de bambu.....	82
Figura 73 – Detalhe da talisca de bambu fixada na armadura, junto à face lateral da viga.....	82
Figura 74 – Armadura e taliscas de bambu instrumentadas com extensômetros.....	83
Figura 75 – Vigas e corpos de prova moldados com concreto	84
Figura 76 – Adensamento da viga em uma mesa vibratória.....	84
Figura 77 – Ensaio de consistência	84
Figura 78 – Resina epóxi aplicada na extremidade da talisca de bambu imediatamente antes da concretagem da viga	85
Figura 79 – Esquema estático do ensaio das vigas (unidades em cm)	86
Figura 80 – Detalhe do pórtico utilizado no ensaio de flexão	87
Figura 81 – Dispositivos utilizados no ensaio de flexão	87
Figura 82 – Sistema de aquisição de dados	87
Figura 83 – Curva granulométrica do agregado miúdo	90
Figura 84 – Curva granulométrica do agregado graúdo	91
Figura 85 – Gráficos completo e parcial usados na determinação das características mecânicas da barra de aço com diâmetro igual a 5 mm	93
Figura 86 – Gráficos completo e parcial usados na determinação das características mecânicas da talisca sem reforço ensaiada.....	94
Figura 87 – Tensões (em MPa), relacionadas à seção transversal fora do reforço com dimensão de $\pm(2\text{ cm} \times 0,5\text{ cm})$	96
Figura 88 – Corpo de prova rompido	97
Figura 89 – Taliscas após sofrerem a ruptura.....	97
Figura 90 – Ensaio de Arrancamento: Tensão Normal.....	101

Figura 91 – Ensaio de Arrancamento: Tensão de Aderência, somente para os corpos de prova que sofreram escorregamento	102
Figura 92 – Ruptura do nó interno reforçado (CP 1)	102
Figura 93 – Ruptura do nó externo reforçado após o descolamento dos reforços (CPs 2, 3 e 4)	103
Figura 94 – Ruptura na fixação da talisca à garra do equipamento, com descolamento do reforço em uma das faces da talisca (CP 5).....	103
Figura 95 – Escorregamento (CPs de 6 a 10)	104
Figura 96 – Gráfico comparativo do momento fletor máximo (ruptura) suportado para cada viga ensaiada.....	107
Figura 97 – Gráfico comparativo dos valores médios e dos desvios do momento fletor de ruptura das vigas ensaiadas	107
Figura 98 – Gráfico comparativo da curva “Carga x Deslocamento (ou flecha)” de todas as vigas ensaiadas	108
Figura 99 – Detalhe do gráfico comparativo da curva “Carga x Deslocamento (ou flecha)” de todas as vigas ensaiadas para as flechas de 6 mm e 8 mm.....	108
Figura 100 – Esquema utilizado para a obtenção do valor do momento de fissuração a partir da leitura dos deslocamentos da VIGA REFERÊNCIA 1	109
Figura 101 – Esquema utilizado para a obtenção do valor do momento de fissuração a partir da leitura dos deslocamentos da VIGA REFERÊNCIA 2	109
Figura 102 – Esquema utilizado para a obtenção do valor do momento de fissuração a partir da leitura dos deslocamentos da VIGA REFERÊNCIA 3	110
Figura 103 – Esquema utilizado para a obtenção do valor do momento de fissuração a partir da leitura dos deslocamentos da VIGA BAMBU 1.....	110
Figura 104 – Esquema utilizado para a obtenção do valor do momento de fissuração a partir da leitura dos deslocamentos da VIGA BAMBU 3.....	111
Figura 105 – Esquema utilizado para a obtenção do valor do momento de fissuração a partir da leitura dos deslocamentos da VIGA BAMBU REFORÇADO 1	111
Figura 106 – Esquema utilizado para a obtenção do valor do momento de fissuração a partir da leitura dos deslocamentos da VIGA BAMBU REFORÇADO 3	112
Figura 107 – Dados dos extensômetros elétricos colocados na VIGA REFERÊNCIA 3	114
Figura 108 – Dados dos extensômetros elétricos colocados na VIGA BAMBU 3.....	115
Figura 109 – Dados dos extensômetros elétricos colocados na VIGA BAMBU REFORÇADO 3.....	116
Figura 110 – Esquema da seção transversal e esforços no concreto e nas armaduras tracionada e comprimida das VIGAS REFERÊNCIA	118

Figura 111 – Deformações relacionadas ao domínio 2, para as VIGAS REFERÊNCIA	120
Figura 112 – Diagrama tensão vs deformação do aço usado nos cálculos	121
Figura 113 – Esquema da seção transversal e esforços no concreto e nas armaduras tracionada e comprimida das VIGAS BAMBU	124
Figura 114 – Deformações relacionadas ao domínio 2, das VIGAS BAMBU	125
Figura 115 – Esquema da seção transversal e esforços no concreto e nas armaduras tracionada e comprimida das VIGAS BAMBU REFORÇADO	129
Figura 116 – Deformações relacionadas ao domínio 2, das VIGAS BAMBU REFORÇADO.....	130
Figura 117 – Dados do Momento Fletor Resistente Calculado (M_{calc}) e do Momento Fletor Resistente Experimental (M_{exp}) de todas as vigas.....	133
Figura 118 – Evolução do Momento Fletor Resistente Experimental (M_{exp}) de todas as vigas	134
Figura 119 – Comportamento de um elemento estrutural quando solicitado à flexão simples	135
Figura 120 – Valor da flecha máxima calculada para o meio do vão.....	137
Figura 121 – Dados do momento fletor para as flechas de 6 mm e 8 mm.....	146
Figura 122 – Dados do módulo de elasticidade experimental e dos módulos de elasticidade estimados para o Estado Limite de Serviço (6 mm) e para a flecha máxima medida (8 mm)	146
Figura 123 – Fissuração das VIGAS REFERÊNCIA, medidas em cm	148
Figura 124 – Fissuração das VIGAS BAMBU, medidas em cm	149
Figura 125 – Fissuração das VIGAS BAMBU REFORÇADO, medidas em cm	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição final do traço do concreto	72
Tabela 2 – Caracterização do cimento CP II Z 32.....	88
Tabela 3 – Composição granulométrica do agregado miúdo	89
Tabela 4 – Índices de caracterização da areia natural média.....	90
Tabela 5 – Composição granulométrica do agregado graúdo.....	91
Tabela 6 – Índices de caracterização do agregado graúdo.....	92
Tabela 7 – Características geométricas e mecânicas das barras de aço.....	92
Tabela 8 – Módulo de elasticidade obtido a partir do ensaio de tração das taliscas instrumentadas com extensômetros elétricos	94
Tabela 9 – Valores médios das Forças de Ruptura à Tração (em kgf).....	95
Tabela 10 – Valores médios das Tensões de Ruptura à Tração (em MPa)	95
Tabela 11 – Propriedades mecânicas do concreto utilizado na elaboração das vigas aos 7 e 28 dias.	99
Tabela 12 – Propriedades mecânicas do concreto utilizado na elaboração das vigas aos 360 dias	100
Tabela 13 – Principais parâmetros obtidos no ensaio de flexão das vigas em relação aos Estados Limites Último, de Serviço (quando a flecha atinge o valor de 6 mm) e para a flecha máxima medida igual a 8 mm.....	105
Tabela 14 – Principais parâmetros obtidos no ensaio de flexão das vigas em relação ao momento e a flecha do momento correspondente à 1ª fissuração	106
Tabela 15 – Dados para o cálculo do Momento Resistente (M_{calc}) das VIGAS REFERÊNCIA.....	117
Tabela 16 – Dados para o cálculo do Momento Resistente (M_{calc}) das VIGAS BAMBU	123
Tabela 17 – Dados para o cálculo do Momento Resistente (M_{calc}) das VIGAS BAMBU REFORÇADO.....	128
Tabela 18 – Dados para o cálculo do deslocamento (f_{calc}) das VIGAS REFERÊNCIA, em relação ao Estado Limite de Serviço (6 mm).....	138
Tabela 19 – Dados para o cálculo do deslocamento (f_{calc}) das VIGAS REFERÊNCIA, em relação à flecha máxima medida (8 mm)	139
Tabela 20 – Dados para o cálculo do deslocamento (f_{calc}) das VIGAS BAMBU, em relação ao Estado Limite de Serviço (6 mm).....	140
Tabela 21 – Dados para o cálculo do deslocamento (f_{calc}) das VIGAS BAMBU, em relação à flecha máxima medida (8 mm)	141

Tabela 22 – Dados para o cálculo do deslocamento (f_{calc}) das VIGAS BAMBU REFORÇADO, em relação ao Estado Limite de Serviço (6 mm)	143
Tabela 23 – Dados para o cálculo do deslocamento (f_{calc}) das VIGAS BAMBU REFORÇADO, em relação à flecha máxima medida (8 mm)	144

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS	23
1.2	JUSTIFICATIVA	24
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1	BAMBU NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	26
2.2	APLICAÇÃO DO BAMBU EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS	36
2.3	ABSORÇÃO DE ÁGUA	45
2.4	ENSAIOS DE ADERÊNCIA	47
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	52
3.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	53
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	54
3.2.1	Cimento	54
3.2.2	Agregado Miúdo.....	54
3.2.3	Agregado Graúdo.....	55
3.2.4	Água.....	55
3.2.5	Armaduras	55
3.2.6	Taliscas de Bambu.....	56
3.2.7	Resina Poliuretana Bicomponente à Base de Óleo de Mamona.....	58
3.2.8	Resina Epóxi	58
3.2.9	Látex	59
3.3	MÉTODOS	59
3.3.1	Coleta do Látex e dos Colmos de Bambu	59
3.3.2	Corte dos colmos para confecção de taliscas.....	60
3.3.3	Confecção dos corpos de prova usados no ensaio de tração	62
3.3.4	Confecção das taliscas usadas no Ensaio de Arrancamento.....	65
3.3.5	Confecção das taliscas usadas como reforço adicional nas vigas de concreto	69
3.3.6	Dosagem do concreto.....	70

3.3.7	Elaboração dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Arrancamento ..	73
3.3.7.1	<i>Descrição do Ensaio de Arrancamento ..</i>	74
3.3.8	Elaboração das Vigas ..	79
3.3.8.1	<i>Fôrmas de Madeira ..</i>	79
3.3.8.2	<i>Montagem das Armaduras ..</i>	80
3.3.8.3	<i>Concretagem das Vigas ..</i>	83
3.3.8.4	<i>Descrição do Ensaio de Flexão ..</i>	85
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS ..	88
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO ..	88
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO ..	89
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO ..	90
4.4	CARACTERIZAÇÃO DAS ARMADURAS ..	92
4.5	CARACTERIZAÇÃO DAS TALISCAS DE BAMBU ..	93
4.6	ENSAIO DE TRAÇÃO: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA RESINA À BASE DE ÓLEO DE MAMONA ..	95
4.7	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO ..	98
4.8	RESULTADOS DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO ..	100
4.9	RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO DAS VIGAS ..	104
4.10	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MOMENTOS FLETORES RESISTENTES CALCULADO E EXPERIMENTAL ..	117
4.10.1	Vigas Referência ..	117
4.10.2	Vigas Bambu ..	122
4.10.3	Vigas Bambu Reforçado ..	127
4.10.4	Comparação entre os valores obtidos ..	132
4.11	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS DESLOCAMENTOS EXPERIMENTAIS E OS CALCULADOS ..	134
4.11.1	Modelo de Branson ..	134
4.11.1.1	<i>Vigas Referência ..</i>	137
4.11.1.2	<i>Vigas Bambu ..</i>	139

4.11.1.3 Vigas Bambu Reforçado	142
4.11.2 Comparação entre os valores obtidos	145
4.12 ANÁLISE DO PADRÃO DE FISSURAÇÃO DAS VIGAS	147
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	151
6. PESQUISAS FUTURAS	153
REFERÊNCIAS	154
ANEXOS	159

1. INTRODUÇÃO

Em função da preocupação com a exploração desenfreada de recursos naturais não renováveis que podem vir a se esgotar, e com a geração e a correta destinação de resíduos decorrentes do crescimento de diversos setores da economia, sobretudo da construção civil, a busca por novos materiais se faz cada vez mais necessária.

O bambu tem sido uma alternativa para minimizar, em parte, esse uso abusivo de materiais não renováveis. Segundo Jaramillo (1992), citado por Pereira e Beraldo (2008), o bambu é um recurso natural que se renova em menor intervalo de tempo, não havendo nenhuma outra espécie florestal que possa competir com ele em velocidade de crescimento e de aproveitamento por área.

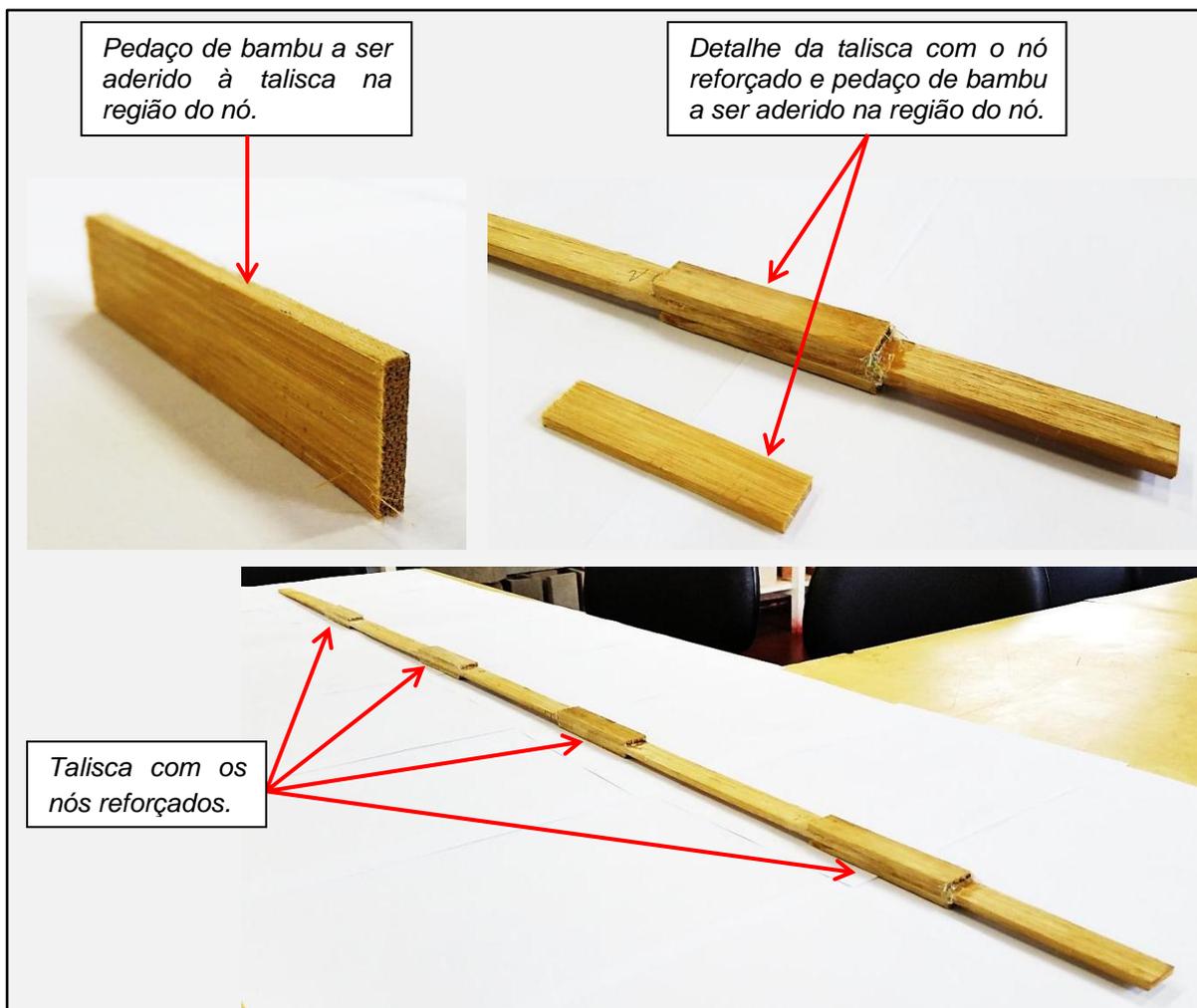
Ainda como vantagens, de acordo com Pereira e Beraldo (2008), o bambu é uma planta tropical, perene e renovável, que produz colmos anualmente sem a necessidade de replantio, apresenta excelentes características físicas, químicas e mecânicas, além de ser um eficiente sequestrador de carbono. No entanto, segundo os autores, o bambu ainda é pouco utilizado no país, quer seja pelo desconhecimento de suas espécies, características e aplicações, quer seja devido à falta de normalização e pesquisas específicas.

Conforme Ghavami (2005), por se tratar de um material orgânico e higroscópico, o bambu em contato com o concreto fresco, absorve água e, conseqüentemente, tem suas dimensões aumentadas. Quando o concreto já está endurecido, ocorre o processo inverso e o bambu perde a água absorvida, o que leva a uma redução de seu volume, gerando vazios que vão diminuir a eficiência da aderência entre os materiais mencionados. Deste modo, uma alternativa é revestir o bambu com látex de seringueira, que atua como um impermeabilizante. A qualidade da aderência entre o bambu e o concreto deve ser estudada, a fim de que o desempenho do bambu, utilizado como um elemento de reforço em vigas de concreto armado, não seja comprometido.

Outro fato a ser destacado, é que o bambu, na região dos nós, apresenta uma resistência à tração bem menor se comparada à da região fora deles. Pereira e Beraldo (2008), verificaram, por meio de ensaio de tração de ripas laminadas de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*, que a resistência média à tração de ripas com nó e sem nó foi igual a 111,9 MPa e 245,4 MPa, respectivamente. Mesquita et al. (2006), também apresentaram que a resistência à tração do bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* é igual a 97 MPa para a região nodal e igual a 277 MPa para a região internodal. Nesse sentido, espera-se que o bambu da espécie *Bambusa vulgaris* apresente um comportamento similar.

Uma alternativa para minimizar esta desvantagem seria a utilização de um reforço na região nodal. Deste modo, serão utilizados, como reforço, segmentos cortados de outras taliscas e colados com uma resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona na região dos nós, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Exemplo do esquema a ser usado para reforçar uma talisca na região dos nós



Fonte: Própria autora

1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo do trabalho foi o de se avaliar o comportamento estrutural de vigas de concreto armado, sem e com reforço adicional de taliscas de bambu, por meio de ensaios de flexão. As taliscas de bambu utilizadas como reforço adicional à armadura são de dois tipos: com e sem reforços nas regiões nodais.

Com o intuito de analisar a condição de aderência entre a talisca de bambu e o concreto, foram realizados ensaios de arracamento.

As taliscas foram elaboradas a partir de colmos da espécie *Bambusa vulgaris*, disponível na cidade de Ilha Solteira, tendo sido algumas reforçadas nos nós e outras utilizadas sem reforços nas regiões nodais. Quando em contato com o concreto, todas as taliscas foram impermeabilizadas com látex de seringueira. O látex é uma borracha de origem natural, sendo, deste modo, um produto ecologicamente sustentável, assim como a cola utilizada nos reforços, que é uma resina à base de óleo de mamona. A fim de se avaliar a resistência das taliscas, as mesmas foram submetidas ao ensaio de tração.

1.2 JUSTIFICATIVA

Afinal, que outra planta se desenvolve da brotação à fase adulta em tão poucos meses? Que outra planta, com seus aproximadamente 50 gêneros e 1300 espécies, protege tão bem o solo, sequestra tão eficientemente o carbono e fornece alimento e matéria-prima de boa qualidade para tantos e tamanhos fins? Que outro recurso natural se renova tão rapidamente em termos de velocidade de crescimento e aproveitamento por área? (FREIRE, 2007, p. 20-21).

Segundo Farrelly (1984), o bambu é uma planta que cresce mais rapidamente do que qualquer outra planta do planeta, necessitando, em média, somente de 3 a 6 meses para atingir sua altura máxima, além de apresentar grande vitalidade, versatilidade, beleza, leveza, resistência e facilidade em ser trabalhado.

Sendo assim, são evidentes os vários fatores que tornam o bambu um vegetal de grande potencial, sobretudo, o fato do mesmo ser um material renovável e de baixo custo.

Além do mais, atualmente, o consumo excessivo dos materiais utilizados nas construções vem chamando a atenção para o possível esgotamento de algumas reservas naturais, o que torna de fundamental importância à busca por materiais alternativos e renováveis para serem utilizados na construção

civil. A aplicação desses materiais, como o bambu, é uma alternativa capaz de atenuar, em parte, esse consumo predatório.

Portanto, a presente pesquisa consistiu em avaliar o comportamento estrutural de taliscas confeccionadas a partir de colmos de bambu da espécie *Bambusa vulgaris* visando à aplicação do bambu como um elemento de reforço em vigas de concreto armado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

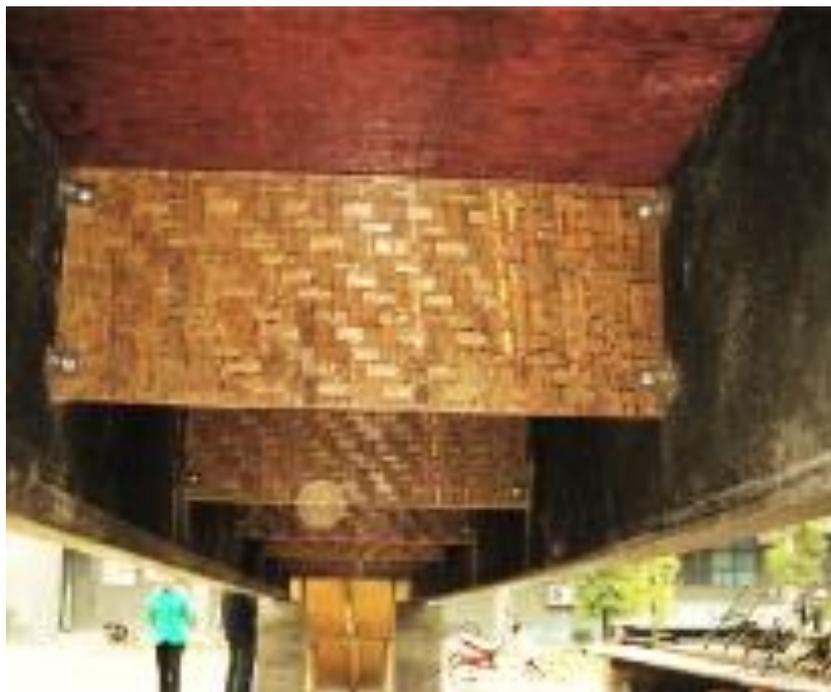
2.1 BAMBU NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O bambu tem emergido como uma alternativa diante da busca cada vez mais necessária por materiais renováveis, não só pelo fato de ser considerado um vegetal perene e renovável, de crescimento rápido, mas também por ser um material que requer baixa quantidade de energia para ser obtido, de baixo custo, além de possuir excelentes características físicas, químicas e mecânicas, o que o torna um material viável e de grande potencial para ser utilizado na construção civil. De acordo com Lugt, Dobbelsteen e Janssen (2005), sob o ponto de vista ambiental e financeiro, o bambu é um material competitivo em relação aos demais materiais utilizados na construção civil. No que diz respeito a obras civis temporárias, classifica-se o bambu como um material sustentável, principalmente pelo fato dessas obras não necessitarem de uma vida útil mais longa.

Seixas, Ripper e Ghavami (2014), destacam a existência de um projeto denominado “The Dragon”, que vai ao encontro de demandas sociais relacionadas a construções efêmeras destinadas a abrigar exposições e eventos. Trata-se da construção de coberturas curvas com dupla curvatura, utilizando-se o bambu como elemento estrutural. Esta tecnologia de construção, segundo os autores, gera pouco desperdício, baixo nível de ruído, pequeno consumo de energia e pequeno impacto ambiental.

Como aplicação do bambu na construção civil, os autores Xiao, Zhou e Shan (2010), obtiveram resultados satisfatórios ao ensaiar uma ponte com vigas de suporte elaboradas com bambu e com um polímero de fibra de carbono, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Viga de suporte feita de bambu em ponte



Fonte: Xiao, Zhou e Shan (2010)

A catedral Alternativa Nuestra Señora de La Pobreza, projetada pelo arquiteto Simón Vélez, localizada na Colômbia, foi totalmente construída com bambu, inclusive seus ornamentos (Figura 3).

Figura 3 – Catedral Alternativa Nuestra Señora de La Pobreza, Colômbia



Fonte: <<http://www.ecoeficientes.com.br/new/wp-content/uploads/2013/10/simon-velez-bambu-sustentavel-05.jpg>>

O arquiteto Simón Vélez também projetou um pavilhão de 2.000 m² para a Fundação ZERI (Zero Emissions Research & Initiatives), para a Expo 2000, em Hannover, na Alemanha. A estrutura de bambu despertou a atenção de milhares de visitantes, tornando-o o pavilhão mais popular da exposição (Figura 4).

Figura 4 – Pavilhão ZERI, Alemanha



Fonte: <<http://www.ecoeficientes.com.br/new/wp-content/uploads/2013/10/simon-velez-bambu-sustentavel-02.jpg>>

A arquitetura do Aeroporto Internacional de Barajas em Madri, na Espanha, que possui uma cobertura de bambu de aproximadamente 200.000 m², evidencia-se pela simplicidade, adaptabilidade e flexibilidade. O conceito do projeto foi o de transmitir, aos passageiros, sensações de tranquilidade, calma e leveza (Figura 5).

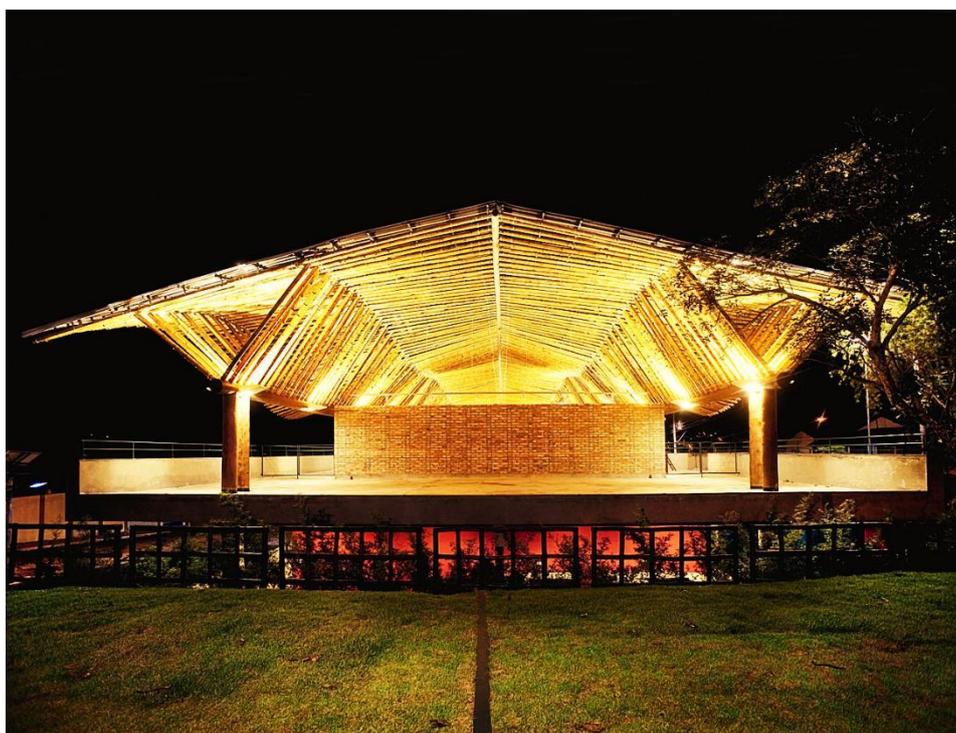
Figura 5 – Cobertura de bambu do Aeroporto Internacional de Barajas



Fonte: <http://saisconsultoria.files.wordpress.com/2010/02/richardrogers_barajas.jpg>

No Brasil, destaca-se uma cobertura feita de bambu que possui uma área de 800 m² (Figura 6). A orientação do projeto do Centro de Cultura Max Feffer, em Pardinhos – SP, foi feita pela arquiteta Leiko Motomura.

Figura 6 – Cobertura de bambu do Centro Max Feffer, em Pardinhos (SP)



Fonte: <https://arcowebarquivos.s3.amazonaws.com/imagens/41/84/arq_24184.jpg>

Outro exemplo de cobertura com bambu no Brasil é o galpão-oficina do assentamento rural Horto de Aimorés, localizado na cidade de Pederneiras – SP (Figura 7). De acordo com os autores Pereira et al. (2012), o projeto e o processo de produção do galpão-oficina são frutos de quase dois anos de cooperação entre a Associação de Agricultores Viverde, a Universidade Estadual Paulista e a Unisol. O sistema é composto de pilares de aroeira roliça, com estrutura de cobertura formada por pórticos de bambu *in natura* e conexões metálicas.

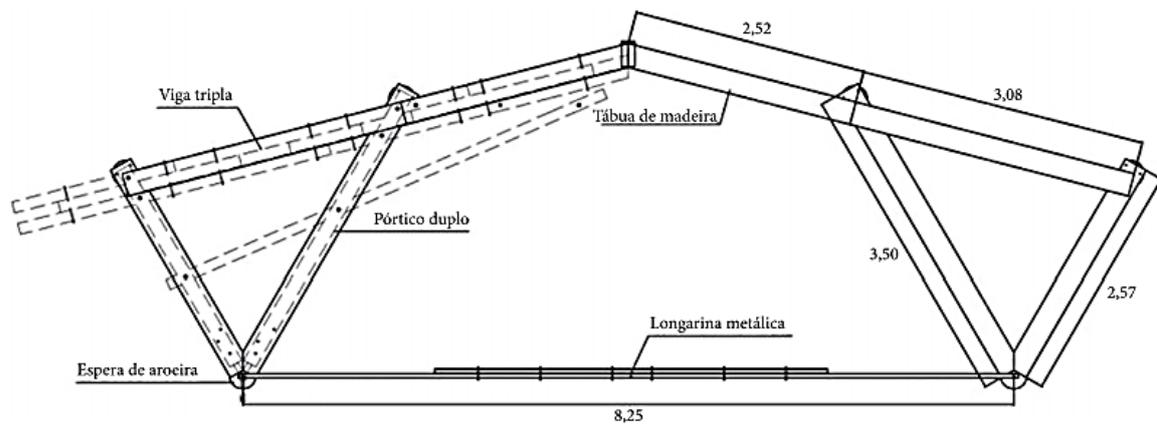
Figura 7 – Perspectiva da estrutura do galpão-oficina do assentamento rural Horto de Aimorés



Fonte: Pereira et al. (2012)

Os pórticos possuem um vão entre apoios de 8,25 m de distância e são fixados nas partes superiores dos pilares de aroeira. A estrutura de cobertura é composta de nove pórticos montados a partir de dois componentes pré-fabricados principais: as vigas triplas e os pilares duplos inclinados, conforme a Figura 8.

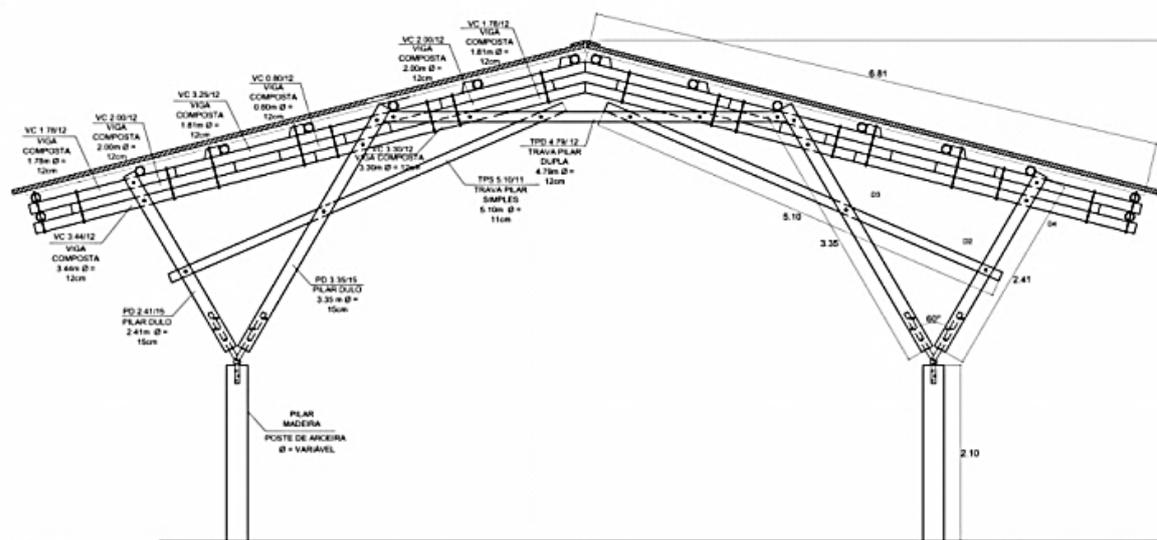
Figura 8 – Projeto dos pórticos



Fonte: Pereira et al. (2012)

Pereira et al. (2012) apresentam um corte transversal da estrutura com a indicação dos componentes e peças (Figura 9).

Figura 9 – Componentes e peças usadas na cobertura



Fonte: Pereira et al. (2012)

Azambuja et al. (2012) apresentam uma visão geral da estrutura do galpão, conforme a Figura 10, que mostra a operação de içamento do pórtico da cobertura de bambu.

Figura 10 – Içamento do pórtico do galpão com cobertura em bambu



Fonte: Azambuja et al. (2012)

Com base nas propriedades mecânicas da espécie *Dendrocalamus giganteus*, Javaroni et al. (2012) dimensionaram e detalharam as ligações das barras do pórtico da cobertura e das terças, bem como a estrutura do telhado de duas águas. As ligações entre os elementos estruturais foram executadas com chapas metálicas, parafusos e preenchimento parcial dos colmos com graute (Figura 11).

Figura 11– Detalhe da ligação dos colmos de bambu com o pilar de madeira roliça, por meio de chapas metálicas



Fonte: Javaroni et al. (2012)

As Figuras 12 e 13 apresentam, respectivamente, os ensaios de tração e de compressão em peças de tamanho real que foram realizados para avaliar a

suas respectivas resistências, devido à inexistência de uma normalização referente ao uso desses materiais.

Figura 12 – Ensaio de tração



(a) Preparação do ensaio



(b) Ruptura

Fonte: Javaroni et al. (2012)

Figura 13 – Ensaio de compressão



(a) Início da aplicação da força



(b) Ruptura

Fonte: Javaroni et al. (2012)

Devido à sua flexibilidade e resistência, o bambu é comumente usado na construção de arcos e abóbodas. Como exemplo, tem-se um monumento símbolo da arquitetura indiana, o Taj Mahal, no qual uma estrutura de bambu foi usada para a construção de sua cúpula, tendo sido recentemente substituída por uma estrutura metálica (Figura 14).

Figura 14 – Taj Mahal, localizado na Índia



Fonte: <http://studioplanoverde.com.br/site/wp-content/uploads/2013/11/Taj_Mahal.jpg>

No Brasil, um exemplo de cúpula estruturada com o material bambu localiza-se no Centro de Referência do Bambu e das Tecnologias Sociais (CERBAMBU RAVENA) situado no município de Sabará – MG, distrito de Ravena (Figura 15). O CERBAMBU RAVENA foi criado e desenvolvido com o intuito de popularizar o uso do bambu, e, por meio dessa nova metodologia, gerar trabalho e renda para as populações carentes.

Figura 15 – Centro de Referência do Bambu e das Tecnologias Sociais (CERBAMBU RAVENA), localizado em Sabará (MG)



Fonte: <<http://www.ecoeficientes.com.br/new/wp-content/uploads/2014/01/lucio-ventania-bambucrus.jpg>>

A arquitetura obtida com a utilização de estruturas no formato de bolhas de sabão é esteticamente agradável, e, nesse tipo de estrutura, obtém-se uma área superficial mínima na qual as solicitações são iguais em todos os pontos da estrutura, ou seja, não há concentração de tensão. Melo, Ripper e Moreira (2014) apresentam uma aplicação desse método à construção da cobertura do Laboratório de Investigação em Livre Desenho (LILD), do Departamento de Artes e Design, da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC – RJ), utilizando-se o bambu em sua estrutura, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Dispositivo usado para a obtenção da geometria do filme tensionado e estrutura da cobertura feita com colmos de bambu



Fonte: Melo, Ripper e Moreira (2014)

Segundo os autores, as superfícies mínimas descritas pelos filmes de sabão possibilitam uma redução do gasto energético e da quantidade de material usada, além de serem interessantes sob o ponto de vista construtivo.

2.2 APLICAÇÃO DO BAMBU EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS

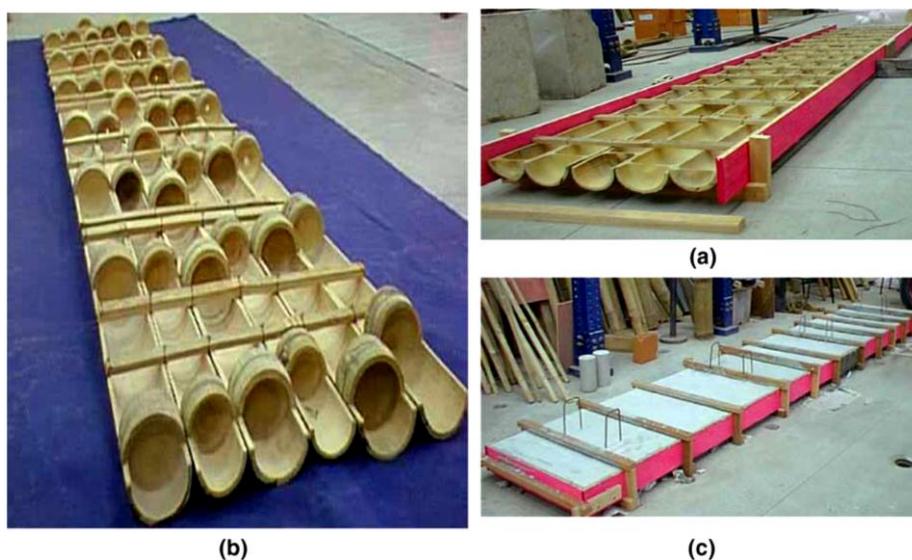
É sabido que o bambu tem sido estudado e pesquisado para ser utilizado como um elemento de reforço do concreto, de modo a se buscar uma alternativa à armadura de aço, tradicionalmente utilizada na construção civil, tendo em vista a necessidade de se aplicar materiais renováveis e alternativos a esse setor que cresce cada vez mais a cada dia. Vale lembrar que, Ghavami (2005) estuda, desde 1979, o material bambu para ser utilizado como fôrmas de pilares e de lajes, bem como para ser um elemento de reforço em pilares, lajes e vigas.

A porcentagem ideal de “armadura” de bambu depende, segundo Raj (1991), citado por Ferreira (2007), do tipo de estrutura, da distribuição do carregamento, da carga última dimensionada e de aspectos econômicos relacionados à obtenção dos materiais. O autor afirma que a porcentagem ideal está entre 1,25% e 8,33%.

Devido principalmente às características orgânicas e higroscópicas do bambu e à sua superfície lisa, Ghavami (2005) considera que tais características limitam a aderência entre os materiais e, conseqüentemente, a sua aplicação. Todavia, Ghavami (1995) afirma que o bambu é um material que possui propriedades mecânicas adequadas para ser utilizado em elementos estruturais de concreto armado.

Visando o estudo da durabilidade de materiais orgânicos, Lima Júnior et al. (2008) realizaram um ensaio do bambu como reforço do concreto avaliando se haveria mudança do módulo de elasticidade e da resistência quando mergulhados em água. Foi possível concluir, a partir dos resultados obtidos, que o bambu não sofreu alterações significativas, o que atesta sua durabilidade.

Figura 18 – Laje mista



(a) Laje com metade do diafragma; (b) Laje com diafragma inteiro; (c) Laje preenchida com concreto

Fonte: Ghavami (2005)

Lima Júnior et al. (1996b), também em um estudo a respeito do comportamento do bambu utilizado como elemento de reforço em lajes, elaboraram 4 faixas de lajes de concreto reforçadas com bambu, que por sua vez, também lhe serviu de fôrma permanente. Para tanto, foram utilizados dois tipos de concreto: concreto convencional (agregado granítico) e concreto alternativo (agregado laterítico). Como também, duas espécies de bambu: *Dendrocalamus giganteus* e *Bambusa vulgaris*.

As lajes apresentavam um vão livre de 3 m e uma espessura total de 12 cm. Para a elaboração das mesmas, os colmos de bambu foram cortados longitudinalmente e, em seguida, foram impermeabilizados com asfalto nas faces internas que estariam em contato com o concreto. Posteriormente, com o intuito de deixar a superfície impermeabilizada mais rugosa, aplicou-se, na mesma, areia grossa. Os colmos de bambu foram posicionados longitudinalmente, um ao lado do outro, e, como armadura de distribuição, foram utilizadas tiras de bambu com cerca de 2 cm de largura, arramadas com arame recozido transversalmente aos colmos. Destaca-se que, os diafragmas existentes na região dos nós funcionaram como conectores. Por fim, de modo a obter uma contenção lateral e a realizar a concretagem, foram colocadas tábuas nas extremidades do extrato.

De acordo com os autores, as lajes em fôrma permanente de bambu são de fácil execução e exigem escoramento reduzido. Entretanto, é necessário que se disponha de colmos retos, sendo excelente para tal a espécie *Dendrocalamus giganteus*. Em serviço, as tensões e deformações específicas no concreto e no bambu foram aceitáveis, e houve uma grande margem de segurança entre as cargas de serviço e as que efetivamente provocaram a ruptura da peça. Foi possível verificar, ainda, segundo Lima Júnior et al. (1996b), que em todas as lajes a ruína iniciou-se por uma fissura inclinada perto do ponto de aplicação da carga, e, que o colapso deu-se com a laje apresentando grandes flechas, fato esse que previne a sua iminência.

Agarwal, Nanda e Maity (2014), elaboraram 24 pilares com dimensões de 150 mm x 150 mm x 1000 mm que foram submetidos ao ensaio de compressão axial (Figura 19). Dos 24 pilares, foram feitos:

- 3 pilares de concreto sem reforço;
- 3 pilares com reforço de 0,89% de aço;
- 3 pilares com reforço de 3% de bambu tratado;
- 3 pilares com reforço de 5% de bambu tratado;
- 3 pilares com reforço de 8% de bambu tratado;
- 3 pilares com reforço de 3% de bambu não tratado;
- 3 pilares com reforço de 5% de bambu não tratado;
- 3 pilares com reforço de 8% de bambu não tratado.

Para o tratamento dos bambus, os mesmos foram imersos em água por 24 horas, em seguida foram revestidos com uma camada de cal e deixados 30 dias para secar. Posteriormente, foi aplicado Sikadur 32 Gel[®] e uma camada de areia. Observou-se com o ensaio de compressão axial que a amostra com 8% de reforço de bambu tratado teve um resultado mais comparável com o da amostra reforçada com aço.

Figura 19 – Pilar sendo ensaiado



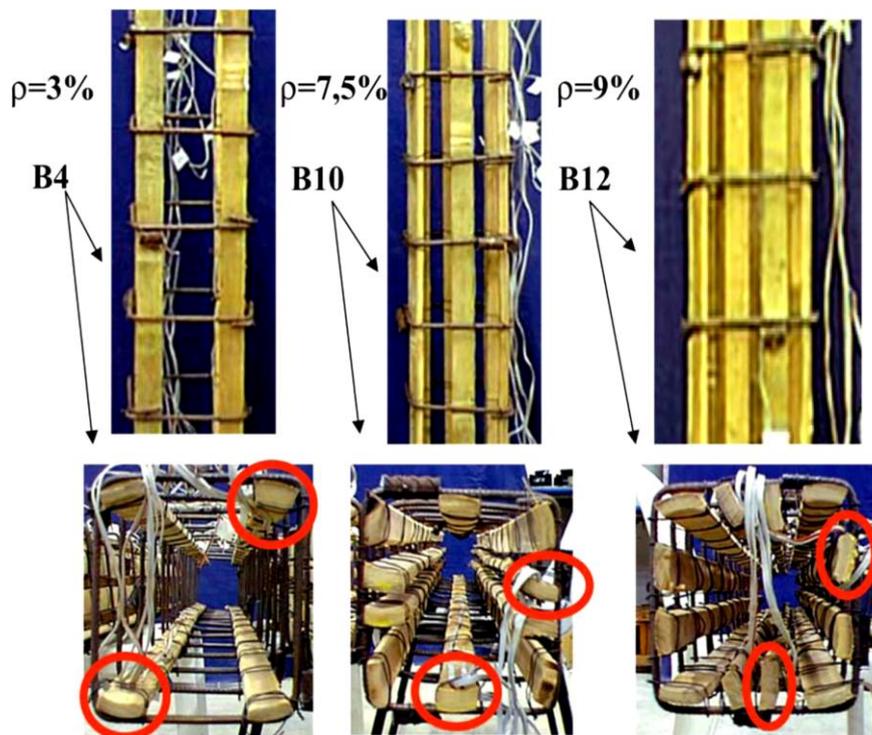
Fonte: Agarwal, Nanda e Maity (2014)

Posteriormente, foram feitos mais 15 pilares: 3 sem reforço, 3 com reforço de 0,89% aço e 9 com reforço de bambu tratado (sendo 3 pilares para cada porcentagem de reforço, de 3%, 5% e 8%, respectivamente). Esses pilares foram submetidos a carregamentos transversais e os autores puderam notar que as amostras com 8% de reforço tiveram um resultado bem próximo das reforçadas com aço. Também se constatou que, os pilares reforçados puderam aguentar em média 26% a mais de carga do que os pilares sem reforço algum.

Outro exemplo de estudo acerca do comportamento do bambu em pilares é a pesquisa feita por Ghavami (2005), que realizou o tratamento do bambu com Sikadur 32 Gel[®] visando à sua impermeabilização e o consequente aumento da aderência entre o concreto e o bambu. Após o tratamento, o autor elaborou pilares reforçados com bambu com taxas de reforço que variaram em

3%, 7.5% e 9% em relação à seção transversal do concreto, conforme mostra a Figura 20.

Figura 20 – Detalhes dos pilares reforçados com bambu



Fonte: Ghavami (2005)

Ghavami (2005), após os resultados obtidos, verificou que a melhor proporção de reforço com bambu foi a de 3%.

Com o intuito de utilizar mão-de-obra e materiais presentes em uma determinada região, para que, futuramente fosse possível a construção de habitações de baixo custo em locais sem recursos financeiros, Moroz, Lissel e Hagel (2014) analisaram o uso do bambu como sendo um elemento de reforço em paredes de alvenaria estrutural a fim de estudar a substituição do aço pelo bambu. No que diz respeito às paredes de alvenaria reforçadas com armadura, os resultados experimentais mostraram que o desempenho das paredes com bambu foi aproximadamente igual ao das paredes com armadura de aço. Além do mais, em comparação às paredes sem reforço, a inserção do bambu aumentou a resistência e a ductilidade. Moroz, Lissel e Hagel (2014) afirmam que, em longo prazo, o desempenho do bambu quando inserido em uma matriz cimentícia ainda é desconhecido. No entanto, Ghavami (2005) menciona que,

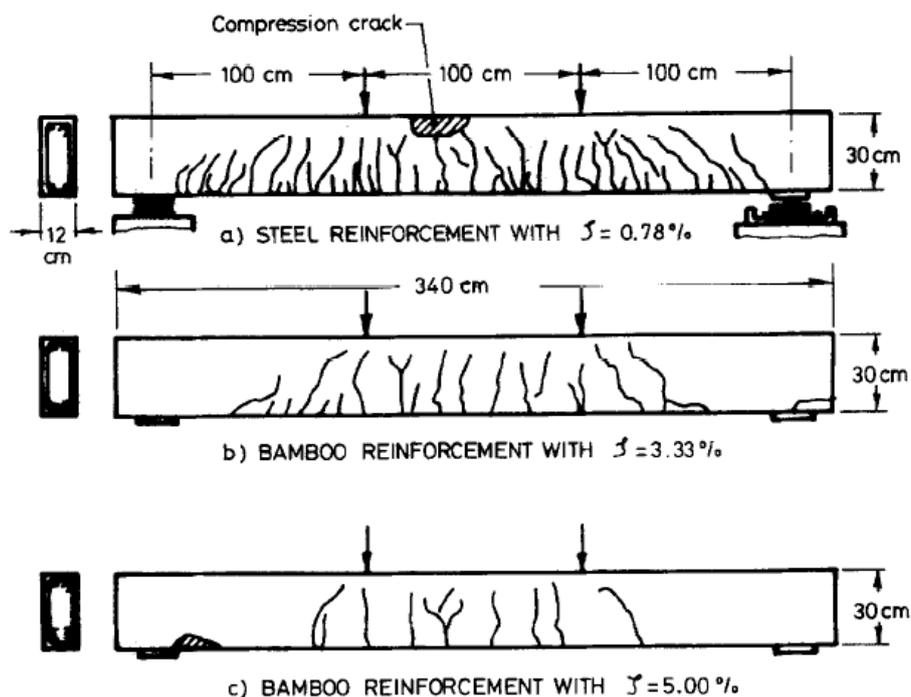
após um período de 15 anos, a capacidade de tração do bambu envolto em concreto apresentou uma perda mínima de resistência.

Em um estudo sobre vigas de concreto armadas longitudinalmente com aço e bambu, Lima Júnior et al. (2005) concluíram que, em consequência do baixo valor do módulo de elasticidade do bambu em relação ao do aço, vigas reforçadas com bambu se deformam mais que as reforçadas com aço. Além disso, é possível a aplicação dos procedimentos usuais de dimensionamento usados para vigas de concreto armado em vigas reforçadas com bambu, pois todas elas obedecem à teoria de Bernoulli-Kirchoff.

Mark e Russell (2011) analisaram vigas de concreto que utilizaram o bambu como elementos de reforço à flexão e ao cisalhamento. Os autores verificaram que os estribos de aço foram mais eficientes no sentido de aumentar a capacidade resistente das vigas.

Ghavami (1995) realizou ensaios de vigas, com e sem armadura de aço, utilizando duas porcentagens de armação de bambu em relação à seção transversal da viga (3.33% e 5%). O autor aplicou superficialmente nas peças de bambu duas camadas de Negrolin[®], colocando areia fina após passar a segunda camada de material impermeabilizante. Esse tratamento do bambu possibilitou o aumento do valor da tensão de aderência entre os materiais. Diante dos resultados obtidos, chegou-se a conclusão de que a quantidade ideal a ser empregada como reforço de vigas é uma taxa de 3% de bambu, em relação à seção transversal de concreto. As vigas reforçadas com bambu suportaram uma carga 400% maior que as vigas sem qualquer armadura. A Figura 21 apresenta as fissuras que apareceram nas vigas ensaiadas.

Figura 21 – Fissuração ocorrida nas vigas ensaiadas



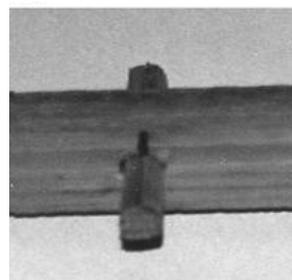
Fonte: Ghavami (1995)

Ao analisar o desempenho estrutural de vigas de concreto, Braga Filho et al. (2010) notaram um aumento do índice de rigidez quando taliscas de bambu cravejadas com pinos de aço e de bambu foram adicionadas como reforço em vigas (Figura 22). Embora o comportamento das ripas com pinos de aço ou de bambu tenham sido semelhantes, os autores recomendam que se deva tomar cuidado com a quantidade e com os diâmetros de pinos, uma vez que há um enfraquecimento da seção transversal na qual os mesmos são inseridos.

Figura 22 – Taliscas de bambu com pinos de aço e de bambu



(a) Pinos de aço



(b) Pinos de bambu

Fonte: Adaptado de Braga Filho et al. (2010)

Ferreira (2002) ensaiou vigas com armaduras de aço, de bambu no estado natural, e de bambu tratado com verniz e envolvido com arame farpado, a fim de melhorar a aderência entre os materiais. Ao analisar os resultados, a autora notou que o bambu apresentou um comportamento estrutural satisfatório quando inserido como reforço estrutural no concreto. Destaca-se que, com o aumento de 8 cm^2 de reforço de bambu, a carga de ruptura quadruplicou.

Agarwal, Nanda e Maity (2014) confeccionaram 12 vigas com dimensões de $75 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$: três delas não foram reforçadas; três delas foram reforçadas com aço (2 barras de 8 mm); outras três, com bambu tratado; e as últimas três, com bambu sem tratamento. A porcentagem de reforço das amostras com bambu foi de $1,49\%$. O tratamento do bambu consistiu na sua imersão em água por 24 horas; em seguida, foi feita a aplicação de uma camada de cal e deixado para secar durante 30 dias. Após esse período, foi feita uma aplicação de Sikadur 32 Gel[®] e de uma camada de areia. As vigas foram submetidas a dois pontos de cargas pontuais, conforme apresenta a Figura 23. Os resultados dos ensaios de flexão mostraram que as vigas reforçadas com bambu tratado obtiveram um aumento significativo na força de ruptura, sendo comparável ao do aço. De maneira quantitativa, com um reforço de bambu tratado de apenas $1,5\%$ ocorreu um aumento de 29% na capacidade resistente. Entretanto, as vigas sem tratamento apresentaram resultados piores do que as vigas sem reforço.

Figura 23 – Viga sendo ensaiada



Fonte: Agarwal, Nanda e Maity (2014)

2.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Ghavami (2005) afirma que o bambu em contato com o concreto fresco, absorve água, e conseqüentemente tem suas dimensões aumentadas. Quando o concreto já está endurecido, ocorre o processo inverso e o bambu perde a água absorvida, o que leva a uma redução de seu volume, gerando vazios que vão diminuir a eficiência da aderência entre o concreto e o bambu.

Em um ensaio de variação dimensional Ferreira (2002) constatou que, devido à absorção de água, o bambu sem tratamento aumentou o seu volume em 15%.

Em ensaios de absorção, com bambu revestido superficialmente de uma camada de Negrolin®, Ghavami (1995) verificou que o bambu tratado apresentou somente um teor de 4% de absorção de água após ter ficado submerso durante 96 horas em água potável.

Kushwara e Kumar (2009) trataram o bambu com um composto de epóxi e observaram uma redução do teor de absorção de água de 41% para 26%.

Realizando testes com vários impermeabilizantes, Raj (1991), citado por Ferreira (2007), verificou que o bambu tratado com um material betuminoso apresentou um teor de absorção de água de apenas 9%, enquanto que o bambu sem o tratamento apresentou um teor de 45%. Para minimizar o inchamento e a posterior retração do bambu, o autor recomenda que a umidade das taliscas esteja entre 12% e 20%, e também ressalta que a espessura da camada do impermeabilizante não pode ultrapassar o valor de 10 mm.

Rippel (2005) menciona que, genericamente, o látex é uma dispersão coloidal constituída de substâncias “não-borracha” e partículas de borracha dispersas em uma fase aquosa denominada “soro”. Ainda segundo o autor, látices de borracha natural ocorrem em cerca de 200 espécies de plantas, sendo que a *Hevea brasiliensis* fornece aproximadamente 99% da produção mundial. Portanto, o látex é um material natural encontrado em minúsculos vasos presentes no córtex interno da casca de determinadas árvores.

Moraes e Melges (2012) realizaram um ensaio de absorção de água pelo bambu, no Laboratório do Departamento de Física e Química (DFQ) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus de Ilha Solteira, com o intuito de verificar a eficiência da impermeabilização do látex natural quando aplicado ao bambu. O látex utilizado foi coletado de seringueiras localizadas na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), da Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus de Ilha Solteira, conforme apresenta a Figura 24.

Figura 24 – Seringueiras localizadas na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), da UNESP – Campus de Ilha Solteira



(a) Seringueiras



(b) Coleta do látex

Fonte: Luiz Henrique Aquino de Marchi

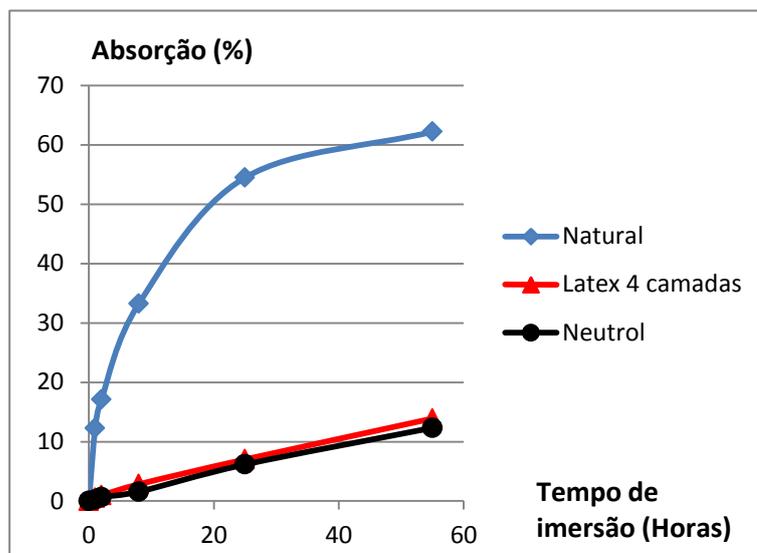
Os autores confeccionaram corpos de prova de bambu com dimensões de 3 cm x 2 cm x 1 cm. Foram utilizadas 3 amostras de cada tipo: sem impermeabilizante (referência), com quatro camadas de látex e com três camadas de Neutrol[®]. Os corpos de prova foram mergulhados em água destilada por 1, 2, 8, 25 e 55 horas (Figura 25). A comparação dos teores de água absorvida pelos corpos de prova sem tratamento, pelos submetidos a quatro camadas de látex e pelos submetidos a três camadas de Neutrol[®] é apresentada na Figura 26. Com os dados obtidos, é possível notar que a aplicação de quatro camadas de látex apresenta eficiência semelhante à aplicação de três camadas de Neutrol[®]. Sendo assim, Moraes e Melges (2012) concluíram que o látex apresenta potencial para impermeabilizar o bambu.

Figura 25 – Ensaio de absorção



Fonte: Moraes e Melges (2012)

Figura 26 – Comparação do teor de absorção de água



Fonte: Moraes e Melges (2012)

2.4 ENSAIOS DE ADERÊNCIA

Lima Júnior et al. (1996a) avaliaram a aderência bambu-concreto por meio de ensaios de empuxamento. Foram ensaiados 43 corpos de prova submetidos a diferentes tratamentos impermeabilizantes. Os autores concluíram que produtos derivados de petróleo, como asfalto e negrolin, parecem ser desaconselháveis para regiões sujeitas a altas temperaturas, onde esses materiais não se solidificam de maneira adequada. Além disso, a fretagem de taliscas com arame não surtiu o efeito esperado em função do deslizamento da talisca.

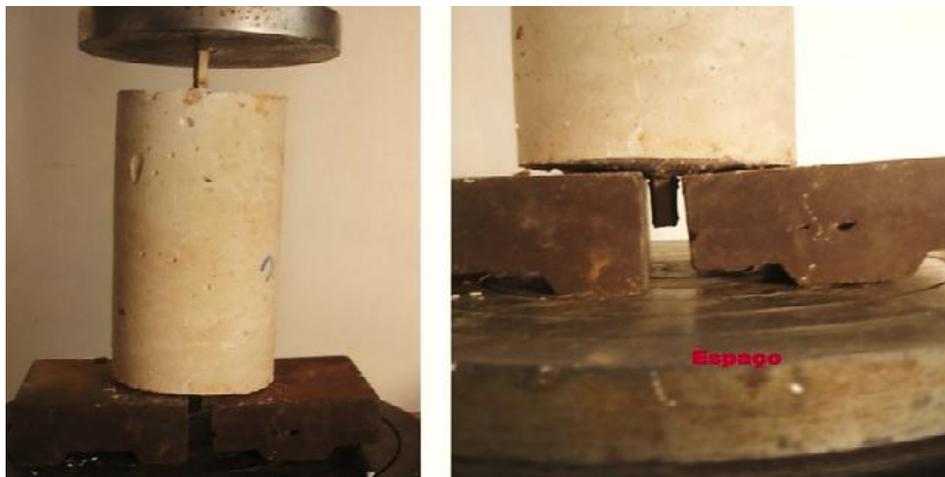
Por meio de ensaios de arrancamento com taliscas de bambu imersas em corpos de prova de concreto, Salgado (2000), citado por Lopes et al. (2002), avaliou diversos tipos de tratamento superficial do bambu utilizando: taliscas sem tratamento, taliscas com alcatrão e areia, taliscas envolvidas com arame farpado, taliscas com grampos de cerca e taliscas com ranhuras na casca. Todos os tratamentos aplicados são econômicos e fáceis de serem realizados, porém, segundo o autor, o tratamento de melhor desempenho foi o com alcatrão e areia.

Segundo Ghavami (2005), o tratamento do bambu é prejudicado, principalmente, devido à superfície do bambu ser irregular uma vez que esse fato diminui o desempenho da substância em relação à sua capacidade em repelir água. O autor ressalta, como tratamento, o uso de Negrolin[®] e Sikadur 32 Gel[®] para aumentar as forças de ligação.

É importante salientar que, Pereira e Beraldo (2008), afirmam que se o recobrimento de impermeabilizante for excessivo, pode-se formar uma região de baixa aderência entre o bambu e o concreto. Além disso, os autores também indicam o uso de areia grossa para aumentar a rugosidade e, conseqüentemente, a aderência.

Com o intuito de se estudar a possibilidade de melhoramento do desempenho de um compósito composto por gesso e por taliscas de bambu Silva, Barbosa e Oliveira (2012) realizaram ensaios de empuxamento para avaliar a aderência entre os materiais, conforme mostra a Figura 27.

Figura 27 – Ensaios de arrancamento



Fonte: Silva, Barbosa e Oliveira (2012)

Com os resultados obtidos, os autores concluíram que é possível aumentar as tensões de aderência entre taliscas de bambu e o gesso, de modo que o bambu se torne viável para ser utilizado como um reforço em elementos construtivos de gesso submetidos à flexão, tais como o caso de vigas em construções rurais. Silva, Barbosa e Oliveria (2012) mencionam, ainda, que um tratamento que reduz a absorção de água não implica, necessariamente, na

melhoria da aderência. Como exemplo, os autores relatam que o tratamento à base de piche diminuiu a absorção de água mas permitiu o deslizamento das taliscas; já o tratamento com epóxi e areia mostrou-se eficaz, promovendo uma aderência adequada entre a talisca de bambu e o gesso.

Por meio de ensaios de empuxamento e de arrancamento, Lopes et al. (2002) avaliaram a aderência desenvolvida entre matrizes de solo-cimento e taliscas de bambu. Os autores utilizaram amostras sem qualquer tratamento e amostras com tratamento de material impermeabilizante à base de Neutrol 45[®] e areia. Na análise comparativa dos ensaios realizados, foi possível verificar que o empuxamento das taliscas obteve maiores valores de tensão de aderência que o ensaio de arrancamento (Figura 28). Em relação ao tratamento do bambu, o resultado foi negativo, tendo em vista que o bambu sem tratamento apresentou melhores resultados do que o bambu revestido com emulsão asfáltica.

Figura 28 – Ensaios de arrancamento e empuxamento



(a) Arrancamento



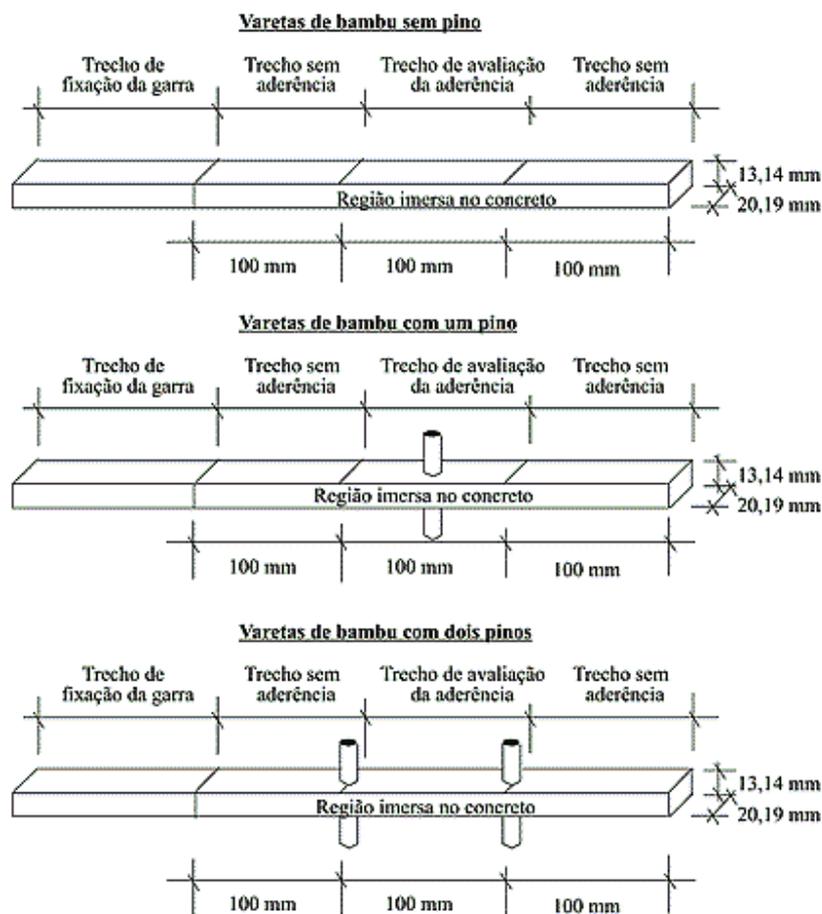
(b) Empuxamento

Fonte: Lopes et al. (2002)

Em ensaios de arrancamento com corpos de prova de concreto e taliscas de bambu cravejadas com pinos de aço e de bambu, Mesquita et al. (2006) avaliaram as dimensões transversais das taliscas de bambu, a resistência do concreto, o tipo e a quantidade de pinos utilizados (Figura 29). Constatou-se, com os resultados obtidos, que as colocações dos pinos de aço e de bambu

aumentaram a tensão de aderência em 80% e 50%, respectivamente. Comparando-se os resultados das taliscas com os obtidos por meio de uma barra de aço liso, verificou-se que os pinos de aço e de bambu apresentaram tensões de aderência superiores às do aço liso em 25% e 5%, respectivamente.

Figura 29 – Características dos corpos de prova utilizados no ensaio de arrancamento



Fonte: Mesquita et al. (2006)

Agarwal, Nanda e Maity (2014) estudaram o comportamento do bambu por meio de ensaios de tração e de ensaios de arrancamento. Três amostras, todas elas contendo um nó, foram submetidas ao ensaio de tração para a obtenção da sua resistência e do seu módulo de elasticidade (Figura 30). Como tratamento, as amostras de bambu foram imersas em água por 24 horas; em seguida foram revestidas com uma camada de cal e deixadas para secar durante 30 dias. Posteriormente, foi aplicado um adesivo e uma camada de areia. Em relação aos ensaios de arrancamento, foram comparados seis

diferentes compostos que poderiam ser utilizados para se obter uma melhor aderência entre o bambu e o concreto (Figura 31). Diante dos resultados obtidos, pode-se notar que as amostras tratadas forneceram um aviso antes do rompimento e apresentaram comportamento dúctil. No que diz respeito aos compostos comparados, o melhor desempenho foi o apresentado pelo Sikadur 32 Gel[®].

Figura 30 – Ensaio de tração



Fonte: Agarwal, Nanda e Maity (2014)

Figura 31 – Corpos de prova depois do ensaio de arracamento



Fonte: Agarwal, Nanda e Maity (2014)

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O desenvolvimento do projeto contou com a estrutura do Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural (NEPAE), da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, para a elaboração dos corpos de prova utilizados nos ensaios de arrancamento e para a elaboração das vigas de concreto armado.

Também foram feitos, junto ao NEPAE, estudos de dosagens e das propriedades do concreto utilizado na pesquisa, de caracterização do látex e do desempenho da resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona por meio de ensaios de tração.

Para os ensaios de arrancamento, foram confeccionados 10 corpos de prova, sendo:

- 5 corpos de prova com taliscas reforçadas em todos os nós;
- 5 corpos de prova com as taliscas reforçadas apenas onde não havia contato com o concreto.

Foram elaboradas 10 vigas, cujas características são mencionadas a seguir:

- 1 viga de concreto armado tendo sido elaborada apenas para verificar as condições do ensaio; esta viga foi designada pelo termo VIGA PILOTO e seus resultados experimentais não são mostrados neste trabalho;
- 3 vigas de concreto armado que foram utilizadas como referência, definidas, a partir deste ponto, como VIGAS REFERÊNCIA;
- 3 vigas de concreto armado reforçadas adicionalmente com taliscas de bambu, cujos nós não foram reforçados. Essas vigas, a partir deste ponto, foram referidas como VIGAS BAMBU;
- 3 vigas de concreto armado reforçadas adicionalmente com taliscas de bambu, cujos nós foram reforçados. Essas vigas, a partir deste ponto, foram definidas como VIGAS BAMBU REFORÇADO.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para a confecção dos corpos de prova e das vigas, foram utilizados os seguintes materiais:

- cimento, água, areia média e brita 1, usados para a elaboração do concreto;
- taliscas de bambu, com e sem reforço nos nós;
- resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona, usada para a colagem dos reforços nas taliscas;
- resina epóxi para aplicar nas extremidades das taliscas utilizadas nas vigas, com o intuito de melhorar a sua condição de ancoragem na região dos apoios;
- látex;
- armaduras inferior, superior e estribos constituídos por barras de aço com diâmetros iguais a 5 mm, 4.2 mm e 4.2 mm, respectivamente;
- materiais diversos como, por exemplo, óleo desmoldante, gesso;
- fôrmas de PVC (Cloroeto de Polivinila), com 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, usadas para moldar corpos de prova utilizados na determinação das propriedades do concreto;
- fôrmas metálicas com 15 cm de diâmetro por 30 cm de largura, para moldagem dos corpos de prova utilizados no ensaio de arrancamento;
- placas de madeira compensada plastificada, usadas na confecção de fôrmas com dimensões de 160 cm de comprimento, 12,5 cm de largura e 15 cm de altura para a concretagem das vigas e lonas plásticas. Os equipamentos utilizados foram: vibrador de imersão, mesa vibratória, células de carga e relógios comparadores, extensômetros elétricos, perfis metálicos e sistema de aquisição de dados.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização do cimento utilizado foi fornecida pelo laboratório da Companhia Energética de São Paulo (CESP) de Engenharia Civil, também utilizada por Fazzan (2011). Foram realizados ensaios de caracterização para os agregados miúdo e graúdo no Laboratório Central de Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP). As caracterizações das armaduras, das taliscas de bambu e do látex foram realizadas, de acordo com as diretrizes das normas técnicas vigentes, nas instalações do Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural (NEPAE), da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP).

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CP II Z 32 (Cimento Portland Composto) devido à sua grande utilização em obras residenciais, sobretudo na região noroeste do Estado de São Paulo. A caracterização do cimento CP II Z 32 é mostrada no Capítulo 4, item 4.1.

3.2.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo foi caracterizado como sendo uma areia natural média segundo as diretrizes das normas técnicas vigentes. Foram feitos os ensaios de:

- composição granulométrica, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003);
- teor de materiais pulverulentos, pela NBR NM 46 (ABNT, 2003);
- massa específica e massa específica aparente, conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009);
- absorção de água, conforme a NBR NM 30 (ABNT, 2001);
- teor de matéria orgânica, pela NBR NM 49 (ABNT, 2001).

A composição granulométrica, a dispersão granulométrica e os índices correspondentes ao agregado miúdo utilizado são apresentados no Capítulo 4, item 4.2.

3.2.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo foi classificado como brita 1, segundo as diretrizes das normas técnicas vigentes. Foram feitos os ensaios de:

- composição granulométrica, conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003);
- massa unitária, seguindo as recomendações da NBR NM 45 (ABNT, 2006);
- massa específica e massa específica aparente, conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009);
- absorção de água, conforme a NBR NM 30 (ABNT, 2001);
- teor de materiais pulverulentos, pela NBR NM 46 (ABNT, 2003).

Os resultados da caracterização do agregado graúdo são apresentados no Capítulo 4, item 4.3.

3.2.4 Água

A água usada para a elaboração do concreto foi a fornecida pelo Departamento de Água e Esgoto do município de Ilha Solteira – SP.

3.2.5 Armaduras

Foram utilizadas, para a elaboração da armadura longitudinal principal posicionada na face inferior das vigas, barras de aço com diâmetro igual a 5 mm; já na face superior, como porta-estribos, foram usadas barras de aço com diâmetro igual a 4.2 mm.

Para estimar as características mecânicas das barras de aço, foi instrumentado um exemplar de cada diâmetro com um extensômetro elétrico e fez-se o ensaio de tração segundo a NBR ISO 6892-1 (ABNT, 2013). O

equipamento usado para ensaiar as barras à tração foi uma máquina Instron EMIC, com capacidade para 30 ton (Figura 32). Os resultados obtidos encontram-se apresentados no Capítulo 4, item 4.4.

Figura 32 – Ensaio de tração da barra de aço com diâmetro de 5 mm



Fonte: Própria autora

Como armadura de cisalhamento, foram usados estribos com diâmetro igual a 4.2 mm. Todas as barras usadas para a confecção das armaduras puderam ser classificadas como sendo da classe CA 60 ($f_{yk} = 60 \text{ kN/cm}^2$).

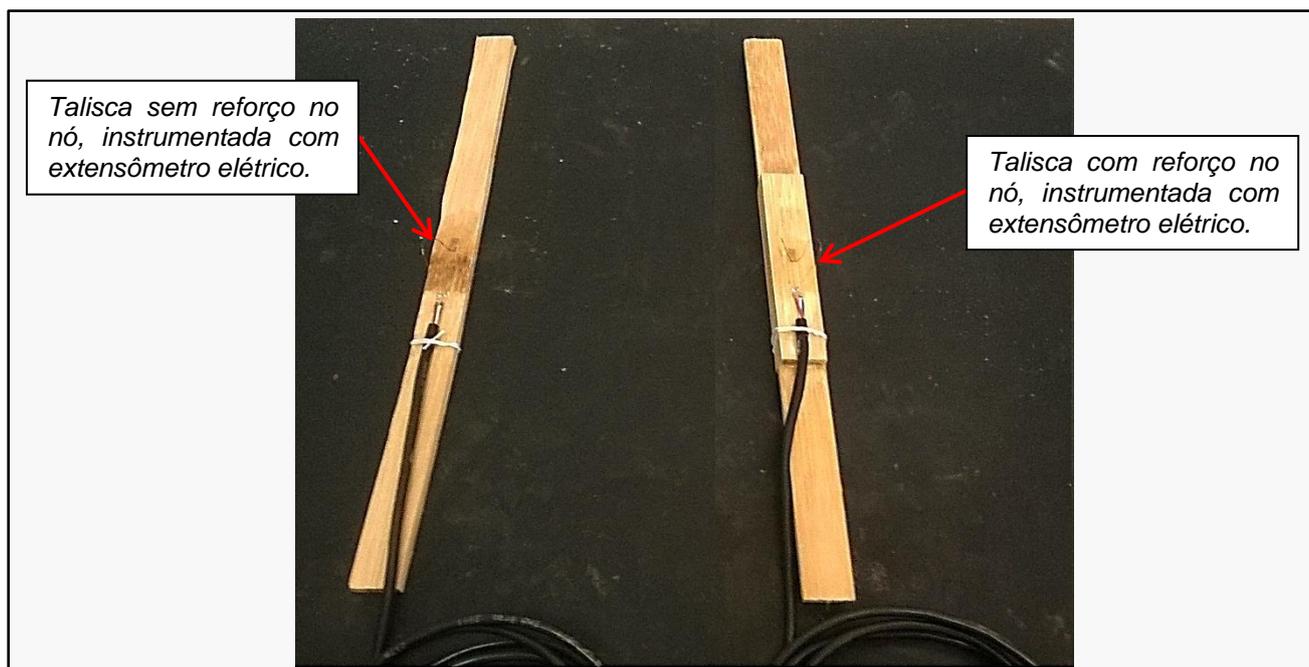
3.2.6 Taliscas de Bambu

As taliscas de bambu utilizadas como reforço adicional nas vigas de concreto armado foram confeccionadas a partir dos colmos de bambu coletados na Fazenda de Ensino e Pesquisa (FEPE), da UNESP – Campus de Ilha Solteira.

Para avaliar as características mecânicas das taliscas utilizadas, foram feitos ensaios de tração em quatro taliscas: duas delas sem reforço nos nós e

duas delas com reforço de 10 cm de comprimento nos nós. Cada talisca foi instrumentada com um extensômetro elétrico, conforme mostrado na Figura 33. Os corpos de prova apresentavam dimensões de 30 cm de comprimento, 2 cm de largura e 0,5 cm de espessura. O equipamento usado para ensaiar as taliscas à tração foi uma máquina Instron EMIC, com capacidade para 30 ton (Figura 34). Os resultados obtidos são apresentados no Capítulo 4, item 4.5.

Figura 33 – Taliscas instrumentadas com um extensômetro elétrico



Fonte: Própria autora

Figura 34 – Ensaio de tração das taliscas



(a) Talisca sem reforço



(b) Talisca com reforço

Fonte: Própria autora

3.2.7 Resina Poliuretana Bicomponente à Base de Óleo de Mamona

A resina poliuretana bicomponente à base de óleo de mamona foi utilizada para a colagem dos reforços nas regiões nodais das taliscas de bambu.

Os reforços foram colados com o intuito de melhorar a resistência da talisca na região nodal, tendo em vista que o bambu, nessa região, apresenta uma resistência bem menor se comparada à resistência da região fora dos nós.

Os componentes da resina à base de óleo de mamona foram misturados utilizando-se uma proporção de 1:1 em massa.

3.2.8 Resina Epóxi

Nas extremidades das taliscas utilizadas nas vigas, com o intuito de melhorar a sua condição de ancoragem na região dos apoios, foi aplicado o produto Sikadur 32[®], um adesivo estrutural à base de resina epóxi, bicomponente, de média viscosidade (fluido) e de pega normal.

Segundo dados fornecidos pelo fabricante, a resina epóxi possui uma massa específica a 25 °C de 1,70 kg/l e os componentes da mesma devem ser misturados na proporção de 2:1 em massa.

3.2.9 Látex

O látex foi coletado de seringueiras da Fazenda de Ensino e Pesquisa (FEPE), da UNESP – Campus de Ilha Solteira. A caracterização do látex usado na impermeabilização das taliscas utilizadas nos ensaios de aderência e nos ensaios de flexão das vigas foi feita com base em Moraes e Melges (2012). Essa caracterização consistiu em se determinar a quantidade de borracha no látex coletado. O procedimento é mencionado a seguir.

Inicialmente, é pesada uma determinada quantidade correspondente a 5°ml do látex; em seguida, o látex é colocado dentro de uma estufa a 60°C, por um período de 24 horas; por fim, o material é novamente pesado e, com o resultado, calcula-se a massa de sólidos do látex. Essa massa corresponde à da borracha e de outras partículas que, por serem muito pequenas, podem ser desprezadas. A relação entre as massas final e inicial corresponde à porcentagem (%) de borracha no látex.

Com base no ensaio realizado, obteve-se uma porcentagem de borracha em relação ao látex igual a 41,7%. O pH aferido foi de 11,0.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Coleta do Látex e dos Colmos de Bambu

O látex foi coletado de seringueiras da Fazenda de Ensino e Pesquisa (FEPE), da UNESP – Campus de Ilha Solteira. O modo de como se retirou o látex da seringueira é chamado de *tapping*. O processo consiste em se utilizar de uma faca especializada cortando, no sentido anti-horário, uma fina camada da casca com certa angulação que permita o escoamento do líquido. Abaixo deste corte, é colocado um recipiente conforme ilustrado na Figura 35.

Esperou-se uma hora após o corte para recolher o conteúdo do recipiente e foi adicionada uma proporção de 4,7 ml de amônia para cada 100 ml de látex com o objetivo de evitar a coagulação precoce da borracha. A solução foi armazenada em uma geladeira.

Os colmos de bambu foram extraídos de moitas da Fazenda de Ensino e Pesquisa (FEPE), da UNESP – Campus de Ilha Solteira (Figura 36).

Figura 35 – Coleta do látex



Fonte: Própria autora

Figura 36 – Colmos de bambu



Fonte: Própria autora

3.3.2 Corte dos colmos para confecção de taliscas

Para a elaboração das taliscas, a partir dos colmos de bambu, foram realizados os seguintes procedimentos:

- a) foram retiradas, com a serra de fita, as imperfeições da face externa do colmo, na região do diafragma, de onde saem os galhos (Figura 37);
- b) com a serra circular de mesa, o colmo foi cortado na direção longitudinal; em seguida, foram cortadas as arestas internas na região do diafragma (Figura 38);
- c) utilizando-se a desempenadeira, a face interna da talisca foi lixada (Figura 39);
- d) para a retirada da casca e obtenção da talisca com a espessura desejada, foi utilizado o equipamento mostrado na Figura 40;

- e) para que as faces laterais da talisca fossem retilíneas, a desempenadeira foi novamente utilizada, conforme mostrado na Figura 41;
- f) utilizando-se o equipamento mostrado na Figura 42, a talisca foi cortada na largura desejada.
- g) por fim, utilizando-se novamente a serra de fita, as taliscas foram cortadas nos comprimentos desejados.

Figura 37 – Retirada de imperfeições na região dos galhos



Fonte: Própria autora

Figura 38 – Corte com a serra circular



(a) Corte longitudinal do colmo em taliscas



(b) Retirada das arestas internas

Fonte: Própria autora

Figura 39 – Desempenamento da face interna da talisca



Fonte: Própria autora

Figura 40 – Retirada da casca da face externa e padronização da espessura da talisca



Fonte: Própria autora

Figura 41 – Desempenamento das faces laterais das taliscas



Fonte: Própria autora

Figura 42 – Corte da talisca de modo a se obter a largura desejada



Fonte: Própria autora

As taliscas foram estocadas em um ambiente interno seco, protegido do meio ambiente externo, no Laboratório Central de Engenharia Civil, da UNESP – Campus de Ilha Solteira. Com as taliscas já prontas, foram selecionadas, para os ensaios, as peças que se apresentaram mais regulares.

3.3.3 Confeção dos corpos de prova usados no ensaio de tração

Foram realizados ensaios de tração com corpos de prova sem reforços na região nodal, cujas dimensões foram iguais a 30 cm de comprimento, 2 cm de largura e 0,5 cm de espessura.

Para a avaliação do desempenho da Resina à base de óleo de Mamona utilizada para a colagem dos reforços, foram realizados ensaios de tração utilizando-se corpos de prova elaborados a partir de taliscas reforçadas nos nós, com 30 cm de comprimento, 2 cm de largura e 0,5 cm de espessura.

Para reforçar a região dos nós, pedaços de taliscas com comprimento de 10 cm, largura de 2 cm e espessura de 0,5 cm também foram confeccionados. Destaca-se que, nos pedaços usados como reforço, não havia a existência de nós.

Em cada face da talisca de 30 cm, na região do nó, foi colado um pedaço de talisca a título de reforço.

O adesivo utilizado para colar o reforço na região do nó foi uma Resina à base de óleo de Mamona (RM). Os componentes da resina foram misturados utilizando-se uma proporção de 1:1 em massa.

Após passar a cola na região do nó da talisca e nos reforços, esses três elementos foram postos em contato, e, em seguida, esse conjunto foi envolvido por um filme plástico (Figura 43).

Após a colocação do apoio, os reforços e a talisca foram pressionados uns contra os outros por meio de um dispositivo mecânico (morsa ou sargento), de modo a se obter uma colagem mais eficiente (Figura 44).

Após 24 horas, o sargento foi retirado e os corpos de prova estavam prontos para serem ensaiados.

O equipamento usado para ensaiar as taliscas à tração foi uma máquina Instron EMIC, com capacidade para 30 ton. Os corpos de prova foram fixados através de duas garras (uma inferior e outra superior), conforme mostrado na Figura 45. De modo a se comparar o desempenho de taliscas reforçadas coladas com Resina à base de óleo de Mamona (RM) com taliscas sem reforços na região nodal, foram confeccionados, no total, 14 corpos de prova: 7 deles com reforço e 7 deles sem o reforço.

Figura 43 – Corpo de prova envolvido pelo filme plástico



Fonte: Própria autora

Figura 44 – Aplicação de pressão, perpendicular ao plano da colagem



Fonte: Própria autora

Figura 45 – Máquina Instron EMIC, já com o corpo de prova posicionado



Fonte: Própria autora

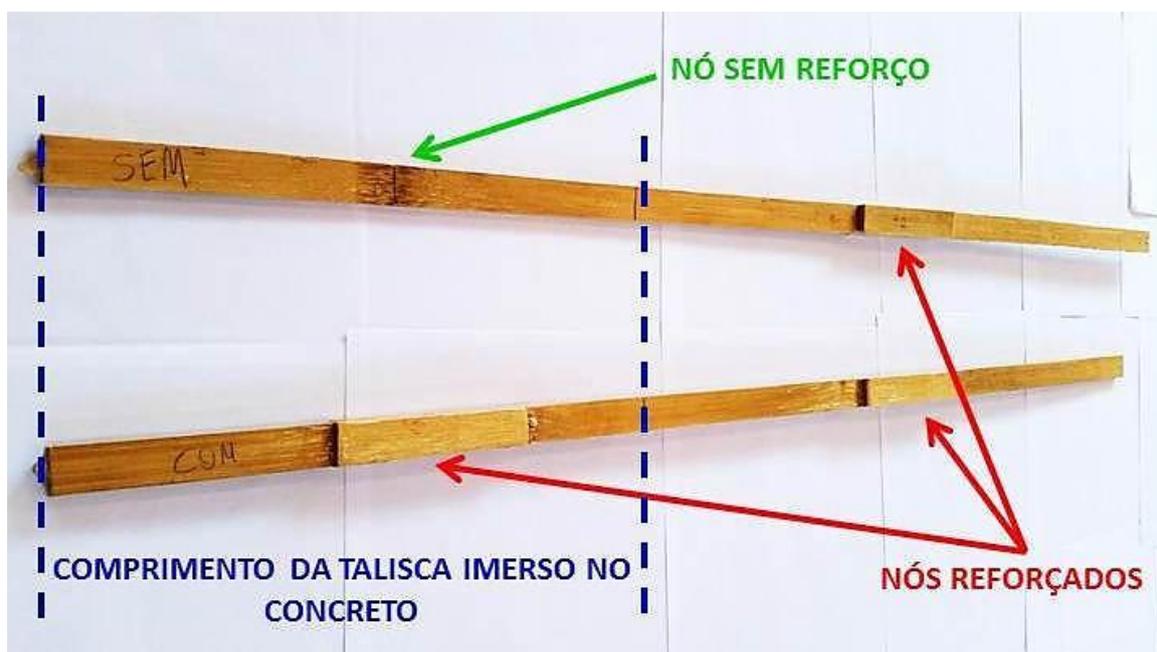
3.3.4 Confeção das taliscas usadas no Ensaio de Arrancamento

Foram confeccionadas 10 taliscas com um comprimento de aproximadamente 70 cm para os ensaios de arrancamento. Neste ensaio, 30 cm do comprimento da talisca foi imerso no concreto usado para preencher corpos de prova cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura.

Das 10 taliscas, 5 delas tiveram os nós reforçados na região que estaria imersa no concreto, cujo comprimento de reforço foi igual a 10 cm; já as outras 5 não foram reforçadas nessa região. No entanto, em todas as taliscas, todos os nós externos (que não estavam imersos no concreto) foram reforçados (Figura 46).

A cola utilizada foi a Resina à base de óleo de Mamona e o procedimento para colar os reforços foi idêntico ao apresentado para os corpos de prova submetidos à tração; porém, o processo foi otimizado com a ajuda de mais sargentos, uma viga de base e apoios, que ficaram entre o sargento e a talisca, visando o não esmagamento da mesma (Figuras 47 e 48).

Figura 46 – Detalhe das taliscas usadas no ensaio de arrancamento



Fonte: Própria autora

Figura 47 – Pressão perpendicular à colagem por meio de um sargento



Fonte: Própria autora

Figura 48 – Talisca reforçada nos nós



Fonte: Própria autora

O procedimento relativo à impermeabilização das taliscas de bambu é mencionado a seguir:

- a) a talisca foi inicialmente imersa no látex, utilizando-se um recipiente de PVC com 115 cm de altura e 5 cm de diâmetro, por um minuto, conforme mostrado na Figura 49;
- b) em seguida, a talisca foi retirada do recipiente e colocada para secar, em um varal que estava em um ambiente seco e protegido, durante 24 horas (Figura 50);
- c) esse processo foi repetido por mais 3 vezes, totalizando um total de 4 camadas de látex aplicadas, o que correspondeu a um acréscimo de 0,15 g de látex por cm^2 de área superficial da talisca. Maiores detalhes podem ser vistos no Anexo I.

Figura 49 – Recipiente de PVC utilizado no processo de impermeabilização



Fonte: Própria autora

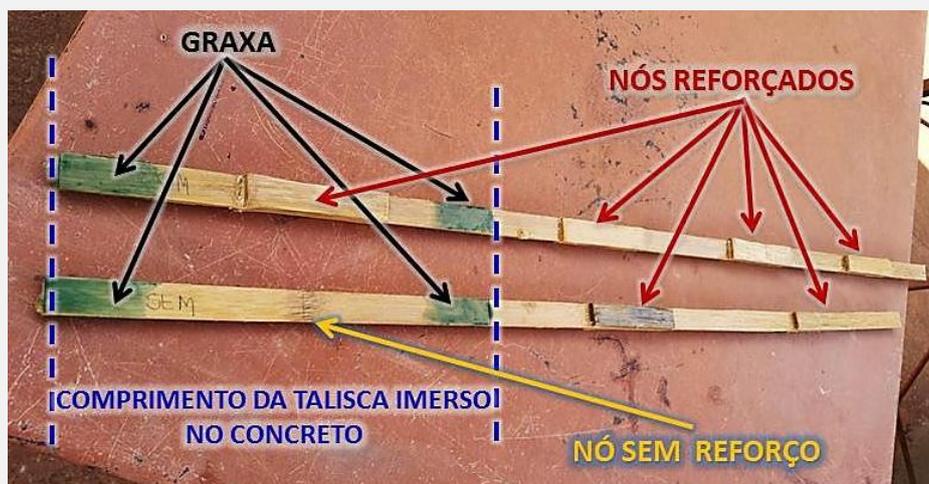
Figura 50 – Varal usado no processo de impermeabilização



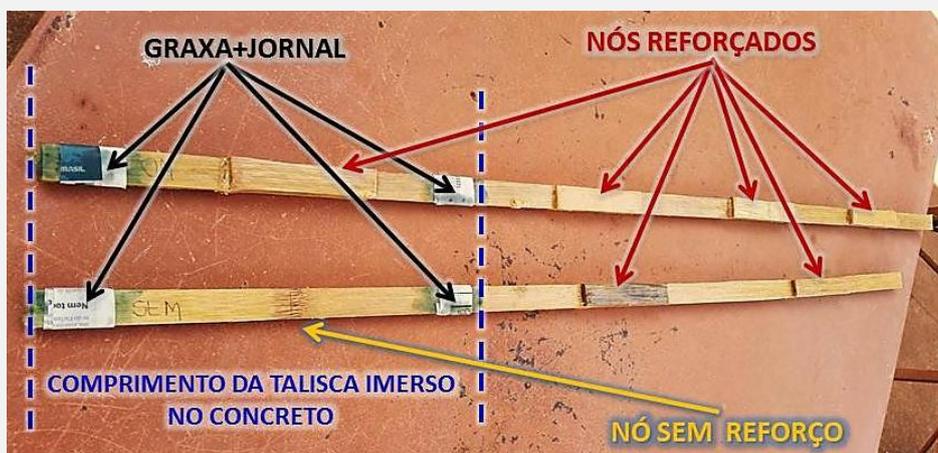
Fonte: Própria autora

Após a impermeabilização, foi feita a aplicação de uma graxa, revestida com jornal e fita-crepe, nos 5 cm iniciais e nos 5 cm finais do comprimento da talisca que estaria imerso no concreto, deixando somente 20 cm na parte central da talisca para o cômputo da aderência talisca-concreto (Figuras 51 e 52). Deste modo, o comprimento aderente foi reduzido de 30 cm para 20 cm, visando à obtenção de uma menor força de arrancamento, e, diminuindo, desta maneira, a possibilidade de que a ruptura ocorresse no nó externo ao corpo de prova de concreto.

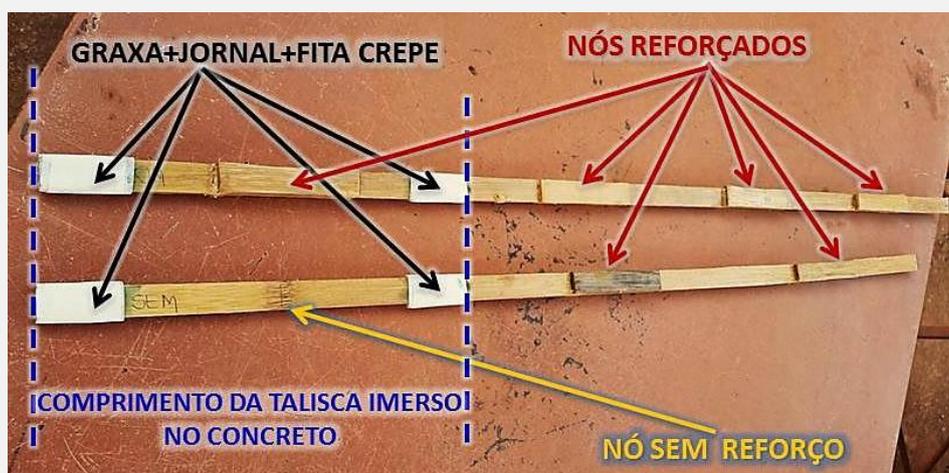
Figura 51 – Detalhe do tratamento feito no comprimento da talisca imerso no concreto, para taliscas com e sem reforço



(a) Aplicação de graxa nos 5 cm iniciais e nos 5 cm finais do comprimento da talisca imerso no concreto



(b) Revestimento da graxa aplicada com jornal



(c) Cobrimento do jornal e da graxa aplicada com fita crepe

Fonte: Própria autora

Figura 52 – Taliscas prontas para serem utilizadas na concretagem dos corpos de prova do ensaio de arrancamento



Fonte: Própria autora

3.3.5 Confeção das taliscas usadas como reforço adicional nas vigas de concreto

Para o ensaio de flexão das vigas, foram confeccionadas 9 taliscas com 1,58 m de comprimento, 2 cm de largura e 0,5 cm de espessura, com reforços de 10 cm anexados nas regiões nodais (Figuras 53 e 54). A cola utilizada e o procedimento de colagem dos reforços foram idênticos ao apresentado para os corpos de prova submetidos à tração e ao ensaio de arracamento.

A título de comparação, também foram elaboradas 9 taliscas com 1,58 m de comprimento, 2 cm de largura e 0,5 cm de espessura, porém sem reforços nas regiões nodais.

Das 18 taliscas confeccionadas, 6 delas foram instrumentadas com extensômetros elétricos: 3 que apresentavam reforços nos nós e outras 3 que não foram reforçadas nas regiões nodais (Figura 55). Em seguida, todas as 18 taliscas foram impermeabilizadas com látex.

Figura 53 – Colagem de reforços nos nós da talisca a ser utilizada na viga



Fonte: Própria autora

Figura 54 – Detalhe da colagem do reforço



Fonte: Própria autora

Figura 55– Taliscas instrumentadas com extensômetro elétrico



(a) Detalhe do extensômetro



(b) Secagem das taliscas após impermeabilização

Fonte: Própria autora

3.3.6 Dosagem do concreto

O método usado para realizar a dosagem do concreto, foi feito com base em Fazzan (2011), que utilizou o método de dosagem de concreto de elevado desempenho proposto por O'Reilly Díaz (1998). O objetivo deste estudo foi de ser possível a obtenção de concretos com resistência à compressão mínima de 25 MPa aos 28 dias.

Para a elaboração do concreto foi utilizada uma planilha elaborada com base no trabalho de Fazzan (2011), que é apresentada na Figura 56.

Os materiais utilizados para a elaboração do concreto e que foram inseridos na planilha são: cimento CP II Z, brita 1, areia média e água.

Para a utilização da planilha, é necessário inserir a dosagem, o volume de concreto que vai ser elaborado, as características físicas (massa específica e absorção) dos materiais, e os valores das umidades da areia e da brita. As umidades da brita e areia devem ser determinadas experimentalmente. Depois de inseridos os dados, a planilha determina a proporção dos materiais, em massa (kg), respectivamente para a brita 1, areia média, cimento CP II Z e água. A composição final do traço é apresentada na Tabela 1.

Figura 56 – Planilha utilizada para a dosagem do concreto

PLANILHA DE DOSAGEM DO CONCRETO																		
Relação (1:m)		1:	6,19		<div style="text-align: center;"> Materials </div>													
Teor de Argamassa Seca		56,80																
Volume de Argamassa (%)		65,7																
		VOLUME	PESO		<div style="text-align: center;"> Dosagem </div>													
AR	15,0																	
AGREGADO	682,7																	
AGLOMERANTE	110,3	342,0																
ÁGUA	192,0	192,0																
TOTAL	1000,0			<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>CIMENTO</td> <td>Itaú CP II Z 32</td> </tr> <tr> <td>Silica</td> <td></td> </tr> <tr> <td>AGREGADO Graúdo</td> <td>Brita 1</td> </tr> <tr> <td>AGREGADO Miúdo</td> <td>Areia Média Natural</td> </tr> <tr> <td>SLUMP (cm)</td> <td>5,0 a 7,0</td> </tr> </table>					CIMENTO	Itaú CP II Z 32	Silica		AGREGADO Graúdo	Brita 1	AGREGADO Miúdo	Areia Média Natural	SLUMP (cm)	5,0 a 7,0
CIMENTO	Itaú CP II Z 32																	
Silica																		
AGREGADO Graúdo	Brita 1																	
AGREGADO Miúdo	Areia Média Natural																	
SLUMP (cm)	5,0 a 7,0																	
A/C		<div style="text-align: center;"> Aditivos </div>			Polifuncional													
A/C Equivalente	0,561				Superplastificante													
					Incorporador de Ar													
		Retard.	Super.	Incorp.														
% Volume Comb.					B1	Areia	Cim.	Silica	Água									
Componentes					50,2	49,8	100,0											
% Vol. Agregado					342,6	340,1	110,3		192,0									
Volume por M3					2,946	2,668	3,10		1,00									
Densidade S.S.S.					1009,2	907,4	342,0		192,0									
Peso S.S.S. por M3					1,16	0,38												
Absorção %					0,22	0,14												
Umidade %					0,94	0,24												
Água Livre %					9,5	2,2	11,7		8,7									
Peso de Água Livre					1000	905	342,0		200,7									
Peso por M3																		
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 20%;"> Conversões: </div> <div style="width: 80%;"></div> </div>																		
70 L					69,98	63,36	23,94	14,05										
 Volume de concreto (em litros)		 Proporção dos Materiais (em Kg)																

Tabela 1 – Composição final do traço do concreto

Materiais	Consumo (kg/m³)
Água	192,00
Cimento	342,00
Areia	907,40
Brita	1009,20
Relações	Índices
Relação (1:m)	6,19
Teor de Argamassa Seca (%)	56,80
Volume de Argamassa (%)	65,70
Relação Água/Cimento (A/C)	0,56

Fonte: Própria autora

O concreto foi elaborado por meio do seguinte procedimento:

- a) brita, areia e metade da água foram colocadas na betoneira, que foi ligada por 1 minuto;
- b) em seguida, com a betoneira desligada, acrescentou-se o cimento e a outra metade da água; ligou-se a betoneira por mais 3 minutos;
- c) decorrido este tempo, a betoneira permaneceu desligada por 3 minutos;
- d) por fim, a betoneira foi ligada por mais 3 minutos.

Uma porção de concreto foi retirada da betoneira para verificação do abatimento do tronco de cone, definido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). Os valores obtidos foram da ordem de **60 mm ± 10 mm**. A seguir, os corpos de prova foram moldados e o adensamento foi feito por meio de uma mesa vibratória. Os moldes dos corpos de prova foram de PVC, com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura.

Um dia após a concretagem, os corpos de prova foram desmoldados e colocados dentro da câmara úmida para permanecerem em processo de cura, conforme recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015), até o dia agendado para cada um dos ensaios que foram realizados conforme a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT:

- determinação da resistência à compressão axial, aos 7 e 28 dias, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), com a realização do

capeamento dos corpos de prova por meio de um composto de enxofre e pozolana;

- módulo de elasticidade, aos 28 dias, conforme a NBR 8522 (ABNT, 2008);
- resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011);
- absorção de água, aos 28 dias, pela NBR 9778 (ABNT, 2009).

3.3.7 Elaboração dos corpos de prova utilizados no Ensaio de Arrancamento

Para a confecção da parte de concreto dos corpos de prova usados no ensaio de arrancamento, foram utilizados moldes metálicos com dimensões de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura. A título de comparação, foram elaborados 10 corpos de prova, sendo:

- 5 corpos de prova com taliscas reforçadas em todos os nós;
- 5 corpos de prova com as taliscas reforçadas nos nós que não estavam imersos no concreto.

Para a elaboração dos corpos de prova usados no ensaio de arrancamento, as taliscas foram posicionadas no centro do molde, de modo a ter parte de seu comprimento imerso dentro do concreto usado para preenchê-lo. O adensamento foi feito por meio de um vibrador de imersão (Figuras 57 e 58).

A desforma foi realizada no dia seguinte e os corpos de prova foram colocados em uma câmara úmida por 28 dias (Figura 59).

Figura 57 – Elaboração do corpo de prova



Fonte: Própria autora

Figura 58 – Corpos de prova moldados



Fonte: Própria autora

Figura 59 – Cura em câmara úmida



Fonte: Própria autora

3.3.7.1 Descrição do Ensaio de Arrancamento

Antes do ensaio de arrancamento, os 10 corpos de prova receberam capeamento com gesso; acima dessa camada foi posicionada uma chapa metálica com o gesso ainda em estado plástico (Figura 60). Uma rótula foi utilizada para ajustar eventuais acomodações do corpo de prova (Figuras 61 e 62), e, em cima desta, foi colocado um prato metálico retangular (Figura 63), destinado a distribuir de maneira uniforme o carregamento da máquina de ensaios ao corpo de prova.

Figura 60 – Capeamento com gesso e chapa metálica



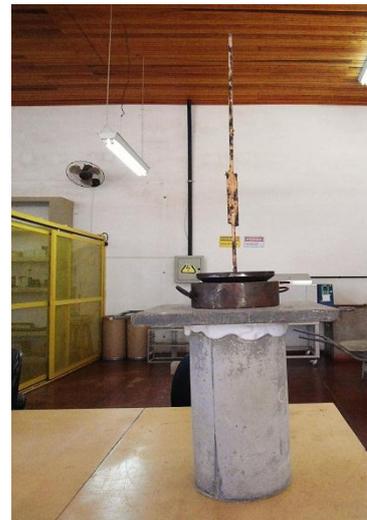
Fonte: Própria autora

Figura 61 – Rótula



Fonte: Própria autora

Figura 62 – Corpo de prova capeado e com a rótula posicionada



Fonte: Própria autora

Figura 63 – Corpo de prova pronto para ser ensaiado



Fonte: Própria autora

Os ensaios de arrancamento foram realizados por meio de uma máquina universal. Esta máquina é dividida em três partes: inferior, superior (que é dotada de uma garra ranhurada), e que se movimentam simultaneamente, e a intermediária, que permanece imóvel (Figura 64).

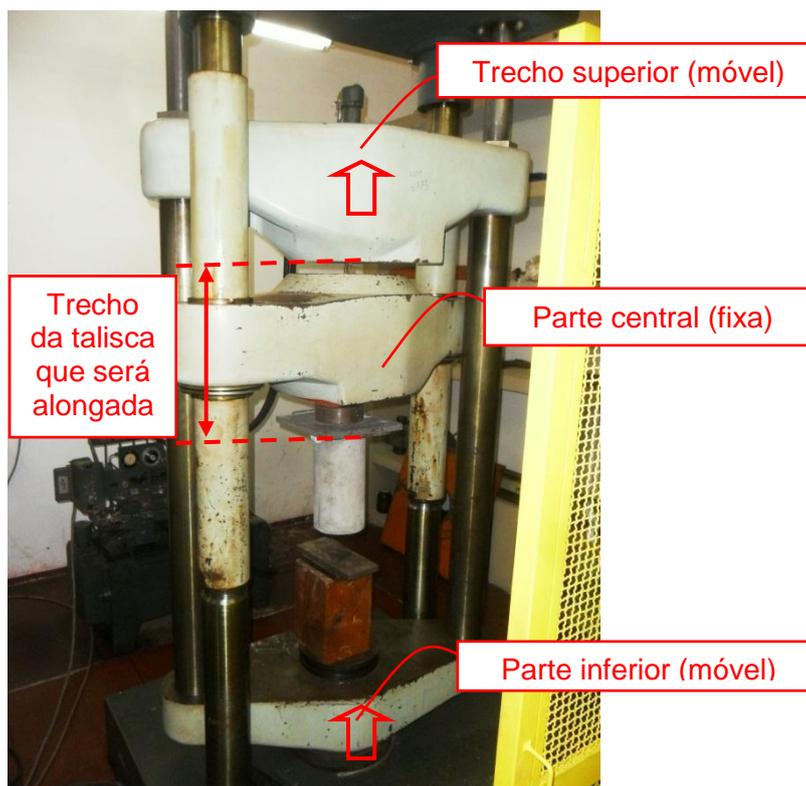
A extremidade inferior da talisca, concretada dentro do corpo de prova, foi posicionada abaixo da parte intermediária da máquina de ensaio enquanto que a outra extremidade, composta pelo bambu aparente, foi fixada pela garra na parte superior da máquina.

Um relógio comparador, usado para medir os deslocamentos, foi posicionado entre as partes intermediária e superior da máquina (Figura 65), com a função de medir o alongamento do trecho da talisca que não estava imersa no concreto; a partir de um determinado nível de carregamento, soma-se, a este alongamento, o escorregamento do trecho da talisca imerso no concreto do corpo de prova.

O ensaio foi realizado com acréscimos de carga correspondentes a 50 kgf, até que houvesse a ruptura do bambu ou o seu escorregamento.

Após o ensaio de arrancamento, os corpos de prova foram seccionados longitudinalmente, através do ensaio de compressão diametral, permitindo, assim, analisar o estado em que se encontravam as taliscas imersas no concreto e quais haviam escorregado (Figuras 66 e 67).

Figura 64 – Prensa hidráulica utilizada no ensaio de arrancamento



Fonte: Própria autora

Figura 65 – Relógio comparador utilizado no ensaio de arrancamento



Fonte: Própria autora

Figura 66 – Ensaio de compressão diametral usado para sectionar os corpos de prova



Fonte: Própria autora

Figura 67 – Corpo de prova sectionado longitudinalmente



Fonte: Própria autora

Após a ruptura da talisca ou de seu escorregamento, a tensão de aderência foi calculada pela relação entre a máxima força aplicada no ensaio de arrancamento e a área lateral útil de contato entre o bambu e o concreto, como demonstrada na Equação 3.1:

$$\tau = \frac{F_{Arr}}{A_{Lat.útil}}, \quad \text{onde:} \quad (3.1)$$

τ : Tensão de aderência;

F_{Arr} : Força máxima obtida por meio da máquina universal durante o ensaio de arrancamento;

$A_{Lat.útil}$: Área lateral útil.

O termo $A_{Lat.útil}$ é obtido por meio da Equação 3.2:

$$A_{Lat.útil} = c_{ad} \cdot (2e + 2\ell), \quad \text{onde:} \quad (3.2)$$

e : espessura da talisca;

ℓ : largura da talisca;

c_{ad} : comprimento de aderência (igual a 20 cm).

Já a tensão normal foi calculada pela relação entre a máxima força aplicada durante o ensaio de arrancamento e a área da seção transversal, como mostrado na Equação 3.3:

$$\sigma = \frac{F_{Arr}}{A_{transv}}, \quad \text{onde:} \quad (3.3)$$

σ : tensão normal de tração;

$A_{transv.}$: área da seção transversal.

O termo A_{transv} é obtido por meio da Equação 3.4:

$$A_{\text{transv.}} = e \cdot \ell \quad (3.4)$$

e: espessura da talisca;

ℓ : largura da talisca.

3.3.8 Elaboração das Vigas

O comportamento estrutural de vigas de concreto armado, sem e com reforço adicional de taliscas de bambu da espécie *Bambusa vulgaris*, disponível na cidade de Ilha Solteira, foi avaliado por meio de ensaios de flexão. A porcentagem de armação de bambu utilizada em relação à seção transversal da viga foi de 1,61%.

Foram elaboradas 10 vigas, sendo:

- 1 VIGA PILOTO;
- 3 VIGAS REFERÊNCIA;
- 3 VIGAS BAMBU, reforçadas adicionalmente com taliscas de bambu, cujos nós não foram reforçados;
- 3 VIGAS BAMBU REFORÇADO, reforçadas adicionalmente com taliscas de bambu, cujos nós foram reforçados.

3.3.8.1 Fôrmas de Madeira

Foram confeccionadas 6 fôrmas de madeira compensada e plastificada, com dimensões de 160 cm de comprimento, 12,4 cm de largura e 15 cm de altura, para serem usadas na concretagem das vigas (Figura 68).

Figura 68 – Fôrmas de madeira usadas para a concretagem das vigas



Fonte: Própria autora

3.3.8.2 Montagem das Armaduras

Para armadura longitudinal principal, posicionada na face inferior, foram utilizadas 2 barras com diâmetro igual a 5 mm; na face superior da viga, como porta-estribos, foram utilizadas 2 barras com 4.2 mm de diâmetro. Como armadura de cisalhamento, foram usados estribos com diâmetro igual a 4.2 mm, espaçados a cada 8 cm, com 2 ramos verticais. Todas as barras usadas foram da classe CA 60 ($f_{yk} = 60 \text{ kN/cm}^2$). As armaduras, já montadas, foram compradas de uma empresa privada. Na Figura 69, tem-se o exemplo de uma armadura já pronta.

Para garantir um cobrimento de 1 cm da armadura mais externa (no caso, o estribo), foram utilizados espaçadores do tipo EPR 24-4 doados pela empresa JERUELPLAST (Figura 70).

Figura 69 – Armadura pronta para ser utilizada na concretagem



Fonte: Própria autora

Figura 70 – Detalhe dos espaçadores utilizados



Fonte: Própria autora

Das 10 vigas elaboradas, 3 delas tiveram as suas armaduras principais instrumentadas com extensômetros elétricos: uma viga de concreto armado usada como referência (VIGA REFERÊNCIA 3), uma viga de concreto armado com reforço adicional de taliscas cujos nós não foram reforçados (VIGA BAMBU 3), e uma viga de concreto armado com reforço adicional de taliscas cujos nós foram reforçados (VIGA BAMBU REFORÇADO 3).

Os extensômetros foram colados nas armaduras na posição correspondente ao meio do vão da viga. (Figura 71).

Figura 71 – Armadura principal longitudinal instrumentada com extensômetros elétricos



Fonte: Própria autora

Para a elaboração das armaduras das vigas com reforço adicional de taliscas de bambu, foi realizado o procedimento descrito a seguir:

- a) foram inseridas 3 taliscas, sendo uma na face inferior e outras duas nas faces laterais, conforme mostrado na Figura 72;

b) as taliscas colocadas nas faces laterais foram fixadas a uma distância de 1,5 cm em relação à barra inferior, para que não houvesse problemas na concretagem (Figura 73).

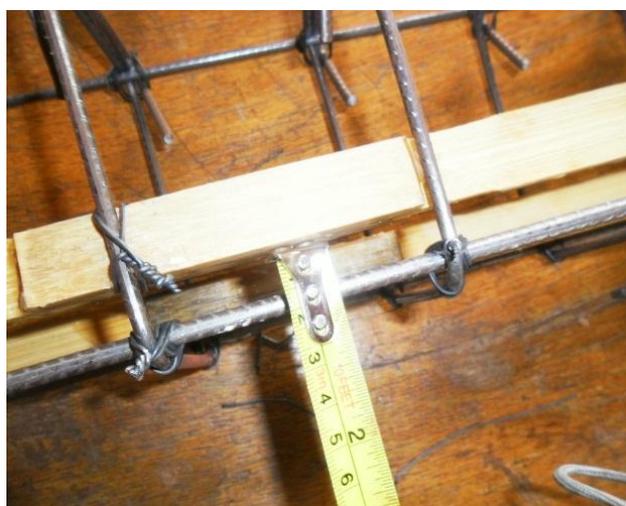
Destaca-se que, nas vigas em que a armadura de tração foi instrumentada com extensômetros, as taliscas também foram instrumentadas (Figura 74).

Figura 72 – Armaduras com (à esquerda) e sem (à direita) reforço adicional de taliscas de bambu



Fonte: Própria autora

Figura 73 – Detalhe da talisca de bambu fixada na armadura, junto à face lateral da viga



Fonte: Própria autora

Figura 74 – Armadura e taliscas de bambu instrumentadas com extensômetros



Fonte: Própria autora

3.3.8.3 Concretagem das Vigas

Foram concretadas 4 vigas utilizando-se, como reforço, apenas barras de aço. Uma dessas vigas foi feita apenas para verificar as condições do ensaio, definida como VIGA PILOTO, e seus resultados não são apresentados.

Juntamente com essas vigas, foram moldados 25 corpos de prova (Figura 75), adensados em uma mesa vibratória (Figura 76) e, um dia após a concretagem, os mesmos foram desmoldados e colocados dentro de uma câmara úmida até o dia agendado para a realização dos ensaios de caracterização do concreto:

- resistência à compressão axial, aos 7, 28 e 360 dias, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), cujo capeamento dos corpos de prova foi feito por meio de um composto de enxofre e pozolana;
- módulo de elasticidade, aos 28 e 360 dias, conforme a NBR 8522 (ABNT, 2008);
- resistência à tração por compressão diametral, aos 28 e 360 dias, segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011);
- absorção de água, aos 28 dias, pela NBR NM 30 (ABNT, 2001).

Foi feito também o ensaio de abatimento do tronco de cone (Figura 77), conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Figura 75 – Vigas e corpos de prova moldados com concreto



Fonte: Própria autora

Figura 76 – Adensamento da viga em uma mesa vibratória



Fonte: Própria autora

Figura 77 – Ensaio de consistência



Fonte: Própria autora

Após um período de 3 dias, as VIGAS REFERÊNCIA foram deformadas e colocadas em uma câmara úmida onde permaneceram durante o período de 28 dias, para, então, serem ensaiadas.

Para a concretagem das 6 vigas com reforço adicional de taliscas de bambu às barras de aço longitudinais (VIGAS BAMBU e VIGAS BAMBU REFORÇADO), antes da concretagem, foi aplicada uma resina epóxi

Sikadur 32[®] nas extremidades das taliscas de modo a melhorar a sua condição de ancoragem na região do apoio, conforme mostrado na Figura 78.

Figura 78 – Resina epóxi aplicada na extremidade da talisca de bambu imediatamente antes da concretagem da viga



Fonte: Própria autora

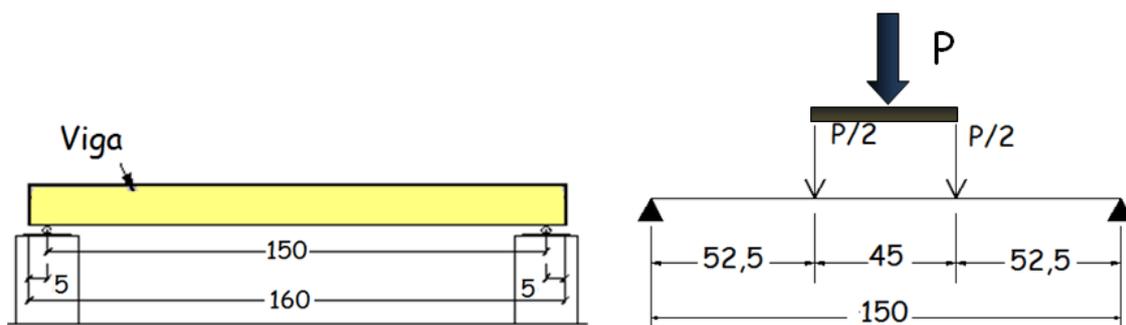
Vale ressaltar que os procedimentos de moldagem, de adensamento, de desfôrma e de cura úmida para as VIGAS BAMBU e VIGAS BAMBU REFORÇADO foram iguais aos procedimentos adotados para as VIGAS REFERÊNCIA. Foram moldados, para as VIGAS BAMBU e VIGAS BAMBU REFORÇADO, respectivamente, 22 e 21 corpos de prova, que foram destinados à caracterização do concreto.

Destaca-se que, apenas duas das três VIGAS BAMBU e duas das três VIGAS BAMBU REFORÇADO foram ensaiadas. A VIGA BAMBU 2 e a VIGA BAMBU REFORÇADO 2 permanecem na câmara úmida para serem ensaiadas após um período de tempo que será definido posteriormente, de modo a avaliar as suas durabilidades baseadas nas suas respectivas resistências.

3.3.8.4 Descrição do Ensaio de Flexão

O esquema estático adotado para o ensaio de flexão está mostrado na Figura 79. A proposta é que, na região central, houvesse a simulação da situação de flexão pura.

Figura 79 – Esquema estático do ensaio das vigas (unidades em cm)



Fonte: Própria autora

A estrutura de reação foi composta por um pórtico metálico e pela laje de reação do Laboratório do Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural (NEPAE), da UNESP – campus de Ilha Solteira, conforme mostrado na Figura 80. A força foi aplicada por um atuador (ou macaco) hidráulico acoplado a uma célula de carga de 30 tf. Para a distribuição da força no vão central da viga, foi utilizado um perfil metálico. Entre a célula de carga e o perfil metálico, foi utilizada uma rótula metálica, permitindo a acomodação do cilindro hidráulico em função de possíveis imperfeições na superfície do perfil (Figura 81). O deslocamento vertical no meio do vão foi medido por meio de um relógio comparador. Os extensômetros, a célula de carga e o relógio comparador foram conectados ao Sistema de Aquisição de Dados DAQbook 120 da lotech, com interface ao programa DASyLab 5.0, pertencente ao NEPAE, conforme ilustra a Figura 82.

As vigas foram ensaiadas com 35 dias de idade, e não com 28 dias, devido à necessidade de se realizar um conserto na bomba do atuador hidráulico.

A velocidade do carregamento aplicado foi de 1 kgf/s.

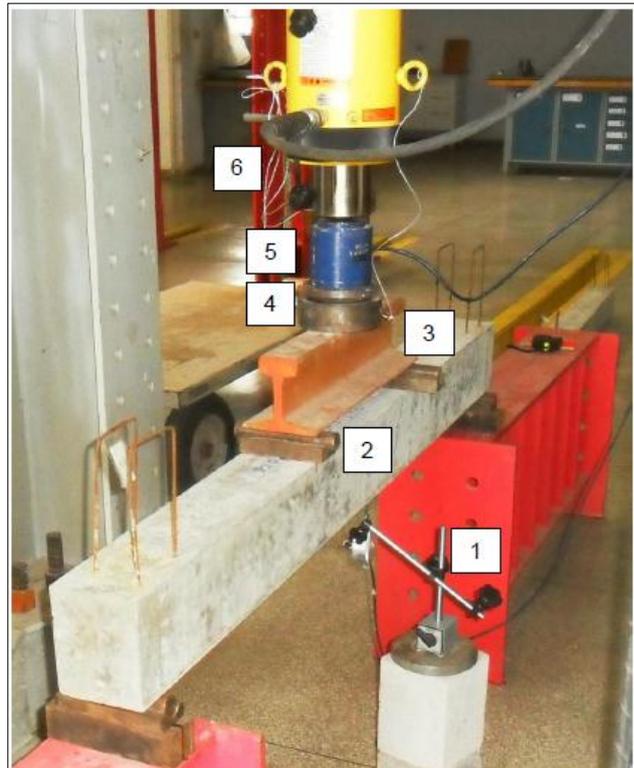
Para acomodação das vigas no sistema e eliminação de uma eventual folga entre os dispositivos, foi realizado um ciclo de carregamento, também conhecido como “escorva”. Neste ciclo, aplicou-se uma carga às vigas correspondente a 10% do valor teórico de sua carga de ruptura. Após a “escorva”, o carregamento foi aplicado às vigas até que não se pudessem observar ganhos de carga no atuador hidráulico ou até que ocorresse a ruptura da viga.

Figura 80 – Detalhe do pórtico utilizado no ensaio de flexão



Fonte: Própria autora

Figura 81 – Dispositivos utilizados no ensaio de flexão



1) Relógio comparador, 2) Rolete, 3) Perfil metálico usado para transferir a carga para a viga em 2 pontos que definem a região central, 4) Rótula, 5) Célula de carga e 6) Macaco hidráulico

Fonte: Própria autora

Figura 82 – Sistema de aquisição de dados



Fonte: Própria autora

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO

O cimento utilizado foi o CP II Z 32 (Cimento Portland Composto) e sua caracterização é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização do cimento CP II Z 32

Ensaio Químicos			
Ensaio	Unidade	Resultado	Exigências
Resíduo Insolúvel – RI	%	5,48	≤16,0
Perda ao Fogo – PF	%	5,79	≤6,5
Óxido de Magnésio – MgO	%	5,81	≤6,5
Trióxido de Enxofre – SO ₃	%	3,16	≤4,0
Ensaio Físicos			
Ensaio	Unidade	Resultado	Exigências
Área Específica (Blaine)	cm ² /g	4298	≥2600
Densidade Aparente	g/cm ³	1,09	não aplicável
Densidade Absoluta	g/cm ³	3,12	não aplicável
Índice de Finura – #75µm (n° 200)	%	0,53	≤12,0
Resíduo na peneira #325	%	3,98	não aplicável
Água de consistência da pasta (140g)	%	28	não aplicável
Início de pega	minutos	154	≥60
Fim de pega	minutos	214	≤600
Expansão em autoclave	%	0,577	não aplicável
Ensaio Mecânicos			
Ensaio	Unidade	Resultado	Exigências
Resistência à compressão – 3 Dias (150g e A/C= 0,48)	MPa	18,8	≥10
Resistência à compressão – 7 Dias (150g e A/C= 0,48)	MPa	23,7	≥20
Resistência à compressão – 28 Dias (150g e A/C= 0,48)	MPa	32,3	≥32

Fonte: Companhia Energética de São Paulo (CESP)

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO

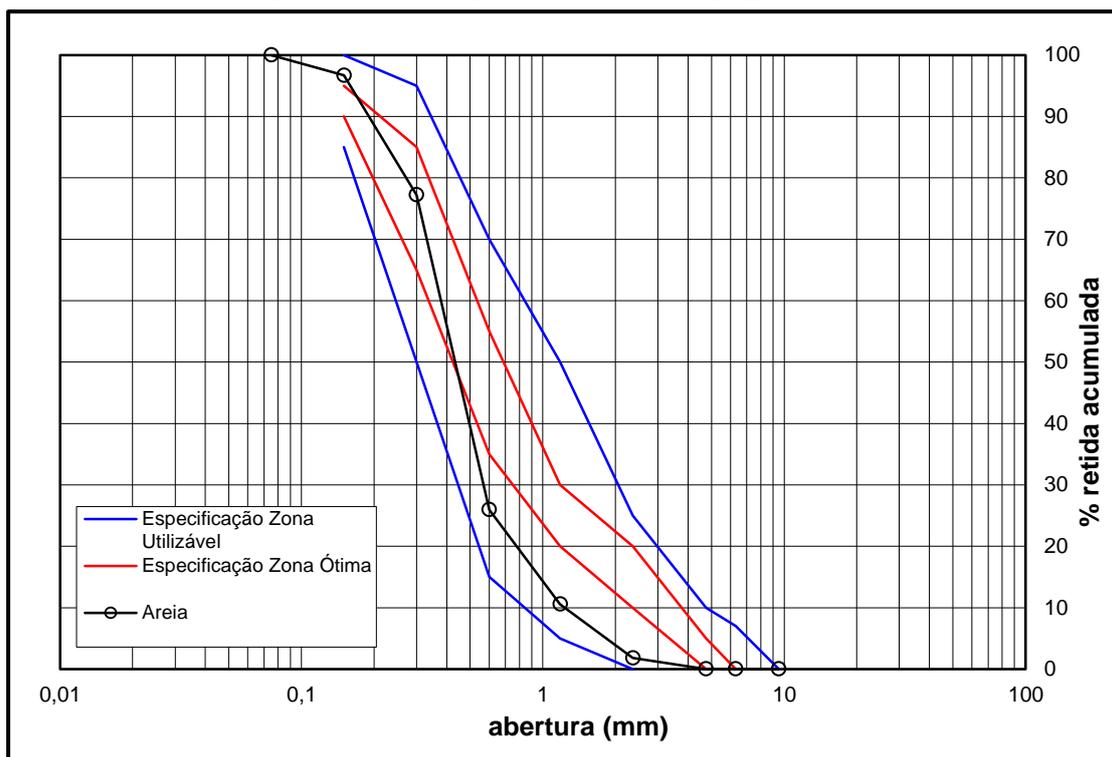
O agregado miúdo foi caracterizado como sendo uma areia natural média, segundo as diretrizes das normas técnicas vigentes. A Tabela 3 e a Figura 83 mostram, respectivamente, a composição granulométrica do agregado miúdo e a sua dispersão granulométrica; já a Tabela 4 mostra os índices correspondentes ao agregado miúdo utilizado.

Tabela 3 – Composição granulométrica do agregado miúdo

IDENTIFICAÇÃO: Areia natural												
PENEIRAS		Abertura	Peso Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada							
Normal	Auxiliar											
3"	-	75 mm		0,0	0,0							
-	2 1/2"	63 mm		0,0							0,0	
-	2"	50 mm		0,0							0,0	
1 1/2"	-	37,5 mm		0,0	0,0							
-	1 1/4"	31,5 mm		0,0							0,0	
-	1"	25 mm		0,0							0,0	
3/4"	-	19 mm		0,0	0,0							
-	1/2"	12,5 mm		0,0							0,0	
3/8"	-	9,5 mm		0,0	0,0							
-	1/4"	6,3 mm		0,0							0,0	
N.º 4	-	4,75 mm		0,0	0,0							
N.º 8	-	2,36 mm	17,9	1,8	1,8							
N.º 16	-	1,18 mm	87,8	8,8	10,6							
N.º 30	-	600 µm	154,1	15,4	25,9							
N.º 50	-	300 µm	513,6	51,3	77,2							
N.º 100	-	150 µm	195,0	19,5	96,7							
fundo	-	75 µm	32,9	3,3							100,0	
Total			1001,3	100,0	212,2							
% Retida Acumulada												
Peneiras (mm)	0,075	0,150	0,300	0,600	1,18	2,36	4,75	6,3	9,5	12,5	19	25
Areia	100,0	96,7	77,2	25,9	10,6	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: Própria autora

Figura 83 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Própria autora

Tabela 4 – Índices de caracterização da areia natural média

Diâmetro máximo (mm)	Módulo de finura	Massa específica			Massa unitária		Absorção (%)	Pulverulento (%)	Matéria orgânica
		s.s.s. (g/cm³)	seca (g/cm³)	aparente (g/cm³)	solta (g/cm³)	4% de umidade (g/cm³)			
2,36	2,12	2,668	2,617	2,644	1,492	1,074	0,38	0,40	+clara

Fonte: Própria autora

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO

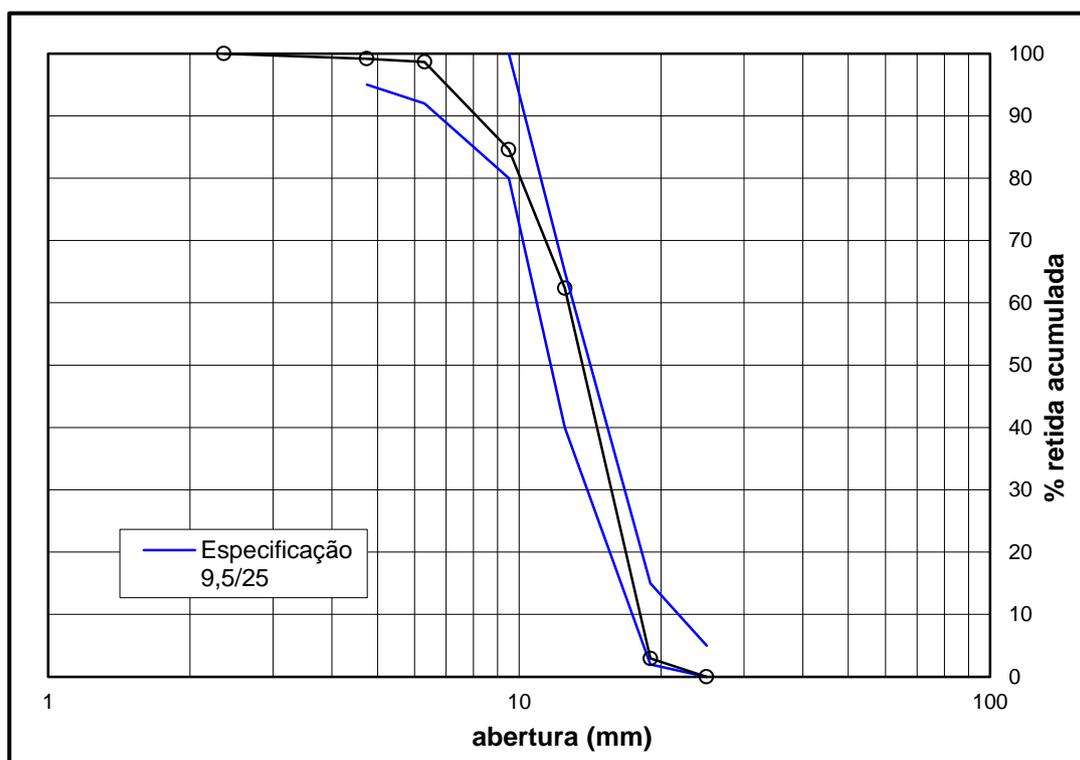
O agregado graúdo foi classificado como brita 1, segundo as diretrizes das normas técnicas vigentes. A Tabela 5 e a Figura 84 mostram, respectivamente, a composição granulométrica do agregado graúdo e a sua dispersão granulométrica. Já a Tabela 6 mostra os índices correspondentes ao agregado graúdo utilizado.

Tabela 5 – Composição granulométrica do agregado graúdo

IDENTIFICAÇÃO: Brita 1												
PENEIRAS		Abertura (mm)	Peso Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada							
Normal	Auxiliar											
3"	-	75 mm		0,0	0,0							
-	2 1/2"	63 mm		0,0		0,0						
-	2"	50 mm		0,0		0,0						
1 1/2"	-	37,5 mm		0,0	0,0							
-	1 1/4"	31,5 mm		0,0		0,0						
-	1"	25 mm		0,0		0,0						
3/4"	-	19 mm	469,3	2,9	2,9							
-	1/2"	12,5 mm	9540,5	59,4		62,4						
3/8"	-	9,5 mm	3569,8	22,2	84,6							
-	1/4"	6,3 mm	2254,9	14,0		98,7						
N.º 4	-	4,75 mm	82,0	0,5	99,2							
N.º 8	-	2,36 mm	133	0,8	100,0							
N.º 16	-	1,18 mm		0,0	100,0							
N.º 30	-	600 µm		0,0	100,0							
N.º 50	-	300 µm		0,0	100,0							
N.º 100	-	150 µm		0,0	100,0							
fundo	-	75 µm		0,0		100,0						
Total			16049,5	100,00	686,71							
% Retida Acumulada												
Peneiras (mm)	0,150	0,300	0,600	1,180	2,36	4,75	6,30	9,50	12,50	19,0	25,0	31,5
Brita	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,2	98,7	84,6	62,4	2,9	0,0	0,0

Fonte: Própria autora

Figura 84 – Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Própria autora

Tabela 6 – Índices de caracterização do agregado graúdo

Diâmetro máximo (mm)	Módulo de finura	Massa específica			Massa unitária (g/cm ³)	Absorção (%)	Pulverulento (%)
		s.s.s. (g/cm ³)	seca (g/cm ³)	aparente (g/cm ³)			
19,0	6,87	2,946	2,912	3,014	1,595	1,16	1,20

Fonte: Própria autora

4.4 CARACTERIZAÇÃO DAS ARMADURAS

Para a elaboração da armadura longitudinal principal posicionada na face inferior das vigas, foram utilizadas barras de aço com diâmetro igual a 5 mm. Na face superior, como porta-estribos, foram usadas barras de aço com diâmetro igual a 4.2 mm. A Tabela 7 mostrada a seguir, apresenta as características mecânicas e geométricas das barras de aço utilizadas:

Tabela 7 – Características geométricas e mecânicas das barras de aço

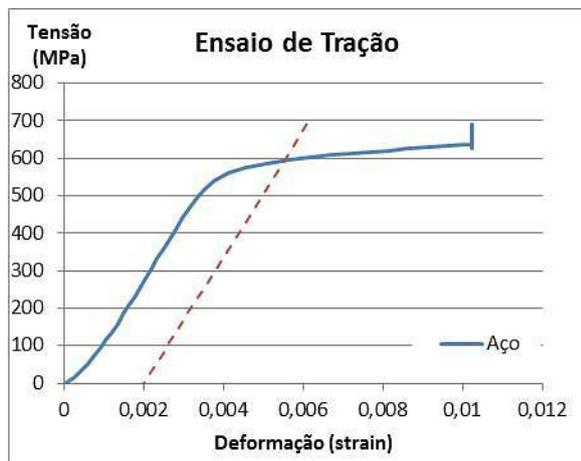
Diâmetro	Área (cm ²)	Tensão de Escoamento (MPa)*	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
4.2 mm	0,1385	694,9	769,0	189,44
5 mm	0,1964	592,8	690,3	168,47

* A tensão de escoamento foi obtida graficamente, considerando-se uma deformação residual de 2 por mil.

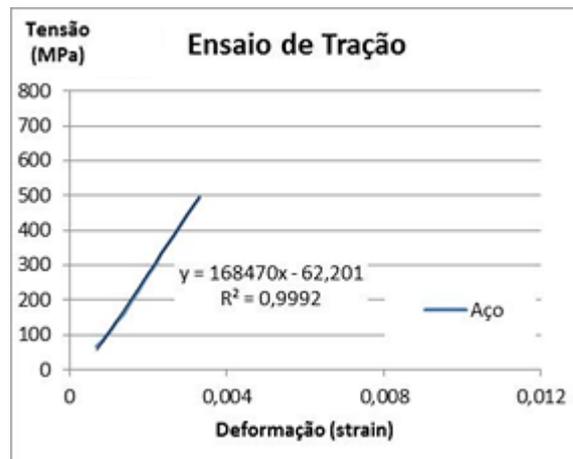
Fonte: Própria autora

Na Figura 85a, apresenta-se o diagrama “Tensão vs Deformação” para a barra com diâmetro igual a 5 mm, que teve comportamento similar ao da barra com diâmetro igual a 4.2 mm; já na Figura 85b, tem-se a inclinação do gráfico usada para avaliar o módulo de elasticidade.

Figura 85 – Gráficos completo e parcial usados na determinação das características mecânicas da barra de aço com diâmetro igual a 5 mm



(a) Gráfico completo



(b) Gráfico parcial usado para determinação do módulo de elasticidade

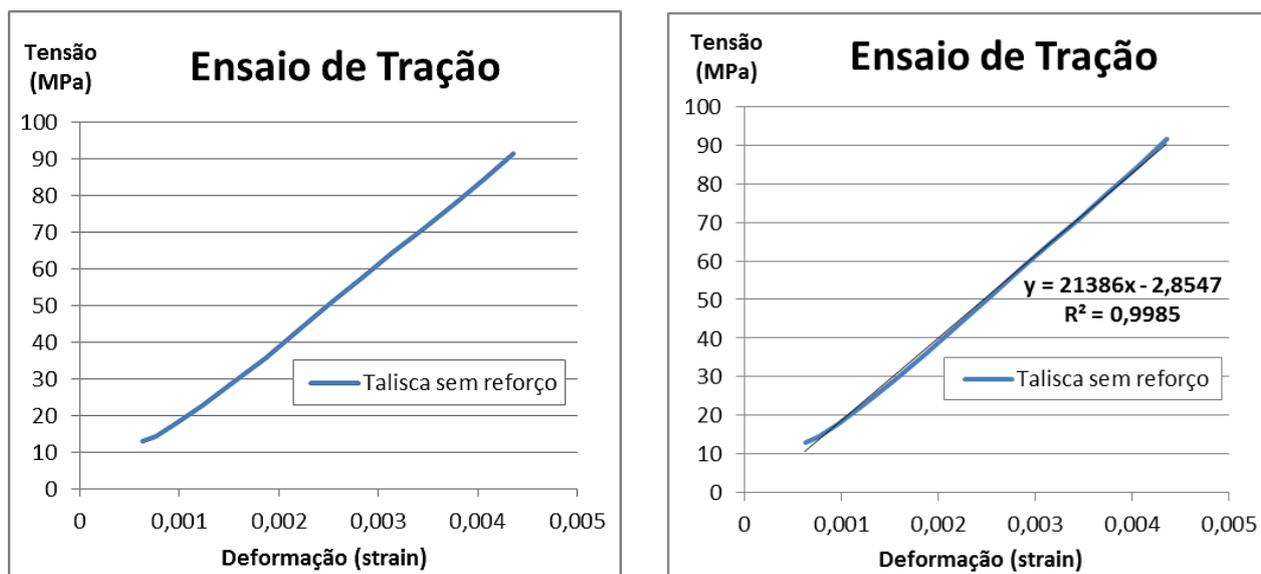
Fonte: Própria autora

Todas as barras usadas para a confecção das armaduras puderam ser classificadas como sendo da classe CA 60 ($f_{yk} = 60 \text{ kN/cm}^2$).

4.5 CARACTERIZAÇÃO DAS TALISCAS DE BAMBU

O módulo de elasticidade das taliscas de bambu sem reforço nos nós foi estimado por meio de gráficos “Tensão vs Deformação”, apresentados na Figura 86, e a Tabela 8 mostra os resultados obtidos.

Figura 86 – Gráficos completo e parcial usados na determinação das características mecânicas da talisca sem reforço ensaiada



(a) Gráfico completo

(b) Gráfico parcial usado para determinação do módulo de elasticidade

Fonte: Própria autora

Tabela 8 – Módulo de elasticidade obtido a partir do ensaio de tração das taliscas instrumentadas com extensômetros elétricos

Corpos de Prova		Módulo de Elasticidade (GPa)
Taliscas sem reforço	CP 1	21,39
	CP 2	20,15
Média		20,77
Desvio Padrão		± 0,62

Fonte: Própria autora

No que diz respeito às taliscas de bambu com reforço nos nós, foi possível observar um início do descolamento do reforço após um determinado nível de carregamento.

4.6 ENSAIO DE TRAÇÃO: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA RESINA À BASE DE ÓLEO DE MAMONA

Os valores médios das forças de ruptura para as taliscas sem e com reforço de 10 cm de comprimento nos nós (colados com Resina à base de óleo de Mamona-RM) estão apresentados na Tabela 9. Na Tabela 10, apresentam-se as tensões médias de ruptura. O gráfico apresentado na Figura 87 ilustra os valores apresentados nas Tabelas 9 e 10. As dimensões da taliscas e os valores individuais relativos a cada corpo de prova estão mostrados nos Anexos II e III, respectivamente.

Tabela 9 – Valores médios das Forças de Ruptura à Tração (em kgf)

	Taliscas sem reforço	Taliscas com reforço colado com Resina à base de óleo de Mamona (RM)
Força de ruptura (kgf)	1074,3	1288,7
Desvio Padrão (kgf)	± 155,0	± 253,8

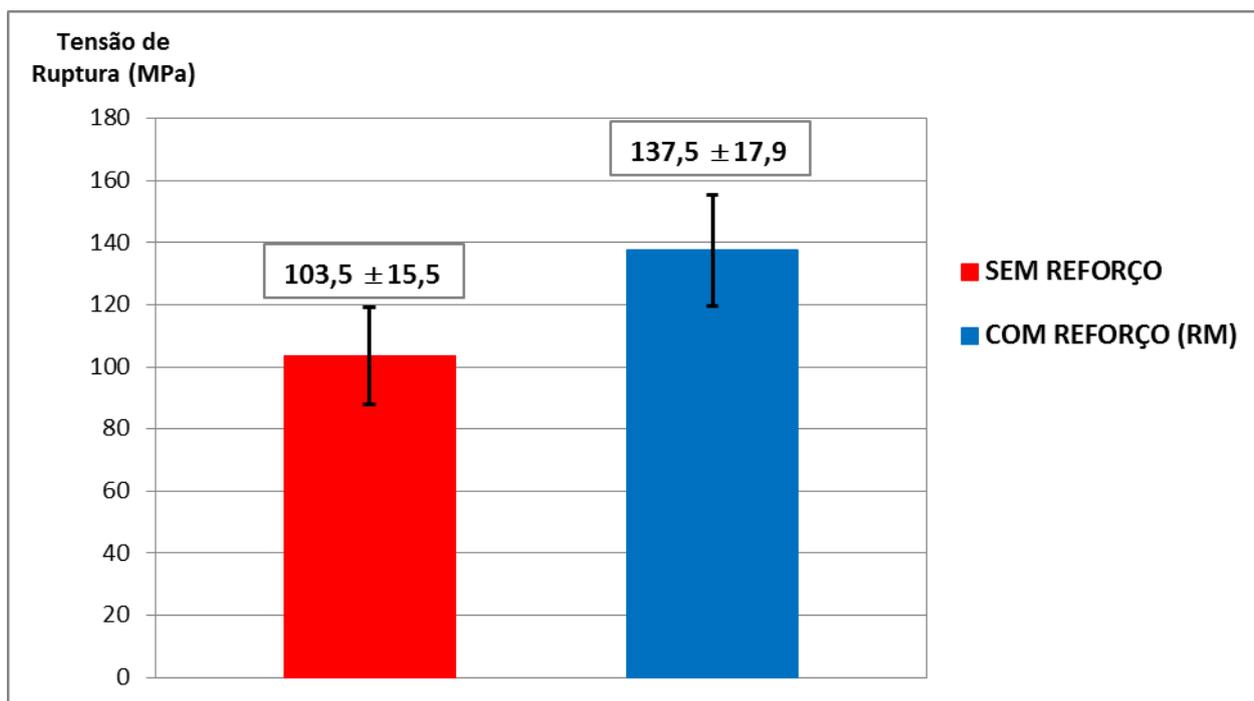
Fonte: Própria autora

Tabela 10 – Valores médios das Tensões de Ruptura à Tração (em MPa)

	Taliscas sem reforço	Taliscas com reforço colado com Resina à base de óleo de Mamona (RM)
Tensão de Ruptura à Tração (MPa)	103,5	137,5
Desvio Padrão (MPa)	± 15,5	± 17,9

Fonte: Própria autora

Figura 87 – Tensões (em MPa), relacionadas à seção transversal fora do reforço com dimensão de $\pm(2 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm})$



Fonte: Própria autora

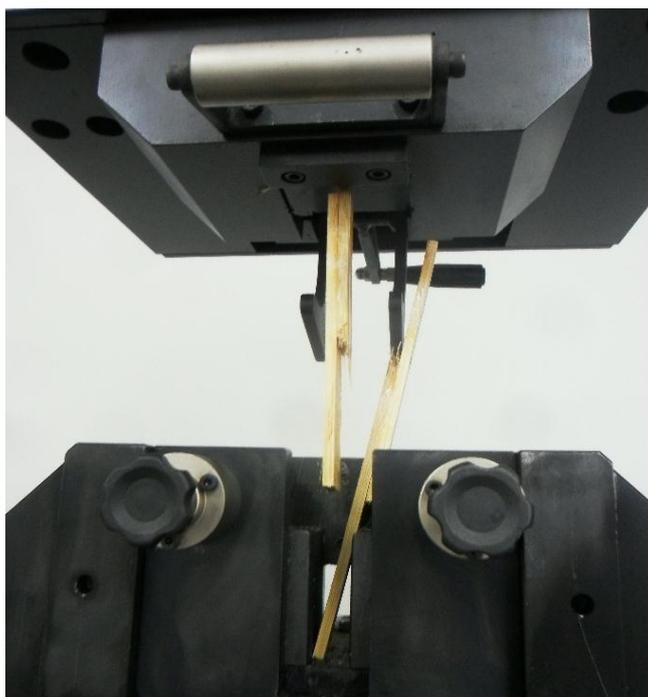
Observou-se que a média das forças aplicadas nas amostras reforçadas nos nós, colados com Resina à base de óleo de Mamona (RM), foi 20,0% maior em relação à média apresentada pelas amostras sem reforço; o desvio padrão também apresentou um valor maior, sendo igual a 63,7%.

Comparando-se as tensões normais, as amostras reforçadas nos nós obtiveram um acréscimo de 32,9% em relação às sem reforço; o desvio padrão também apresentou um valor 15,5% maior.

Durante os ensaios, observou-se que a cola utilizada para fixar os pedaços que constituíam o reforço rompia por cisalhamento, induzindo, logo em seguida, a ruptura das taliscas no nó; assim como as amostras sem reforço. As amostras com reforços colados com Resina de Mamona (RM) obtiveram um aumento na média da tensão de ruptura, porém apresentaram desvios maiores. Na Figura 88, tem-se uma visão do corpo de prova rompido. Na Figura 89, pôde-se observar o padrão de ruptura dos corpos de prova:

- taliscas sem reforço: ruptura no nó;
- taliscas com reforço: descolamento do reforço e ruptura da talisca na região do nó.

Figura 88 – Corpo de prova rompido



Fonte: Própria autora

Figura 89 – Taliscas após sofrerem a ruptura



(a) Taliscas sem reforço



(b) Taliscas com reforço

Fonte: Própria autora

4.7 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Durante a concretagem das **VIGAS REFERÊNCIA**, foram moldados 25 corpos de prova, com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura:

- aos 7 dias, 4 deles foram usados para determinar a resistência à compressão axial;
- aos 28 dias, 6 deles foram usados para determinar a resistência à compressão axial (sendo que, desses 6, 5 foram também usados para determinar o módulo de elasticidade), 4 deles foram usados para determinar a resistência à tração por compressão diametral, e outros 4 foram usados para determinar o teor de absorção de água por imersão;
- aos 360 dias, 4 deles foram usados para determinar a resistência à compressão axial (sendo que, desses 4, 3 foram também usados para determinar o módulo de elasticidade), e os últimos 3 foram usados para determinar a resistência à tração por compressão diametral. Destaca-se que os 7 corpos de prova ensaiados nesta data foram retirados da câmara úmida após 28 dias e colocados em um ambiente interno seco.

Durante a concretagem das **VIGAS BAMBU**, foram moldados 22 corpos de prova, com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura:

- aos 7 dias, 4 deles foram usados para determinar a resistência à compressão axial;
- aos 28 dias, 4 deles foram usados para determinar a resistência à compressão axial (sendo que, desses 4, 3 foram também usados para determinar o módulo de elasticidade), 3 deles foram usados para determinar a resistência à tração por compressão diametral, e outros 4 foram usados para determinar o teor de absorção de água por imersão;
- aos 360 dias, 4 deles foram usados para determinar a resistência à compressão axial (sendo que, desses 4, 3 foram também usados para determinar o módulo de elasticidade), e os últimos 3 foram usados para determinar a resistência à tração por compressão diametral. Destaca-se

que os 7 corpos de prova ensaiados nesta data foram retirados da câmara úmida após 28 dias e colocados em um ambiente interno seco.

Na concretagem das **VIGAS BAMBU REFORÇADO**, foram moldados 21 corpos de prova: a única diferença com relação às VIGAS BAMBU foi que, aos 7 dias, apenas 3 corpos de prova foram usados para terminar a resistência à compressão axial.

As Tabelas 11 e 12 apresentam os resultados obtidos. Nota-se que os valores das resistências à compressão atingiram o valor mínimo de 25 MPa aos 28 dias, estando próximos entre si, o que permite uma comparação direta entre as vigas. Os valores referentes a cada corpo de prova são apresentados no Anexo IV.

Tabela 11 – Propriedades mecânicas do concreto utilizado na elaboração das vigas aos 7 e 28 dias.

	Resist. à compr. axial aos 7 dias (MPa)	Resist. à compr. axial aos 28 dias (MPa)	Mód. de Elasticidade aos 28 dias (GPa)	Resist. à tração por compr. diametral aos 28 dias (MPa)	Absorção de água aos 28 dias (%)
Concreto usado nas VIGAS REFERÊNCIA	16,65 ± 0,52	25,43 ± 0,51	31,47 ± 0,65	2,71 ± 0,24	5,15 ± 1,07
Concreto usado nas VIGAS BAMBU	17,42 ± 0,13	26,35 ± 0,43	28,44 ± 1,50	3,04 ± 0,46	7,00 ± 0,14
Concreto usado nas VIGAS BAMBU REFORÇADO	16,89 ± 0,04	27,58 ± 0,95	27,93 ± 5,30	3,13 ± 0,52	4,90 ± 1,43

* Para desvios relativos máximos superiores a 6%, foram desconsiderados os valores discrepantes e calculadas novas médias, conforme prescreve o item 3.6.4 da NBR 7215 (ABNT, 1997).

Fonte: Própria autora

Tabela 12 – Propriedades mecânicas do concreto utilizado na elaboração das vigas aos 360 dias

	Resistência à compr. axial aos 360 dias (MPa)	Módulo de Elasticidade aos 360 dias (GPa)	Resist. à tração por compr. diametral aos 360 dias (MPa)
Concreto usado nas VIGAS REFERÊNCIA	32,47 ± 0,37	29,34 ± 1,20	3,25 ± 0,32
Concreto usado nas VIGAS BAMBU	33,37 ± 0,55	28,91 ± 1,25	3,21 ± 0,46
Concreto usado nas VIGAS BAMBU REFORÇADO	34,67 ± 0,48	30,09 ± 1,05	2,73 ± 0,28

* Para desvios relativos máximos superiores a 6%, foram desconsiderados os valores discrepantes e calculadas novas médias, conforme prescreve o item 3.6.4 da NBR 7215 (ABNT, 1997).

Fonte: Própria autora

4.8 RESULTADOS DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO

Os gráficos da tensão normal e da tensão de aderência correspondentes ao ensaio de arrancamento estão apresentados nas Figuras 90 e 91, respectivamente.

Os corpos de prova numerados de 1 a 5 possuíam reforço em todos os nós (imersos e externos ao concreto); já os numerados de 6 a 10 possuíam reforço apenas nos nós externos ao concreto.

Os valores médios das tensões normais no instante da ruptura (ou do escorregamento) para os corpos de prova reforçados nos nós e sem reforço interno ao concreto foram de, respectivamente, **97,0 MPa** e **76,5 MPa**. Ou seja, a presença do reforço no nó interno ao concreto propiciou um aumento de **28%**.

Os valores médios das tensões de aderência no instante do escorregamento, para os corpos de prova sem reforço interno ao concreto, foi de **0,889 MPa**. Já para os corpos de prova reforçados em todos os nós, observou-se a ruptura por tração nas taliscas.

Considerando-se os corpos de prova reforçados em todos os nós (CPs de 1 a 5), foram observadas as seguintes formas de ruptura: para o CP 1, a

ruptura ocorreu no nó interno reforçado, conforme mostrado na Figura 92; para os CPs 2, 3 e 4, a ruptura ocorreu no nó externo reforçado, após o descolamento dos reforços, conforme mostrado na Figura 93. Por fim, para o CP 5, observou-se a ruptura da talisca, fora da região do nó, mais especificamente na região da sua fixação à garra da prensa, conforme mostrado na Figura 94, embora um dos reforços já apresentasse um descolamento.

Figura 90 – Ensaio de Arrancamento: Tensão Normal

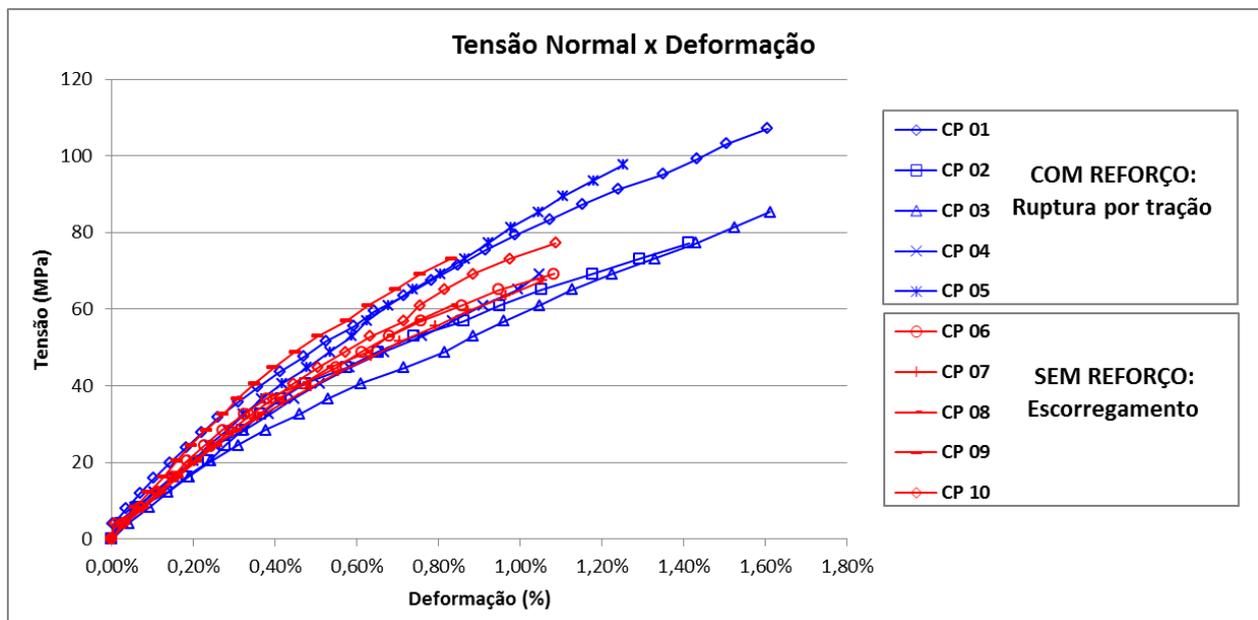
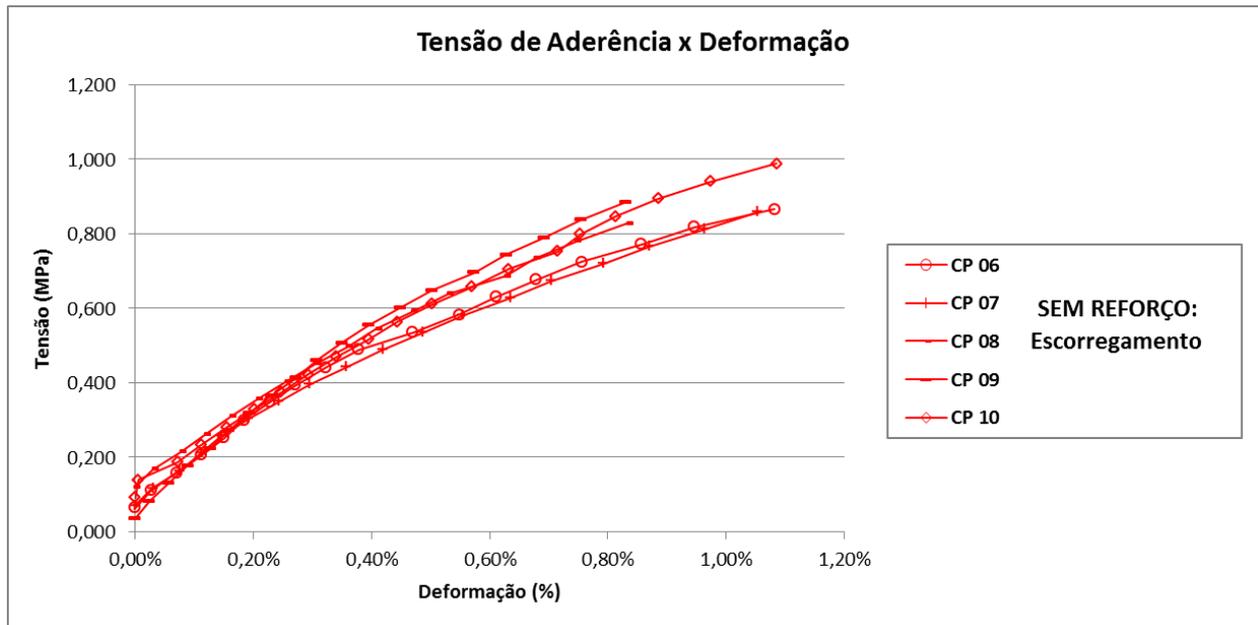


Figura 91 – Ensaio de Arrancamento: Tensão de Aderência, somente para os corpos de prova que sofreram escorregamento



Fonte: Própria autora

Figura 92 – Ruptura do nó interno reforçado (CP 1)



Fonte: Própria autora

Figura 93 – Ruptura do nó externo reforçado após o descolamento dos reforços (CPs 2, 3 e 4)



Fonte: Própria autora

Figura 94 – Ruptura na fixação da talisca à garra do equipamento, com descolamento do reforço em uma das faces da talisca (CP 5)



Fonte: Própria autora

Considerando-se os corpos de prova reforçados apenas nos nós externos ao concreto (CPs de 6 a 10), foi observado que todos os CPs sofreram um processo de escorregamento, conforme mostrado na Figura 95. Os valores obtidos para cada corpo de prova, bem como o tipo de ruptura observado, estão apresentados com detalhes no Anexo V.

Figura 95 – Escorregamento (CPs de 6 a 10)



Fonte: Própria autora

4.9 RESULTADOS DO ENSAIO DE FLEXÃO DAS VIGAS

Os principais parâmetros obtidos por meio dos ensaios das vigas encontram-se apresentados nas Tabelas 13 e 14, e nas Figuras 96 a 99.

Antes de apresentar os resultados, é importante mencionar que, quando uma flecha de 6 mm no meio do vão é atingida, correspondente à uma relação flecha/vão de $1/250$, considerou-se que a viga atingiu um Estado Limite de Serviço em função de um Deslocamento Visual Excessivo. Além disso, de modo a evitar a possibilidade de que o equipamento de medição pudesse ser danificado durante o ensaio, o relógio comparador foi retirado após uma flecha de 8 mm ter sido atingida.

Tabela 13 – Principais parâmetros obtidos no ensaio de flexão das vigas em relação aos Estados Limites Último, de Serviço (quando a flecha atinge o valor de 6 mm) e para a flecha máxima medida igual a 8 mm

VIGA		Momento de ruptura (kN.m) (E.L.Último)	Momento correspondente à flecha de 6 mm (kN.m) (E.L.Serviço)	Momento correspondente à flecha de 8 mm (kN.m)
REFERÊNCIA	1	4,671	3,551	4,225
	2	4,233	3,191	3,836
	3	4,405	3,341	3,897
Média		4,436	3,361	3,986
Desvio Padrão		± 0,180	± 0,148	± 0,171
BAMBU	1	6,191	3,769	4,298
	2*	-	-	-
	3	6,177	3,555	4,216
Média		6,184	3,662	4,257
Desvio Padrão		± 0,007	± 0,107	± 0,041
BAMBU REFORÇADO	1	7,132	3,621	4,527
	2*	-	-	-
	3	6,890	3,579	4,280
Média		7,011	3,600	4,404
Desvio Padrão		± 0,121	± 0,021	± 0,124
* Optou-se por ensaiar a VIGA BAMBU 2 e a VIGA BAMBU REFORÇADO 2 com uma idade mais avançada, acima de 360 dias, de modo a se ter uma indicação se o tempo irá afetar a resistência das taliscas e, conseqüentemente, das vigas.				

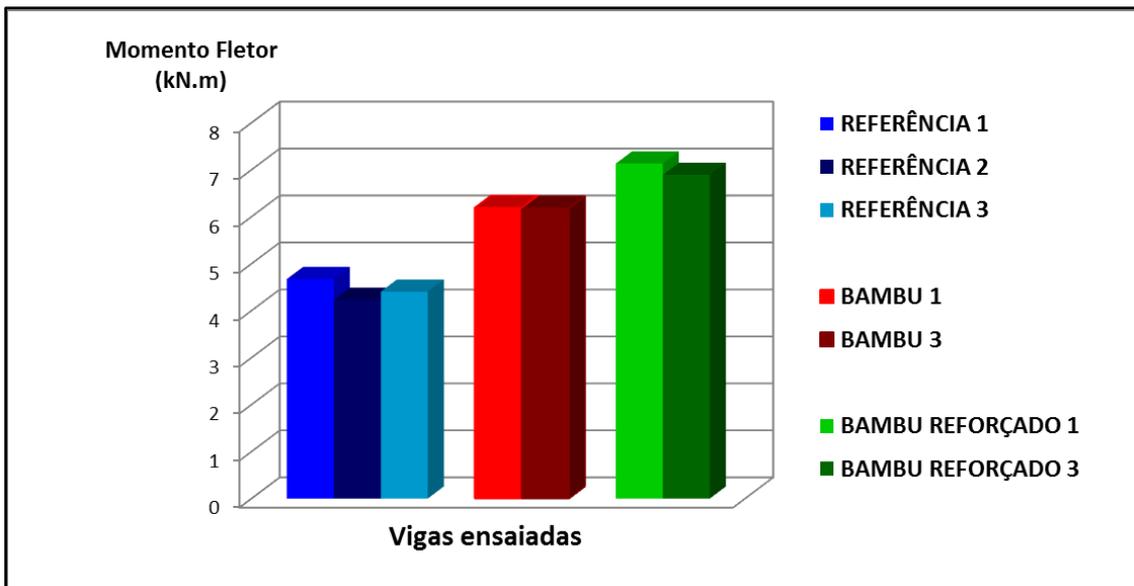
Fonte: Própria autora

Tabela 14 – Principais parâmetros obtidos no ensaio de flexão das vigas em relação ao momento e a flecha do momento correspondente à 1ª fissuração

VIGA		Momento correspondente à 1ª fissura (kN.m)	Flecha do momento correspondente à 1ª fissura (mm)
REFERÊNCIA	1	1,411	0,51
	2	1,333	0,45
	3	1,392	0,76
Média		1,379	0,58
Desvio Padrão		± 0,033	± 0,13
BAMBU	1	1,206	0,45
	2*	-	-
	3	1,210	0,75
Média		1,208	0,60
Desvio Padrão		± 0,002	± 0,15
BAMBU REFORÇADO	1	0,942	0,45
	2*	-	-
	3	1,126	0,64
Média		1,034	0,55
Desvio Padrão		± 0,092	± 0,09
<p>* Optou-se por ensaiar a VIGA BAMBU 2 e a VIGA BAMBU REFORÇADO 2 com uma idade mais avançada, acima de 360 dias, de modo a se ter uma indicação se o tempo irá afetar a resistência das taliscas e, conseqüentemente, das vigas.</p>			

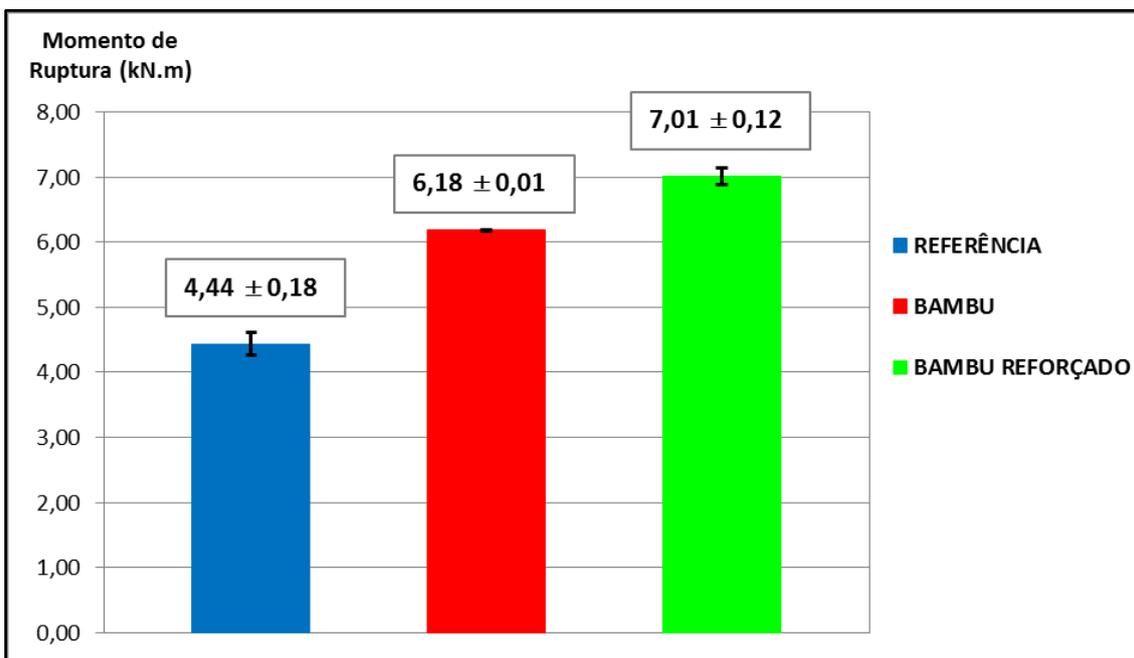
Fonte: Própria autora

Figura 96 – Gráfico comparativo do momento fletor máximo (ruptura) suportado para cada viga ensaiada



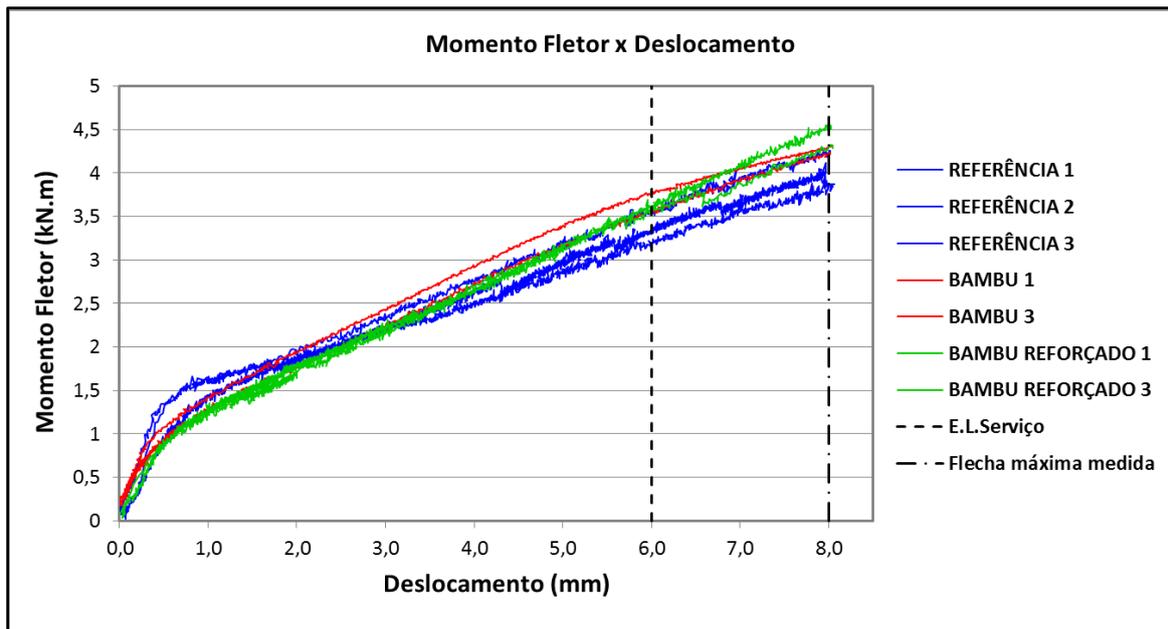
Fonte: Própria autora

Figura 97 – Gráfico comparativo dos valores médios e dos desvios do momento fletor de ruptura das vigas ensaiadas



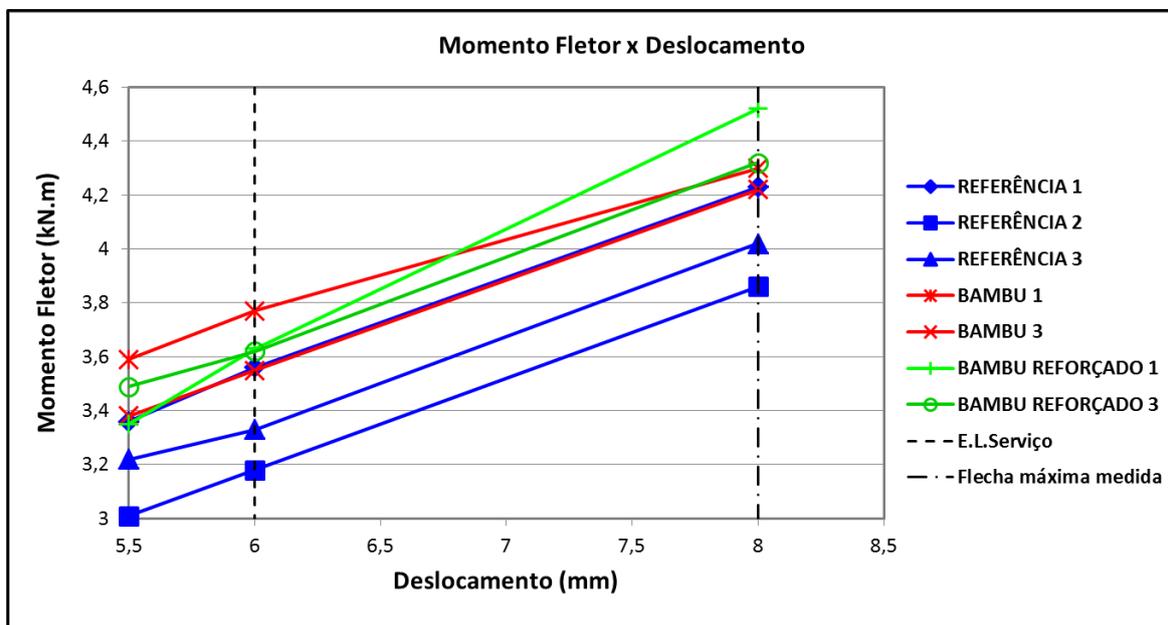
Fonte: Própria autora

Figura 98 – Gráfico comparativo da curva “Carga x Deslocamento (ou flecha)” de todas as vigas ensaiadas



Fonte: Própria autora

Figura 99 – Detalhe do gráfico comparativo da curva “Carga x Deslocamento (ou flecha)” de todas as vigas ensaiadas para as flechas de 6 mm e 8 mm

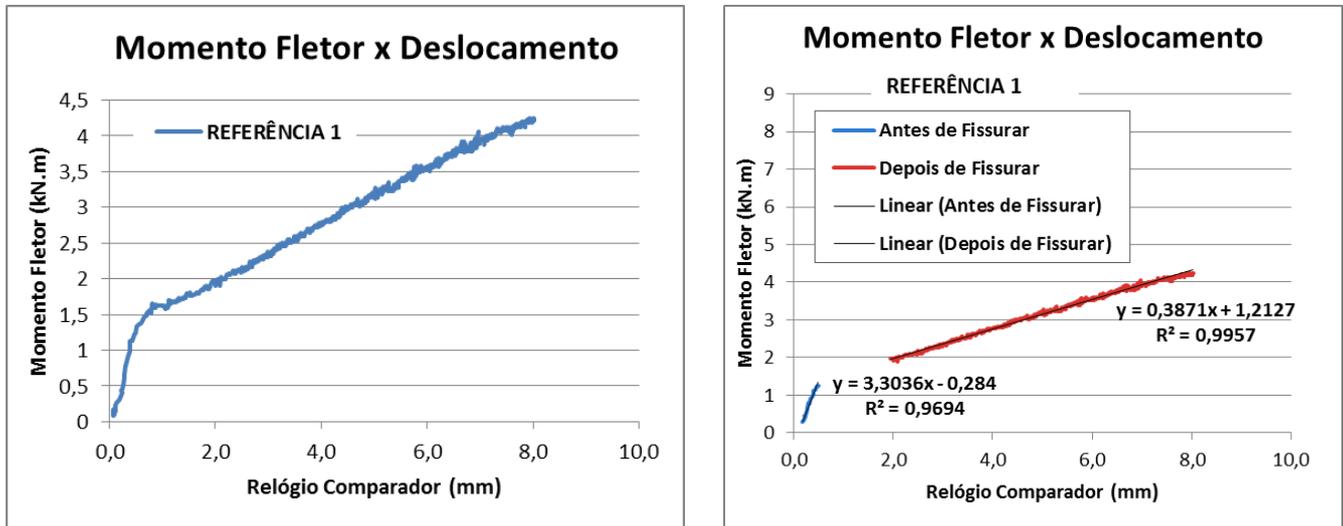


Fonte: Própria autora

Nas Figuras 100 a 106, ilustra-se o procedimento para a obtenção do momento correspondente ao início da fissuração, baseado nas leituras dos deslocamentos. A partir do gráfico “Momento Fletor x Deslocamento”, definem-se duas retas correspondentes ao período anterior da fissuração e posterior a

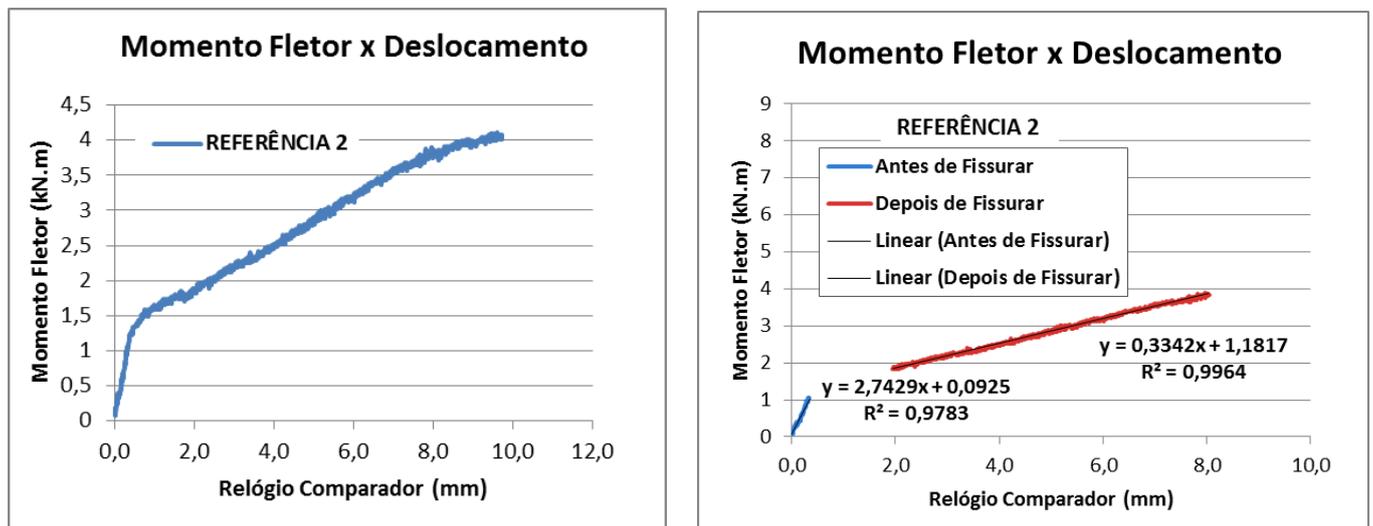
ela. O encontro dessas retas definiu a flecha e o momento a partir da qual a fissuração ocorreu.

Figura 100 – Esquema utilizado para a obtenção do valor do momento de fissuração a partir da leitura dos deslocamentos da VIGA REFERÊNCIA 1



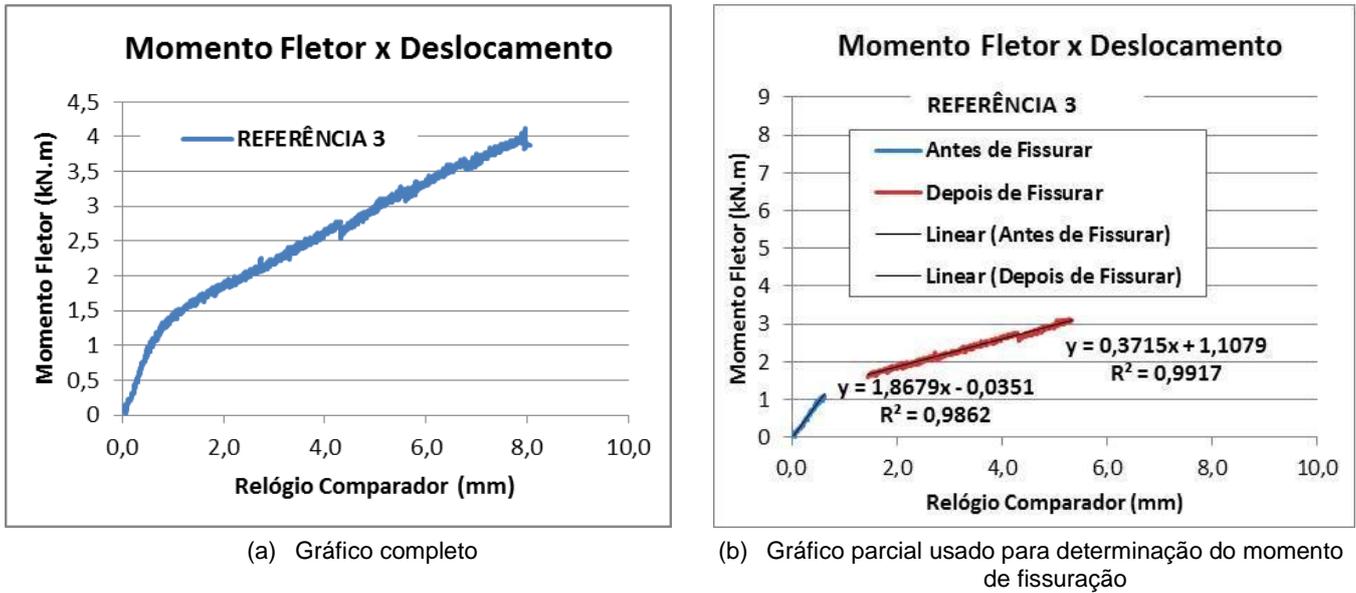
Fonte: Própria autora

Figura 101 – Esquema utilizado para a obtenção do valor do momento de fissuração a partir da leitura dos deslocamentos da VIGA REFERÊNCIA 2



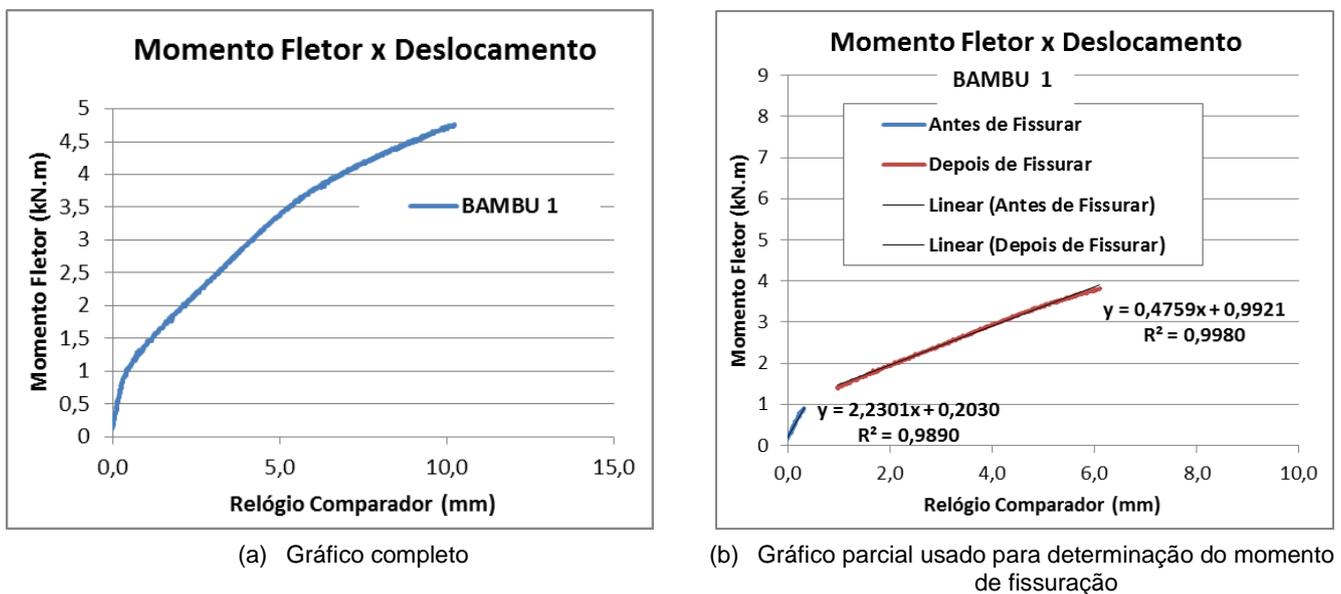
Fonte: Própria autora

Figura 102 – Esquema utilizado para a obtenção do valor do momento de fissuração a partir da leitura dos deslocamentos da VIGA REFERÊNCIA 3



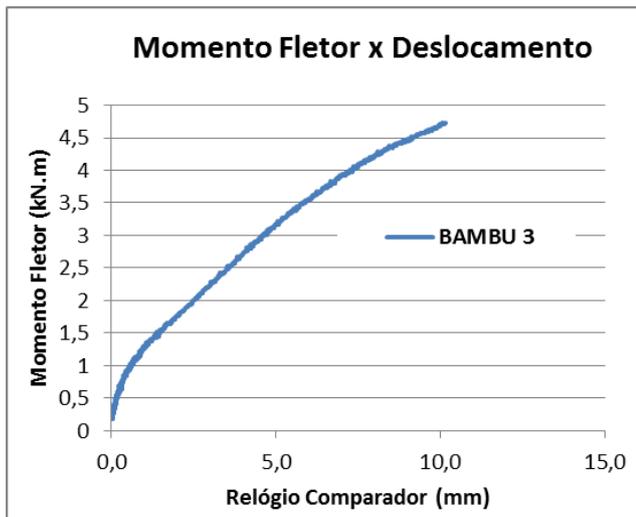
Fonte: Própria autora

Figura 103 – Esquema utilizado para a obtenção do valor do momento de fissuração a partir da leitura dos deslocamentos da VIGA BAMBU 1

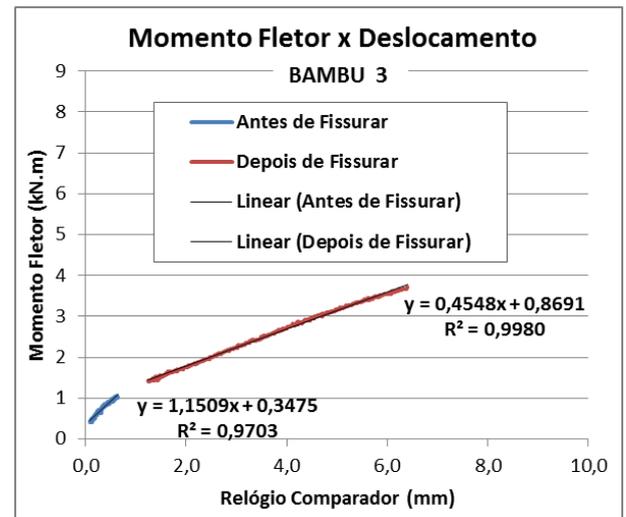


Fonte: Própria autora

Figura 104 – Esquema utilizado para a obtenção do valor do momento de fissuração a partir da leitura dos deslocamentos da VIGA BAMBU 3



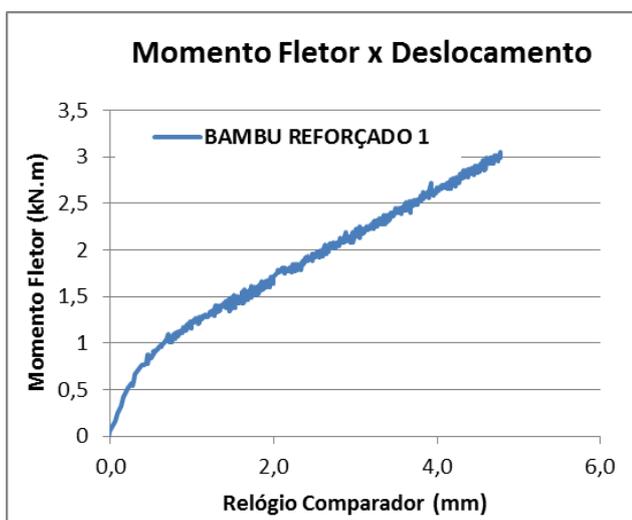
(a) Gráfico completo



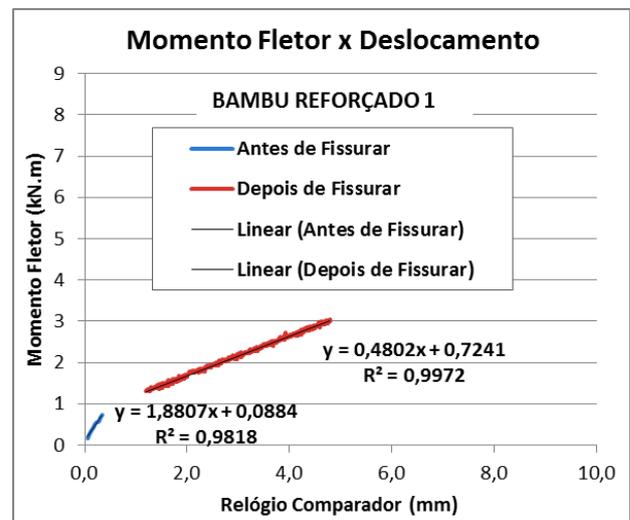
(b) Gráfico parcial usado para determinação do momento de fissuração

Fonte: Própria autora

Figura 105 – Esquema utilizado para a obtenção do valor do momento de fissuração a partir da leitura dos deslocamentos da VIGA BAMBU REFORÇADO 1



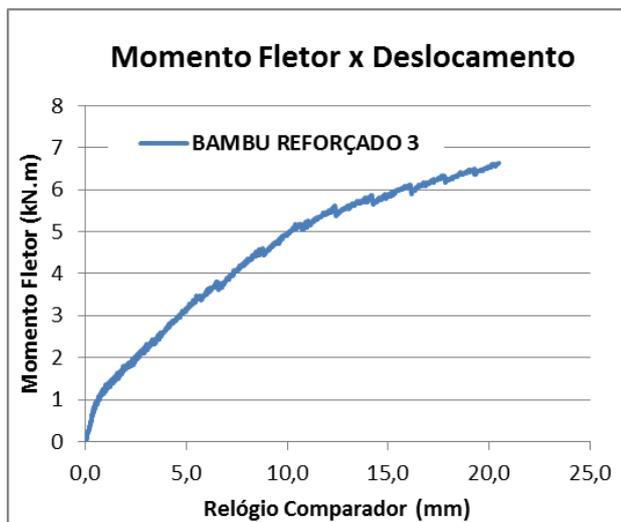
(c) Gráfico completo



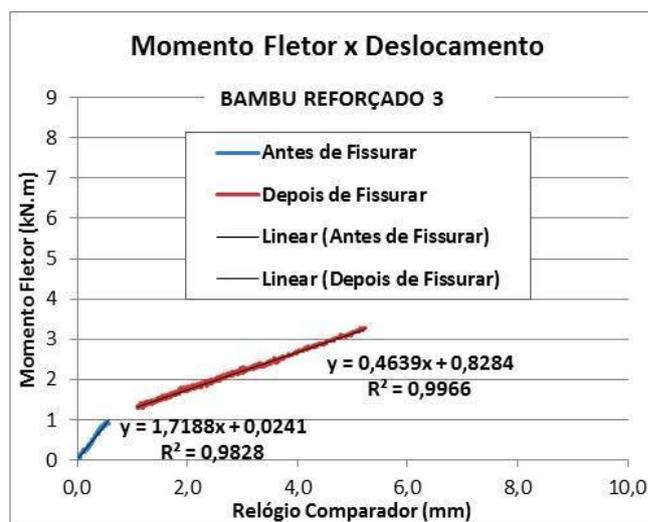
(d) Gráfico parcial usado para determinação do momento de fissuração

Fonte: Própria autora

Figura 106 – Esquema utilizado para a obtenção do valor do momento de fissuração a partir da leitura dos deslocamentos da VIGA BAMBU REFORÇADO 3



(c) Gráfico completo



(d) Gráfico parcial usado para determinação do momento de fissuração

Fonte: Própria autora

A partir dos resultados obtidos, já apresentados nas Tabelas 13 e 14, pôde-se verificar que o reforço adicional de taliscas de bambu impermeabilizadas com látex sem reforço nos nós proporcionou um aumento de **39,4%** na resistência da viga, referente à maior carga que ela pôde suportar.

Com relação ao Estado Limite de Serviço, ocorrido quando a flecha no meio do vão atingia o valor de 6 mm, pôde-se observar que a presença do reforço adicional de taliscas de bambu sem reforço nos nós proporcionou um acréscimo de 8,9%. Isso significa que esse Estado Limite de Serviço seria atingido primeiro para a VIGA REFERÊNCIA e somente depois para a VIGA BAMBU.

Para uma flecha de 8 mm (valor máximo medido antes da retirada do equipamento), pôde-se observar que o reforço adicional de taliscas de bambu sem reforço nos nós proporcionou um acréscimo de 6,8%.

Com relação ao início da fissuração, o efeito do bambu não é favorável: o momento de fissa para a VIGA BAMBU ocorreu com um valor 12,4% menor que o da VIGA REFERÊNCIA. Este fato é coerente, uma vez que o espaço que o bambu ocupa na região tracionada da seção transversal poderia estar preenchido pelo concreto e, quanto maior a quantidade de concreto nessa

região, maior será a carga e o momento necessário para fissurá-la. Observa-se que a flecha correspondente ao início da fissuração é praticamente a mesma.

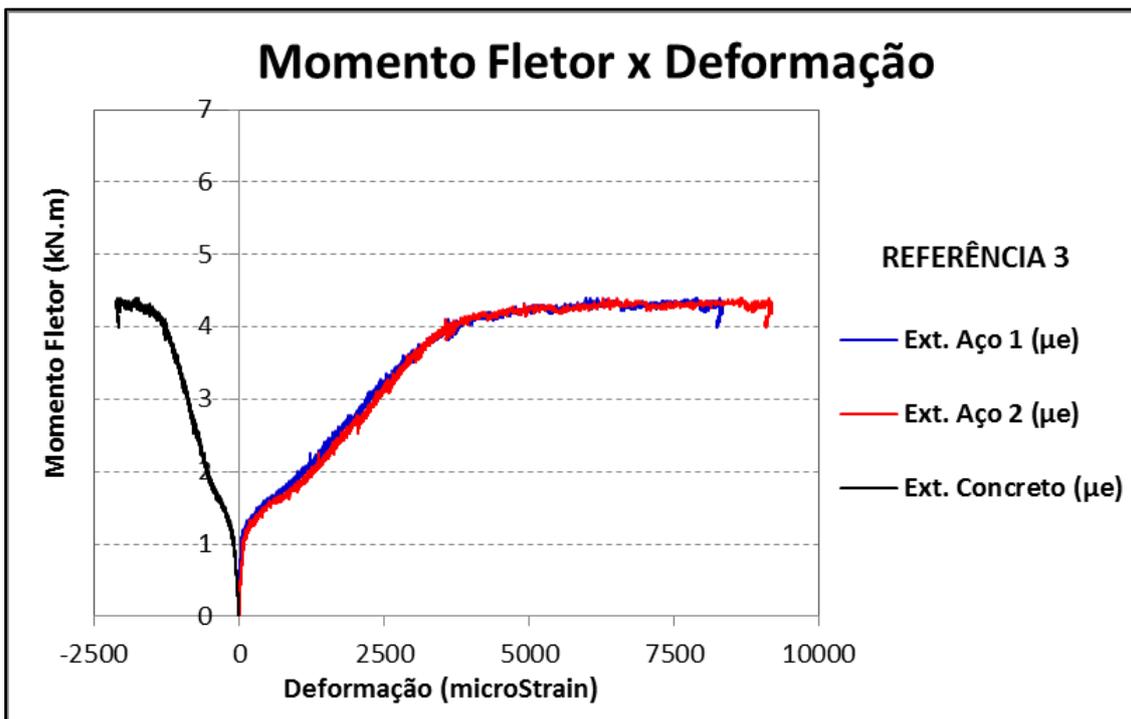
Com relação às VIGAS BAMBU REFORÇADO, pôde-se verificar que o reforço adicional de taliscas de bambu impermeabilizadas com látex e reforçadas nos nós proporcionou um aumento de **58%** na resistência da viga, referente à maior carga que ela pôde suportar.

No que diz respeito ao momento correspondente a uma flecha de 6 mm no meio do vão (Estado Limite de Serviço), pôde-se observar que a presença do reforço proporcionou um acréscimo de 7,1%. Isso significa que esse Estado Limite de Serviço seria atingido primeiro para a VIGA REFERÊNCIA e somente depois para a VIGA BAMBU REFORÇADO. Para uma flecha de 8 mm, pôde-se observar que o reforço adicional de taliscas de bambu com reforço nos nós proporcionou um acréscimo de 10,5%.

No que tange ao início da fissuração, o efeito do bambu não é favorável, conforme já mencionado anteriormente: o momento de fissuração para a VIGA BAMBU REFORÇADO ocorreu com um valor 25% menor que o da VIGA REFERÊNCIA. Observa-se que a flecha em que a fissuração ocorre é praticamente a mesma.

A instrumentação para avaliação das deformações no concreto, na armadura longitudinal inferior e nas taliscas de bambu, deu-se por meio de extensômetros elétricos que foram posicionados no meio do vão. As Figuras 107, 108 e 109 apresentam os dados obtidos através dos extensômetros elétricos colocados nas VIGAS REFERÊNCIA 3, BAMBU 3 e BAMBU REFORÇADO 3, respectivamente.

Figura 107 – Dados dos extensômetros elétricos colocados na VIGA REFERÊNCIA 3

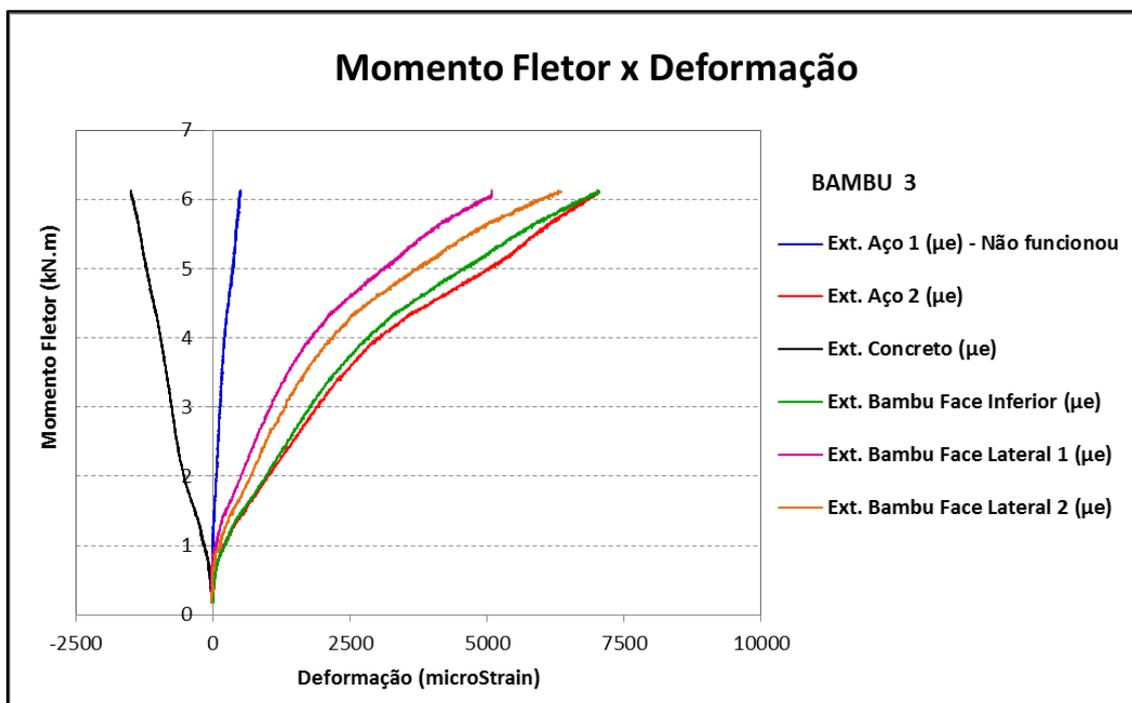


Fonte: Própria autora

No caso da VIGA REFERÊNCIA 3, para a armadura tracionada na situação correspondente ao momento fletor último, observou-se um patamar típico de escoamento, com deformações acima de 8 por mil.

O concreto apresenta comportamento linear e somente próximo à ruptura ocorre uma súbita elevação da linha neutra, e, conseqüentemente, uma redução da área de concreto comprimido e seu esmagamento. Antes do início do esmagamento, a deformação no concreto foi de 1,25 por mil.

Figura 108 – Dados dos extensômetros elétricos colocados na VIGA BAMBU 3



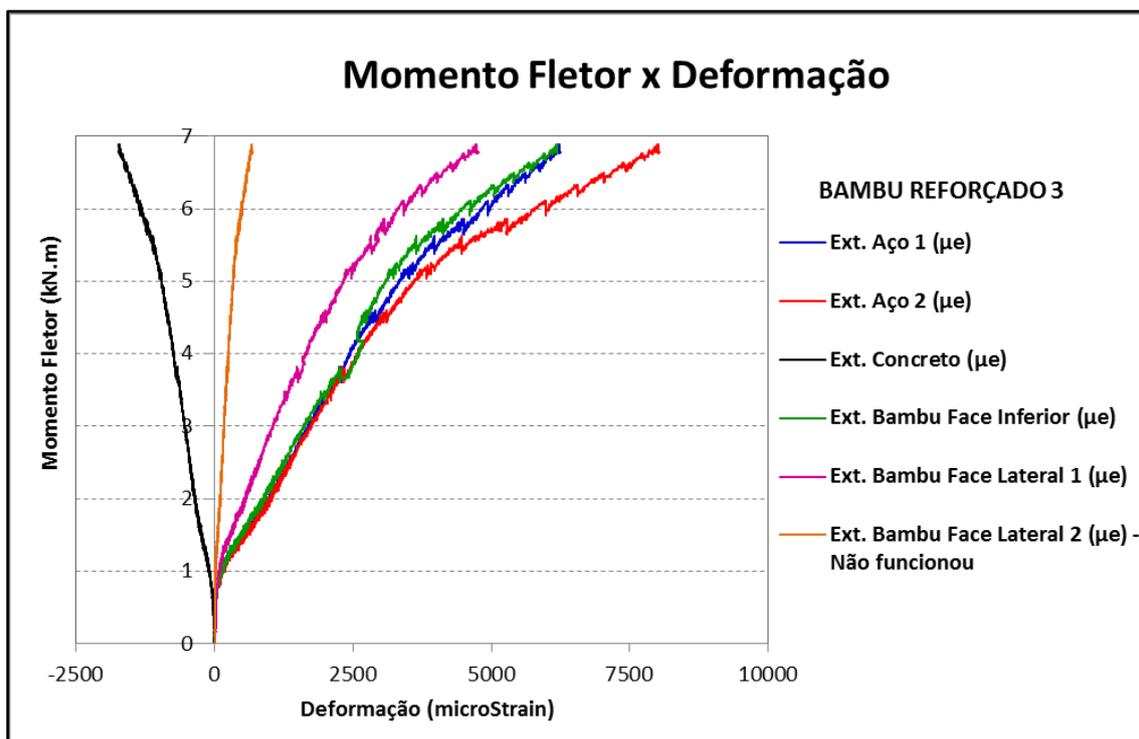
Fonte: Própria autora

Na VIGA BAMBU 3, com taliscas de bambu sem reforço nos nós, a deformação no concreto foi de 1,5 por mil. Já a do aço, foi de 7,2 por mil, que praticamente coincidiu com a deformação no bambu inferior, o que demonstra que o bambu estava bem aderido ao concreto.

Já o bambu lateral apresentou uma deformação acima de 5,2 por mil, valor este coerente, uma vez que a posição do seu centro de gravidade estava acima do bambu colocado junto à face inferior da viga.

Em função do bambu absorver parte do esforço de tração, a deformação no aço pôde ser menor. Este fato que pôde ser notado porque não foi observado um patamar de escoamento bem definido como na VIGA REFERÊNCIA 3, mas um início de plastificação. Novamente, o que se observa é o esmagamento do concreto decorrente da subida da linha neutra, mas com uma deformação maior que a da VIGA REFERÊNCIA 3, por causa da maior força resultante de concreto comprimido de modo a equilibrar a resultante de tração proporcionada pela armadura e pelo bambu.

Figura 109 – Dados dos extensômetros elétricos colocados na VIGA BAMBU REFORÇADO 3



Fonte: Própria autora

O comportamento observado para o bambu com reforço nos nós foi o mesmo que o observado para o bambu sem reforço. Na VIGA BAMBU REFORÇADO 3, a deformação no concreto foi de 1,73 por mil. Já a do aço, foi acima de 6,25 por mil, que praticamente coincidiu com a deformação do bambu posicionado na face inferior da viga, o que demonstra que o bambu estava bem aderido ao concreto.

Já o bambu lateral apresentou uma deformação de 4,75 por mil, valor este coerente, uma vez que a posição do seu centro de gravidade estava acima do bambu inferior (e do aço).

Assim como na VIGA BAMBU 3, devido ao fato do bambu absorver parte do esforço de tração, a deformação no aço pôde ser menor. Para a armadura, não foi observado um patamar de escoamento bem definido como na VIGA REFERÊNCIA 3, mas um início de plastificação. Mais uma vez, o que se observa é o esmagamento do concreto decorrente da subida da linha neutra, com uma deformação no concreto maior que a da VIGA REFERÊNCIA 3 e, por sua vez, maior que a da VIGA BAMBU 3, por causa da maior força resultante

de concreto comprimido de modo a equilibrar a resultante de tração proporcionada pela armadura e pelo bambu.

4.10 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MOMENTOS FLETORES RESISTENTES CALCULADO E EXPERIMENTAL

4.10.1 Vigas Referência

A seção transversal das VIGAS REFERÊNCIA é definida na Figura 110, que também mostra as forças internas geradas pelo momento solicitante e que por sua vez, são usadas no cálculo do equilíbrio. Os dados para o cálculo do momento resistente (M_{calc}) são apresentados na Tabela 15.

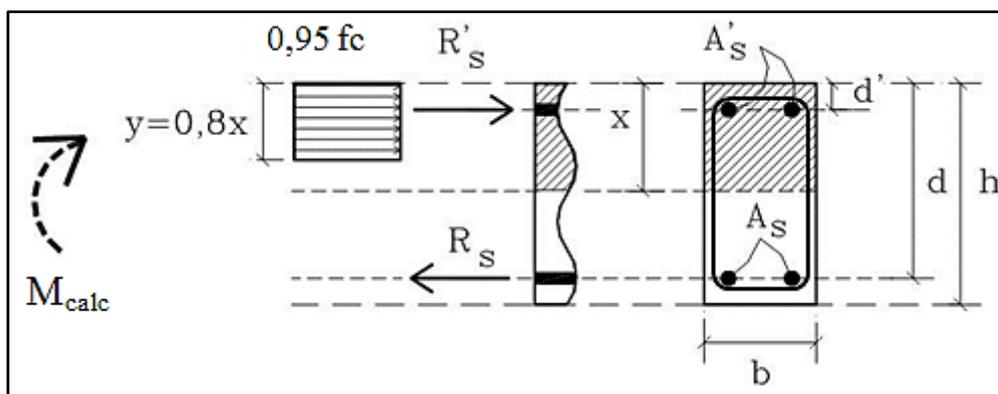
Tabela 15 – Dados para o cálculo do Momento Resistente (M_{calc}) das VIGAS REFERÊNCIA

VIGAS REFERÊNCIA		
Parâmetro	Unidade	Valor
Resistência média à compressão do concreto (f_c)	MPa	25,43
Área de armadura comprimida (A_s')	cm ²	0,2770
Tensão de escoamento do aço comprimido (f_y')	kN/cm ²	69,49
Módulo de elasticidade da armadura comprimida (E_s')	kN/cm ²	18944
Deformação de escoamento da armadura comprimida (ϵ_y')	‰	3,67
Área de armadura tracionada (A_s)	cm ²	0,3928
Tensão de escoamento do aço tracionado (f_y)	kN/cm ²	59,28
Módulo de elasticidade da armadura tracionada (E_s)	kN/cm ²	16847
Deformação de escoamento da armadura tracionada (ϵ_y)	‰	3,52
Largura da viga (b)	cm	12,4
Altura da viga (h)	cm	15,0
Altura útil da seção (d)	cm	13,33
Profundidade da armadura comprimida (d')	cm	1,63

Profundidade da linha neutra (x)	cm	1,07
Deformação da armadura tracionada (ϵ_s)	‰	10
Deformação da armadura comprimida (ϵ_s')	‰	-0,4568
Deformação do concreto (ϵ_c)	‰	0,8728
Tensão na armadura tracionada (σ_s)	kN/cm ²	59,28
Tensão na armadura comprimida (σ_s')	kN/cm ²	-8,65
Resultante da armadura tracionada (R_s)	kN	23,29
Resultante do concreto comprimido (R_c)	kN	25,64
Resultante da armadura comprimida (R_s')	kN	-2,40
Momento Fletor Resistente Calculado (M_{calc})	kN.cm	303,28
Média do Momento Fletor Resistente Experimental (M_{exp})	kN.cm	443,60

Fonte: Própria autora

Figura 110 – Esquema da seção transversal e esforços no concreto e nas armaduras tracionada e comprimida das VIGAS REFERÊNCIA



Fonte: Própria autora

Segundo Fusco (1995), para a avaliação da segurança das estruturas, especialmente nos problemas de flexão, simples ou composta, no Estado Limite Último de ruptura do concreto comprimido, é admitido que no plano da seção transversal, pode atuar uma tensão de compressão de valor máximo igual a $0,85 f_{cd}$. Este coeficiente $k_{mod} = 0,85$, aplicado ao valor de f_{cd} , representa o produto de três outros coeficientes:

- $k_{mod} = k_{mod,1} \cdot k_{mod,2} \cdot k_{mod,3}$; onde:

- $k_{\text{mod},1} = 1,2$ (coeficiente que leva em conta o acréscimo de resistência do concreto após os 28 dias de idade);
- $k_{\text{mod},2} = 0,95$ (coeficiente que leva em conta o fato de que a resistência medida nos corpos de prova é superestimada, devido ao atrito do corpo de prova com os pratos da prensa de ensaio);
- $k_{\text{mod},3} = 0,75$ (coeficiente que leva em conta o efeito deletério da ação de cargas de longa duração).

Deste modo, nos estados limites últimos de ruptura em que o concreto esteja praticamente submetido a estados de tensão de compressão simples, sua resistência última efetiva vale $0,85 f_{cd}$.

Considerando-se que no ensaio experimental se terá apenas a influência do coeficiente $k_{\text{mod},2}$, então a resistência experimental no estado limite último de solitação normal deverá ser igual a $0,95 f_c$. O dimensionamento dos modelos à flexão foi feito considerando-se o diagrama parábola-retângulo, tendo sido adotada a resistência média do concreto obtida no dia do ensaio.

A equação de equilíbrio (Equação 4.1) das forças internas é dada a seguir, na qual a força de tração deve ser igualada às forças de compressão:

$$R_s = R_s' + 0,95 \cdot f_c \cdot b \cdot 0,8 x \quad (4.1)$$

As resultantes nas armaduras podem ser obtidas a partir da Equação 4.2:

$$R_s = \sigma_s A_s; \text{ onde } \begin{array}{l} \sigma_s = \text{tensão na armadura tracionada} \\ A_s = \text{área de armadura tracionada} \end{array} \quad (4.2)$$

$$R_s' = \sigma_s' A_s'; \text{ onde } \begin{array}{l} \sigma_s' = \text{tensão na armadura comprimida} \\ A_s' = \text{área de armadura comprimida} \end{array}$$

Substituindo-se na Equação 4.1, tem-se que:

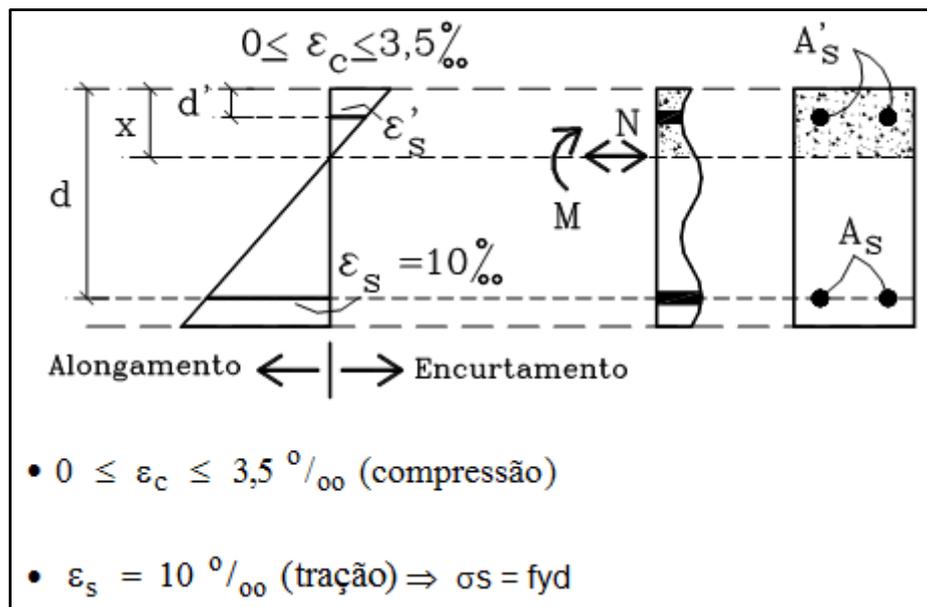
$$\sigma_s A_s = \sigma_s' A_s' + 0,76 \cdot f_c \cdot b \cdot x$$

Substituindo-se com os valores da Tabela 15, tem-se que (Equação 4.3):

$$0,3928 \sigma_s = 0,277 \sigma_s' + 23,9652 x \quad (4.3)$$

Considerando-se o domínio 2, em que a deformação no aço é igual a 10 por mil e a deformação no concreto deve ser menor ou igual a 3,5 por mil, pode-se, por meio de tentativas, adotar um determinado valor de “x” para que se possa calcular as deformações nas armaduras, por semelhança de triângulos (Equações 4.4 e 4.5). Um resumo dessas informações é apresentado na Figura 111.

Figura 111 – Deformações relacionadas ao domínio 2, para as VIGAS REFERÊNCIA



Fonte: Própria autora

Adotando-se $x = 1,07 \text{ cm}$

$$\frac{\varepsilon_s'}{x - d'} = \frac{10\text{‰}}{d - x} \rightarrow \frac{\varepsilon_s'}{1,07 - 1,63} = \frac{10\text{‰}}{13,33 - 1,07} \rightarrow \varepsilon_s' = 0,4568\text{‰} \quad (4.4)$$

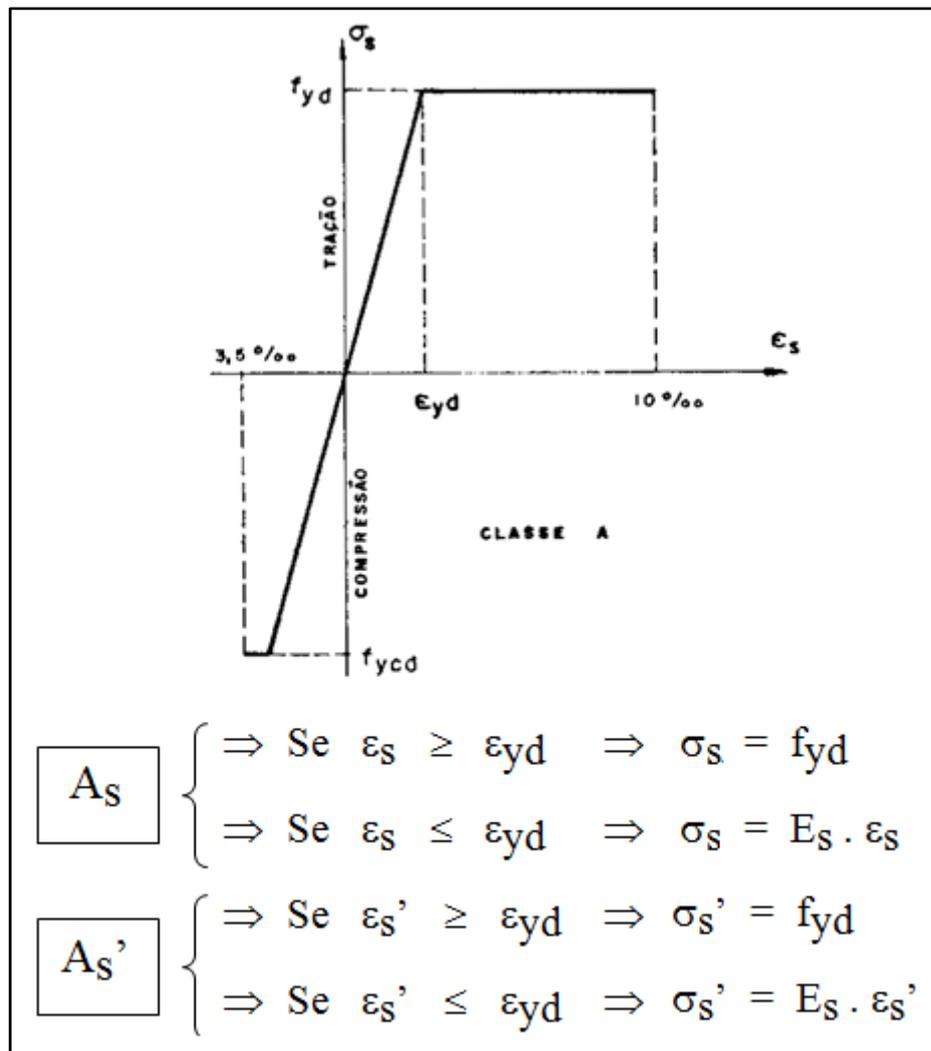
$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{10\text{‰}}{d - x} \rightarrow \frac{\varepsilon_c}{1,07} = \frac{10\text{‰}}{13,33 - 1,07} \rightarrow \varepsilon_c = 0,8728\text{‰} \quad (4.5)$$

$\varepsilon_s = 10\text{‰}$ (Hipótesedo domínio2)

Uma vez que a deformação no concreto obedece às limitações do domínio 2, pode-se proceder ao cálculo das tensões. O cálculo das tensões deve ser feito com base no diagrama “Tensão vs Deformação” do aço, mostrado na Figura 112.

A NBR 6118 (ABNT, 2014), no item 8.3.6, menciona que, para o cálculo nos Estados Limites de Serviço e Último, pode-se utilizar o diagrama simplificado mostrado também na Figura 112.

Figura 112 – Diagrama tensão vs deformação do aço usado nos cálculos



Fonte: Própria autora

Para o cálculo da tensão na armadura inferior, adota-se o valor correspondente à tensão de escoamento:

$$\sigma_s = 59,28 \text{ kN/cm}^2$$

Já para o cálculo da tensão na armadura superior tem-se que (Equação 4.6):

$$\epsilon_y' = f_y' / E_s' = 69,49 / 18944 = 3,67 \text{ ‰} > \epsilon_s' = 0,4568 \text{ ‰} \quad (4.6)$$

Portanto (Equação 4.7):

$$\sigma_s' = E_s' \cdot \varepsilon_s' = 18944 \cdot (-0,4568/1000) = -8,65 \text{ kN/cm}^2 \quad (4.7)$$

A tensão negativa indica que, na verdade, essa armadura estará com sinal oposto ao que lhe havia sido inicialmente estabelecido.

Substituindo-se na Equação 4.3, tem-se que:

$$23,29 \text{ kN} = 23,25 \text{ kN}$$

Como a diferença entre as resultantes tracionada e comprimida é de apenas 0,17%, pode-se considerar a igualdade satisfeita.

O próximo passo será calcular o valor do momento fletor (Equação 4.8):

$$M_{\text{calc}} = R_c \cdot (x - 0,4 \cdot x) + R_s' \cdot (x - d') + R_s \cdot (d - x) \quad (4.8)$$

Substituindo-se com os valores da Tabela 15, tem-se que:

$$M_{\text{calc}} = 25,64 \cdot (1,07 - 0,4 \cdot 1,07) + (-2,40) \cdot (1,07 - 1,63) + 23,29 \cdot (13,33 - 1,07)$$

$$M_{\text{calc}} = 16,46 + 1,34 + 285,48$$

$$M_{\text{calc}} = 303,28 \text{ kN.cm}$$

A partir do ensaio de flexão das VIGAS REFERÊNCIA, foi obtida a média do momento resistente experimental (M_{exp}), cujo valor obtido foi de 443,60 kN.cm. Comparando-se o momento resistente calculado (M_{calc}) com o Momento Resistente Experimental (M_{exp}), verificou-se uma diferença percentual a favor da segurança igual a 46,3%.

4.10.2 Vigas Bambu

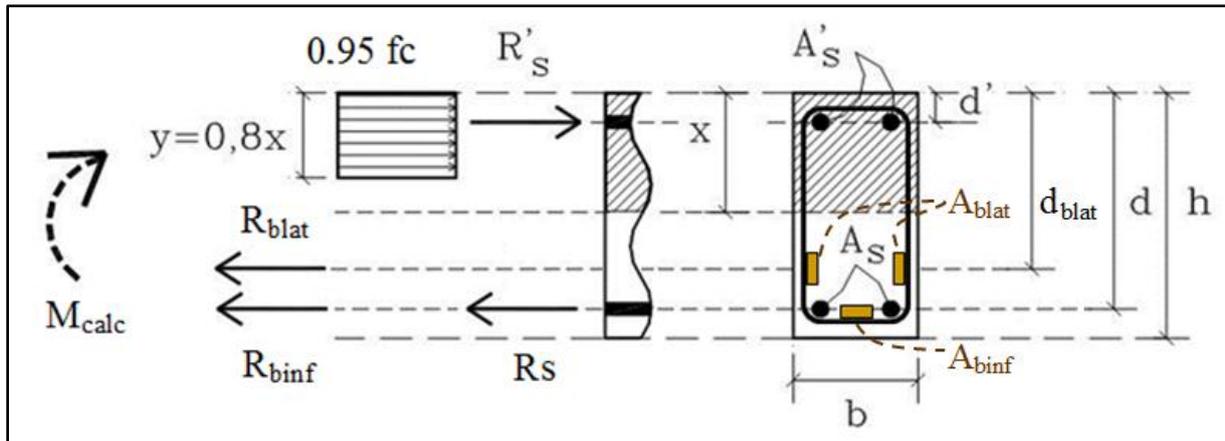
A seção transversal e as forças internas geradas pelo momento fletor solicitante que atua nas VIGAS BAMBU estão mostradas na Figura 113. Os dados relacionados às dimensões da viga e da armadura são os mesmos que os já apresentados na Tabela 15, razão pela qual são omitidos na Tabela 16.

Tabela 16 – Dados para o cálculo do Momento Resistente (M_{calc}) das VIGAS BAMBU

VIGAS BAMBU		
Parâmetro	Unidade	Valor
Resistência média à compressão do concreto (f_c)	MPa	26,35
Área do bambu inferior (A_{binf})	cm ²	1,00
Área do bambu lateral (A_{blat})	cm ²	2,00
Resistência à tração do bambu (f_b)	kN/cm ²	10,35
Profundidade do bambu inferior (d_{binf})	cm	13,33
Profundidade do bambu lateral (d_{blat})	cm	10,58
Profundidade da linha neutra (x)	cm	1,43
Deformação da armadura tracionada (ϵ_s)	‰	10
Deformação da armadura comprimida (ϵ_s')	‰	-0,1681
Deformação do concreto (ϵ_c)	‰	1,2017
Tensão na armadura tracionada (σ_s)	kN/cm ²	59,28
Tensão na armadura comprimida (σ_s')	kN/cm ²	-3,18
Tensão no bambu inferior (σ_{binf})	kN/cm ²	4,415
Deformação do bambu inferior (ϵ_{binf})	‰	10
Módulo de elasticidade do bambu (E_b)	kN/cm ²	441,5
Deformação do bambu lateral (ϵ_{blat})	‰	7,6891
Tensão no bambu lateral (σ_{blat})	kN/cm ²	3,39
Resultante da armadura tracionada (R_s)	kN	23,29
Resultante do concreto comprimido (R_c)	kN	35,51
Resultante da armadura comprimida (R_s')	kN	-0,88
Resultante do bambu inferior (R_{binf})	kN	4,415
Resultante do bambu lateral (R_{blat})	kN	6,789
Momento Fletor Resistente Calculado (M_{calc})	kN.cm	422,40
Média do Momento Fletor Resistente Experimental (M_{exp})	kN.cm	618,40

Fonte: Própria autora

Figura 113 – Esquema da seção transversal e esforços no concreto e nas armaduras tracionada e comprimida das VIGAS BAMBU



Fonte: Própria autora

A proposta, neste item, é determinar qual a tensão e o módulo de elasticidade que deveriam ser aplicados para que a relação entre o momento resistente experimental e o momento resistente calculado (M_{exp} / M_{calc}) fosse a mesma que a da situação das VIGAS REFERÊNCIA.

No caso, para as VIGAS REFERÊNCIA, a relação mencionada foi de 443,60 / 303,25 (igual a 1,463).

Para as VIGAS BAMBU, mantendo-se essa relação, e sabendo-se que o momento experimental (M_{exp}) foi de 618,40 kN.cm, adotou-se o valor do momento calculado como sendo igual à razão de 618,40 pelo coeficiente de 1,463, sendo igual a 422,69 kN.cm.

Por meio de tentativas, adotou-se um valor para a tensão de tração no bambu (σ_{binf}), quando submetido a uma deformação de 10 por mil, e, em seguida, calculou-se o valor do módulo de elasticidade do bambu (E_b), como demonstrado a seguir (Equação 4.9):

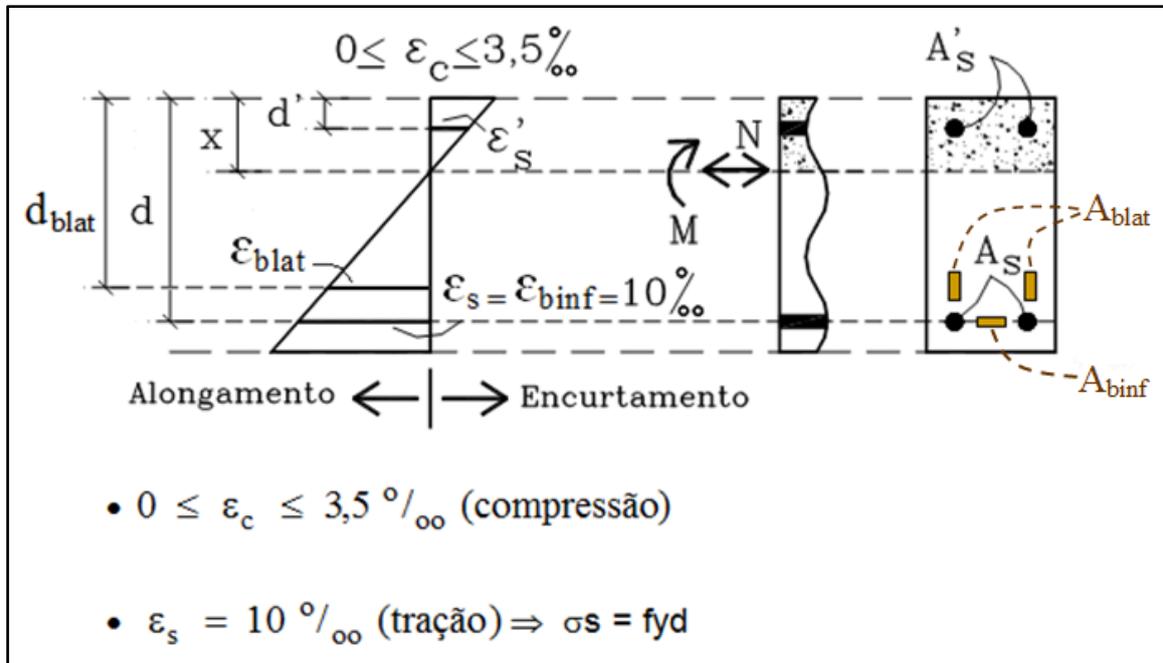
$$\sigma_{binf} = 4,415 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_b = \sigma_{binf} / \varepsilon_{binf} = 4,415 / (10/1000) = 441,5 \text{ kN/cm}^2 \quad (4.9)$$

Assim como no cálculo das VIGAS REFERÊNCIA, por meio de tentativas, adotou-se um determinado valor de "x" para que se pudessem calcular as deformações no bambu lateral e no aço comprimido, por semelhança de triângulos, de modo que a resultante de tração fosse igual à

resultante de compressão (Equações 4.4, 4.5 e 4.10). Considerando-se o domínio 2, um resumo dessas informações é apresentado na Figura 114.

Figura 114 – Deformações relacionadas ao domínio 2, das VIGAS BAMBU



Fonte: Própria autora

Adotando-se $x = 1,43$ cm

$$\frac{\varepsilon'_s}{x - d'} = \frac{10\text{‰}}{d - x} \rightarrow \frac{\varepsilon'_s}{1,43 - 1,63} = \frac{10\text{‰}}{13,33 - 1,43} \rightarrow \varepsilon'_s = -0,1681\text{‰} \quad (4.4)$$

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{10\text{‰}}{d - x} \rightarrow \frac{\varepsilon_c}{1,43} = \frac{10\text{‰}}{13,33 - 1,43} \rightarrow \varepsilon_c = 1,2017\text{‰} \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_s = 10\text{‰} \quad (\text{Hipótese do domínio 2})$$

E, portanto, também:

$$\varepsilon_{binf} = 10\text{‰} \quad (\text{Hipótese do domínio 2})$$

$$\frac{\varepsilon_{blat}}{d_{blat} - x} = \frac{10\text{‰}}{d - x} \rightarrow \frac{\varepsilon_{blat}}{10,58 - 1,43} = \frac{10\text{‰}}{13,33 - 1,43} \rightarrow \varepsilon_{blat} = 7,6891\text{‰} \quad (4.10)$$

Para o cálculo da tensão na armadura inferior, adotou-se o valor correspondente à tensão de escoamento:

$$\sigma_s = f_y = 59,28 \text{ kN/cm}^2$$

Já para o cálculo da tensão na armadura superior tem-se que (Equação 4.6):

$$\varepsilon_y' = f_y'/E_s' = 69,49/18944 = 3,67 \text{ } \text{‰} > \varepsilon_s' = -0,1681 \text{ } \text{‰} \quad (\text{em módulo}) \quad (4.6)$$

Portanto (Equação 4.7):

$$\sigma_s' = E_s' \cdot \varepsilon_s' = 18944 \cdot (-0,1681/1000) = -3,18 \text{ kN/cm}^2 \quad (4.7)$$

A tensão negativa indica que na verdade, essa armadura estará com sinal oposto ao que lhe havia sido inicialmente estabelecido.

Para o cálculo da tensão no bambu lateral tem-se que (Equação 4.11):

$$\sigma_{\text{blat}} = E_b \cdot \varepsilon_{\text{blat}} = 441,5 \cdot (7,6891/1000) = 3,39 \text{ kN/cm}^2 \quad (4.11)$$

Calculando-se e igualando-se as resultantes, tem-se que (Equação 4.12):

$$R_s + R_{\text{binf}} + R_{\text{blat}} = R_s' + 0,95 \cdot f_c \cdot b \cdot 0,8 x \quad (4.12)$$

As resultantes nas armaduras são obtidas conforme a Equação 4.2, já apresentada, e as nas taliscas de bambu são obtidas conforme a Equação 4.13:

$$\begin{aligned} R_{\text{binf}} &= \sigma_{\text{binf}} A_{\text{binf}} ; \text{ onde } & \sigma_{\text{binf}} &= \text{tensão no bambu inferior} \\ & & A_{\text{binf}} &= \text{área do bambu inferior} \\ R_{\text{blat}} &= \sigma_{\text{blat}} A_{\text{blat}} ; \text{ onde } & \sigma_{\text{blat}} &= \text{tensão no bambu lateral} \\ & & A_{\text{blat}} &= \text{área do bambu lateral} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Substituindo-se na Equação 4.12, tem-se que:

$$\sigma_s A_s + \sigma_b A_{\text{binf}} + \sigma_b A_{\text{blat}} = \sigma_s' A_s' + 0,76 \cdot f_c \cdot b \cdot x$$

Substituindo-se com os valores da Tabela 16, tem-se que (Equação 4.14):

$$0,3928 \sigma_s + 1 \sigma_b + 2 \sigma_b = 0,277 \sigma_s' + 24,8322 x \quad (4.14)$$

$$34,49 \text{ kN} = 34,63 \text{ kN}$$

Como a diferença entre as resultantes tracionada e comprimida é de apenas 0,40%, pode-se considerar a igualdade satisfeita.

O próximo passo será calcular o valor do momento fletor (Equação 4.15):

$$M_{\text{calc}} = R_c \cdot (x - 0,4 \cdot x) + R_s' \cdot (x - d') + R_s \cdot (d - x) + R_{\text{binf}} \cdot (d_{\text{binf}} - x) + R_{\text{blat}} \cdot (d_{\text{blat}} - x) \quad (4.15)$$

Utilizando-se os valores da Tabela 16, tem-se que:

$$M_{\text{calc}} = 36,51 \cdot (1,43 - 0,4 \cdot 1,43) + (-0,88) \cdot (1,43 - 1,63) + 23,29 \cdot (13,33 - 1,43) + 4,415 \cdot (13,33 - 1,43) + 6,789 \cdot (10,58 - 1,43)$$

$$M_{\text{calc}} = 30,47 + 0,18 + 277,09 + 52,54 + 62,12$$

$$M_{\text{calc}} = 422,40 \text{ kN.cm}$$

Caso o momento resistente calculado (M_{calc}) fosse menor que 422,7 kN.cm, então, aumentava-se o valor da tensão de tração no bambu (σ_{binf}) e repetia-se o procedimento.

Por meio do ensaio de flexão das VIGAS BAMBU, foi obtida a média do momento resistente experimental (M_{exp}) igual a 618,40 kN.cm.

Comparando-se o momento resistente calculado (M_{calc}) com o Momento Resistente Experimental (M_{exp}), verificou-se uma diferença percentual a favor da segurança igual a 46,4%, sendo esta igual à da VIGA REFERÊNCIA.

4.10.3 Vigas Bambu Reforçado

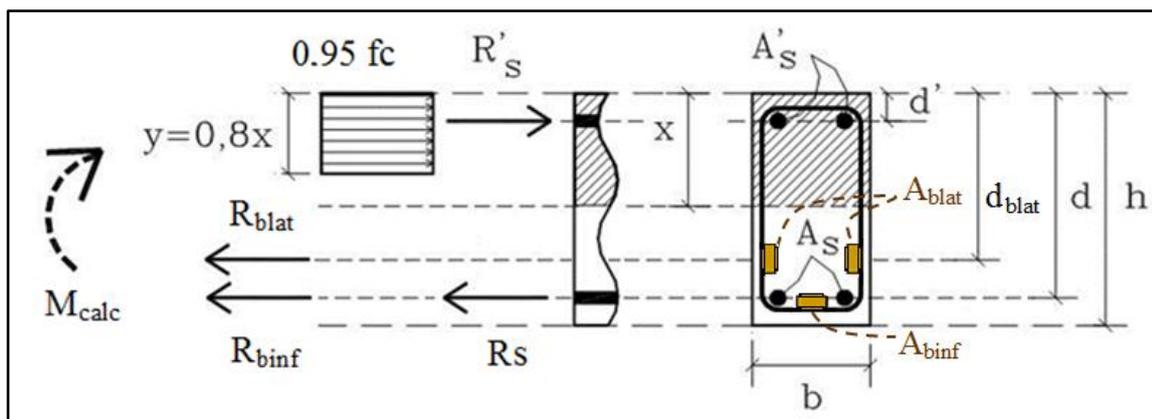
A seção transversal das VIGAS BAMBU REFORÇADO é definida na Figura 115, que também mostra as forças internas geradas pelo momento solicitante e que serão usadas no cálculo do equilíbrio. Os dados relacionados às dimensões da viga e à armadura também são os mesmos que os já apresentados na Tabela 15, razão pela qual são omitidos na Tabela 17.

Tabela 17 – Dados para o cálculo do Momento Resistente (M_{calc}) das VIGAS BAMBU REFORÇADO

VIGAS BAMBU REFORÇADO		
Parâmetro	Unidade	Valor
Resistência média à compressão do concreto (f_c)	MPa	27,58
Área do bambu inferior (A_{binf})	cm ²	1,00
Área do bambu lateral (A_{blat})	cm ²	2,00
Resistência à tração do bambu reforçado (f_b)	kN/cm ²	13,75
Profundidade do bambu inferior (d_{binf})	cm	13,33
Profundidade do bambu lateral (d_{blat})	cm	10,58
Profundidade da linha neutra (x)	cm	1,55
Deformação da armadura tracionada (ϵ_s)	‰	10
Deformação da armadura comprimida (ϵ_s')	‰	-0,0679
Deformação do concreto (ϵ_c)	‰	1,3158
Tensão na armadura tracionada (σ_s)	kN/cm ²	59,28
Tensão na armadura comprimida (σ_s')	kN/cm ²	-1,29
Tensão no bambu inferior (σ_{binf})	kN/cm ²	6,550
Deformação do bambu inferior (ϵ_{binf})	‰	10
Módulo de elasticidade do bambu (E_b)	kN/cm ²	655,0
Deformação do bambu lateral (ϵ_{blat})	‰	7,6655
Tensão no bambu lateral (σ_{blat})	kN/cm ²	5,02
Resultante da armadura tracionada (R_s)	kN	23,29
Resultante do concreto comprimido (R_c)	kN	40,29
Resultante da armadura comprimida (R_s')	kN	-0,36
Resultante do bambu inferior (R_{binf})	kN	6,550
Resultante do bambu lateral (R_{blat})	kN	10,042
Momento Fletor Resistente Calculado (M_{calc})	kN.cm	479,63
Média do Momento Fletor Resistente Experimental (M_{exp})	kN.cm	701,10

Fonte: Própria autora

Figura 115 – Esquema da seção transversal e esforços no concreto e nas armaduras tracionada e comprimida das VIGAS BAMBU REFORÇADO



Fonte: Própria autora

A proposta, assim como nas VIGAS BAMBU, é determinar qual a tensão e o módulo de elasticidade que deveriam ser aplicados nas taliscas para que a relação entre o momento resistente experimental e o momento resistente calculado (M_{exp} / M_{calc}) fosse a mesma que a da situação das VIGAS REFERÊNCIA.

No caso, para as VIGAS REFERÊNCIA, a relação mencionada foi de 443,60 / 303,25 (igual a 1,463).

Para as VIGAS BAMBU REFORÇADO, mantendo-se essa relação, e sabendo-se que o momento experimental (M_{exp}) foi de 701,10 kN.cm, adotou-se o valor do momento calculado como sendo igual à razão de 701,10 pelo coeficiente de 1,463, sendo igual a 479,22 kN.cm.

Por meio de tentativas, adotou-se um valor para a tensão de tração no bambu posicionado junto à face inferior da viga (σ_{binf}), quando submetido a uma deformação de 10 por mil, e, em seguida, calculou-se o valor do módulo de elasticidade do bambu (E_b), como já demonstrado na Equação 4.9:

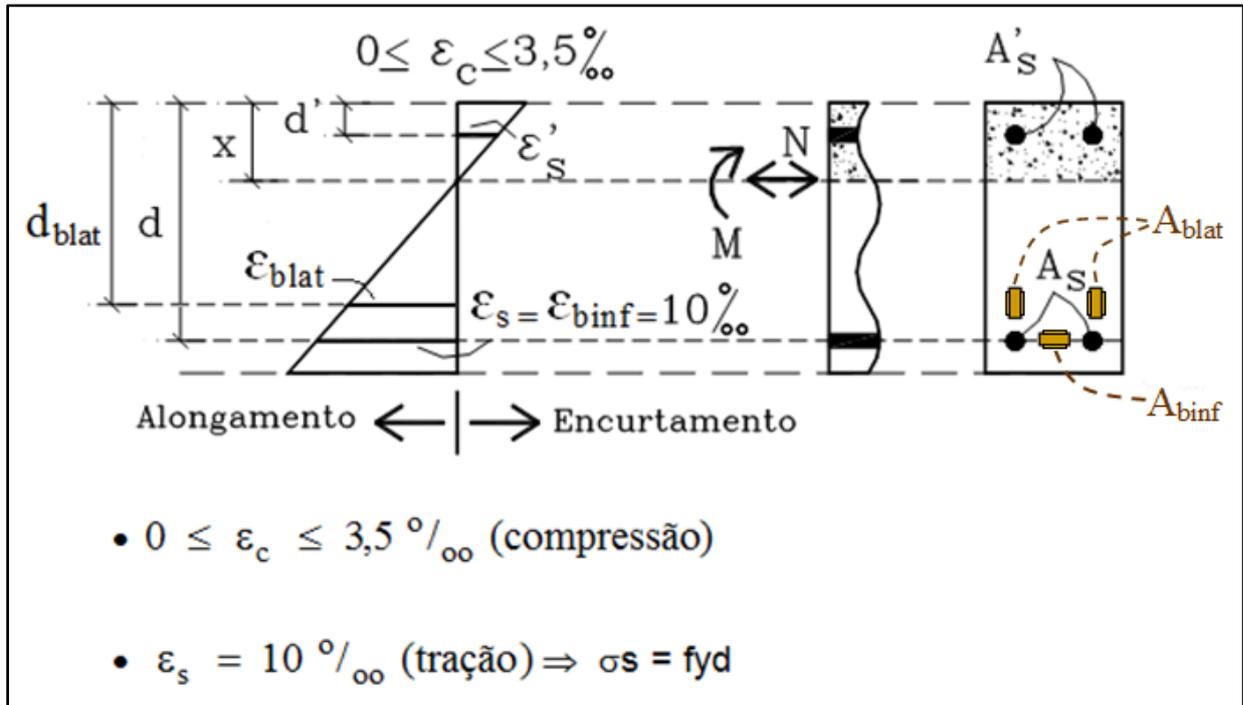
$$\sigma_{binf} = 6,550 \text{ kN/cm}^2$$

$$E_b = \sigma_{binf} / \varepsilon_{binf} = 6,550 / (10/1000) = 655,0 \text{ kN/cm}^2 \quad (4.9)$$

Assim como no cálculo das VIGAS REFERÊNCIA e das VIGAS BAMBU, por meio de tentativas, adotou-se um determinado valor de “x” para que se pudessem calcular as deformações no bambu lateral e no aço comprimido, por

semelhança de triângulos, de modo que a resultante de tração fosse igual à resultante de compressão (Equações 4.4, 4.5 e 4.10). Considerando-se o domínio 2, um resumo dessas informações é apresentado na Figura 116.

Figura 116 – Deformações relacionadas ao domínio 2, das VIGAS BAMBU REFORÇADO



Fonte: Própria autora

Adotando-se $x = 1,55 \text{ cm}$

$$\frac{\varepsilon_s'}{x - d'} = \frac{10\text{‰}}{d - x} \rightarrow \frac{\varepsilon_s'}{1,55 - 1,63} = \frac{10\text{‰}}{13,33 - 1,55} \rightarrow \varepsilon_s' = -0,0679\text{‰} \quad (4.4)$$

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{10\text{‰}}{d - x} \rightarrow \frac{\varepsilon_c}{1,55} = \frac{10\text{‰}}{13,33 - 1,55} \rightarrow \varepsilon_c = 1,3158\text{‰} \quad (4.5)$$

$\varepsilon_s = 10\text{‰}$ (Hipótese do domínio 2)

E, portanto, também:

$\varepsilon_{\text{binf}} = 10\text{‰}$ (Hipótese do domínio 2)

$$\frac{\varepsilon_{\text{blat}}}{d_{\text{blat}} - x} = \frac{10\text{‰}}{d - x} \rightarrow \frac{\varepsilon_{\text{blat}}}{10,58 - 1,55} = \frac{10\text{‰}}{13,33 - 1,55} \rightarrow \varepsilon_{\text{blat}} = 7,6655\text{‰} \quad (4.10)$$

Para o cálculo da tensão na armadura inferior, adotou-se o valor correspondente à tensão de escoamento:

$$\sigma_s = f_y = 59,28 \text{ kN/cm}^2$$

Já para o cálculo da tensão na armadura superior, tem-se que (Equação 4.6):

$$\varepsilon_y' = f_y' / E_s' = 69,49 / 18944 = 3,67^\circ /_{\infty} > \varepsilon_s' = -0,0679^\circ /_{\infty} \quad (\text{em módulo}) \quad (4.6)$$

Portanto (Equação 4.7):

$$\sigma_s' = E_s' \cdot \varepsilon_s' = 18944 \cdot (-0,0679 / 1000) = -1,29 \text{ kN/cm}^2 \quad (4.7)$$

A tensão negativa indica que na verdade, essa armadura estará com sinal oposto ao que lhe havia sido inicialmente estabelecido.

Para o cálculo da tensão no bambu lateral tem-se que (Equação 4.11):

$$\sigma_{\text{blat}} = E_b \cdot \varepsilon_{\text{blat}} = 655,0 \cdot (7,6655 / 1000) = 3,02 \text{ kN/cm}^2 \quad (4.11)$$

Calculando e igualando as resultantes, temos que (Equação 4.12):

$$R_s + R_{\text{binf}} + R_{\text{blat}} = R_s' + 0,95 \cdot f_c \cdot b \cdot 0,8 x \quad (4.12)$$

As resultantes nas armaduras são obtidas conforme a Equação 4.2, já apresentada, e as nas taliscas de bambu são obtidas conforme a Equação 4.13, também já apresentada.

Substituindo-se na Equação 4.12, tem-se que:

$$\sigma_s A_s + \sigma_b A_{\text{binf}} + \sigma_b A_{\text{blat}} = \sigma_s' A_s' + 0,76 \cdot f_c \cdot b \cdot x$$

Substituindo-se com os valores da Tabela 17, tem-se que (Equação 4.16):

$$0,3928 \sigma_s + 1 \sigma_b + 2 \sigma_b = 0,277 \sigma_s' + 25,9914 x \quad (4.16)$$

$$39,88 \text{ kN} = 39,93 \text{ kN}$$

Como a diferença entre as resultantes tracionada e comprimida é de apenas 0,13%, pode-se considerar a igualdade satisfeita.

O próximo passo foi o de calcular o valor do momento fletor resistente (Equação 4.15):

$$M_{\text{calc}} = R_c \cdot (x - 0,4 \cdot x) + R_s' \cdot (x - d') + R_s \cdot (d - x) + R_{\text{binf}} \cdot (d_{\text{binf}} - x) + R_{\text{blat}} \cdot (d_{\text{blat}} - x) \quad (4.15)$$

Substituindo-se, na expressão, os valores da Tabela 17, tem-se que:

$$M_{\text{calc}} = 40,29 \cdot (1,55 - 0,4 \cdot 1,55) + (-0,36) \cdot (1,55 - 1,63) + 23,29 \cdot (13,33 - 1,55) + 6,550 \cdot (13,33 - 1,55) + 10,042 \cdot (10,58 - 1,55)$$

$$M_{\text{calc}} = 37,47 + 0,03 + 274,30 + 77,16 + 90,68$$

$$M_{\text{calc}} = 479,63 \text{ kN.cm}$$

Caso o momento resistente calculado (M_{calc}) fosse menor que 479,22, então, seria necessário aumentar o valor da tensão de tração no bambu (σ_{binf}) e repetir o procedimento.

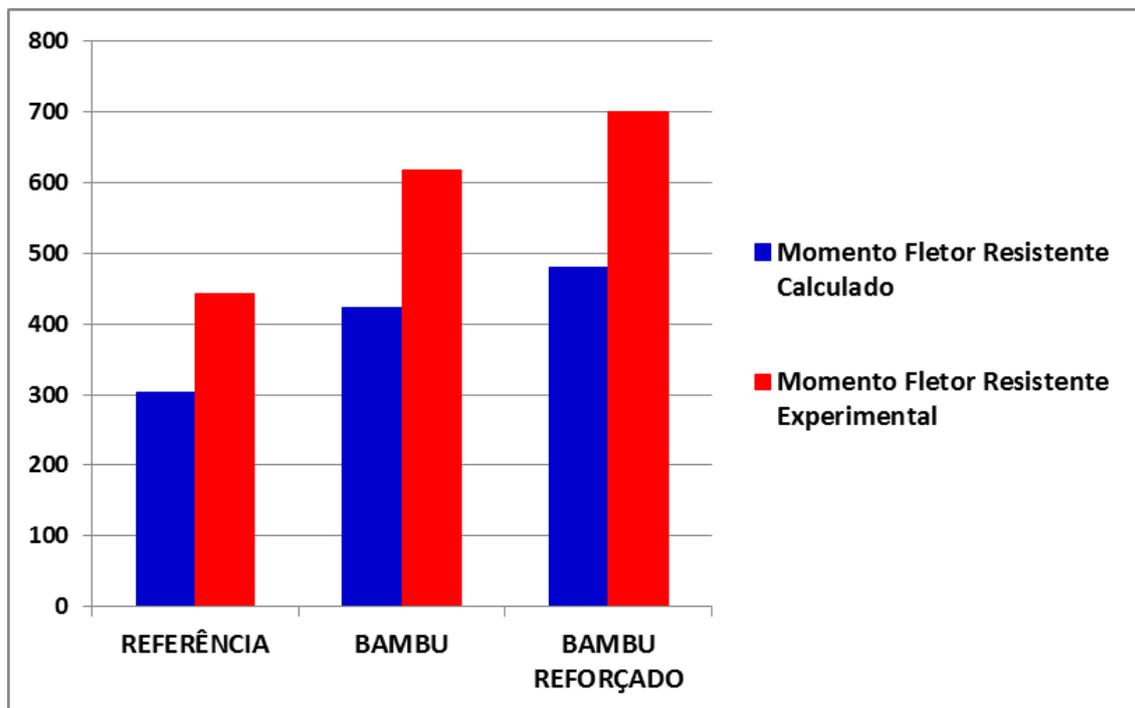
Por meio do ensaio de flexão das VIGAS BAMBURFORÇADO, foi obtida a média do momento resistente experimental (M_{exp}) igual a 701,10 kN.cm.

Comparando-se o momento resistente calculado (M_{calc}) com o Momento Resistente Experimental (M_{exp}), verificou-se uma diferença percentual a favor da segurança igual a 46%, sendo esta igual à da VIGA REFERÊNCIA.

4.10.4 Comparação entre os valores obtidos

A Figura 117 apresenta os resultados de todas as vigas estudadas com os dados do Momento Resistente Calculado (M_{calc}) e do Momento Resistente Experimental (M_{exp}).

Figura 117 – Dados do Momento Fletor Resistente Calculado (M_{calc}) e do Momento Fletor Resistente Experimental (M_{exp}) de todas as vigas



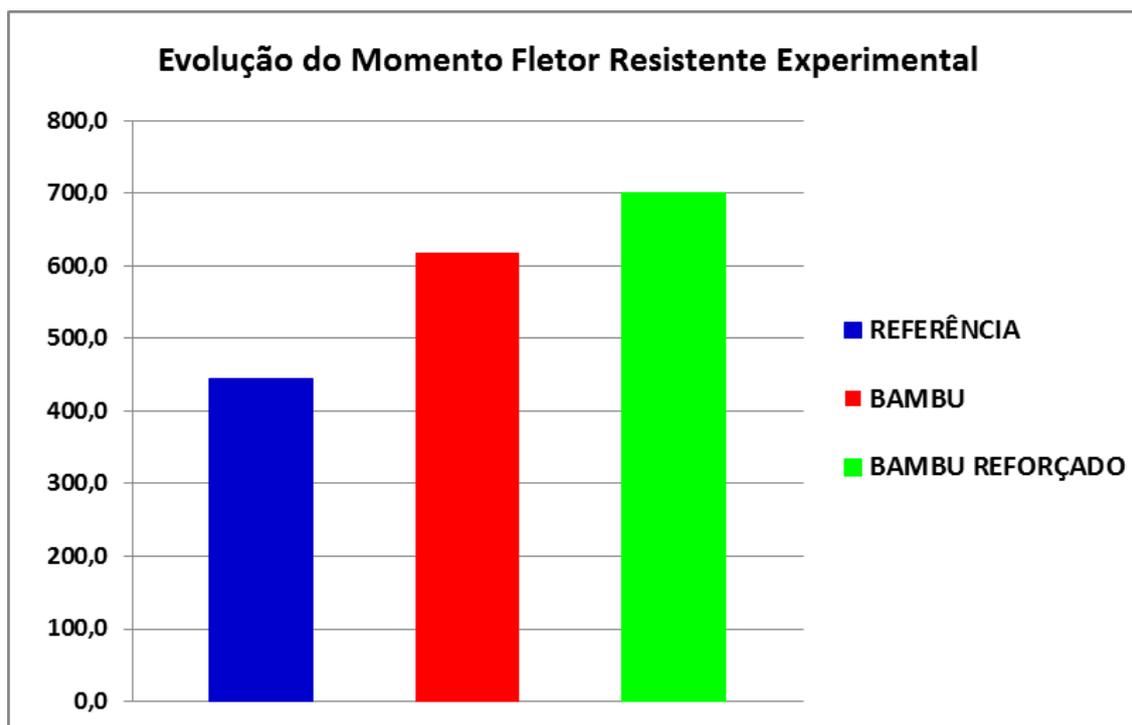
Fonte: Própria autora

Pôde-se verificar que a diferença percentual a favor da segurança foi mantida constante, sendo da ordem de 46%, para todas as vigas: VIGAS REFERÊNCIA, BAMBU e BAMBU REFORÇADO.

Para que esse fator de segurança fosse o mesmo para os três tipos de vigas, as resistências à tração do bambu e do bambu reforçado tiveram que ser multiplicadas por fatores de redução iguais a, respectivamente, 0,426 e 0,476. Observa-se que deve-se reduzir mais a resistência do bambu sem reforço nos nós, indicando que o bambu com reforço aparentemente é mais eficiente.

No que diz respeito, à evolução do momento resistente experimental, pode-se concluir que, em relação às VIGAS REFERÊNCIA, as VIGAS BAMBU apresentaram um aumento no momento resistente de 39,39% e as VIGAS BAMBU REFORÇADO apresentaram um aumento de 58,04% (Figura 118).

Figura 118 – Evolução do Momento Fletor Resistente Experimental (M_{exp}) de todas as vigas



Fonte: Própria autora

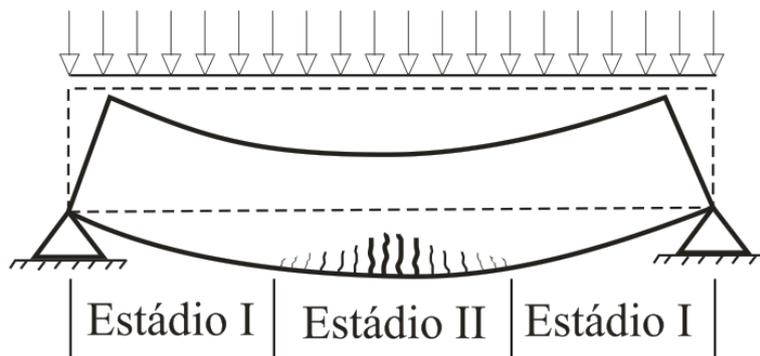
4.11 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS DESLOCAMENTOS EXPERIMENTAIS E OS CALCULADOS

4.11.1 Modelo de Branson

A NBR 6118 (ABNT, 2014), no item 17.3.2.1.1, apresenta a formulação de Branson para a avaliação da flecha imediata de elementos estruturais tipo viga (Equação 4.17). Nessa formulação, considera-se a interpolação direta das rigidezes entre os Estádios I (com trechos não fissurados) e II puro (com trechos fissurados). Deste modo, tem-se, uma rigidez equivalente e constante ao longo de todo o elemento estrutural.

Na Figura 119 observa-se o surgimento de fissuras quando o momento atuante (M_a) da seção mais solicitada é maior que o momento de fissuração (M_f).

Figura 119 – Comportamento de um elemento estrutural quando solicitado à flexão simples



Fonte: Santos (2009)

$$EI_{eq} = E_{cs} \{ (M_r/M_a)^3 I_c + [1 - (M_r/M_a)^3] I_{II} \} \leq E_{cs} I_c, \text{ onde :} \quad (4.17)$$

EI_{eq} = rigidez equivalente;

I_c = momento de inércia da seção bruta de concreto;

I_{II} = momento de inércia da seção fissurada de concreto no Estádio II;

M_a = momento fletor máximo na seção analisada;

M_r = momento de fissuração do elemento estrutural;

E_{cs} = módulo de elasticidade secante do concreto.

O módulo de elasticidade secante do concreto é obtido por meio da Equação 4.18:

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci}, \text{ onde :} \quad (4.18)$$

α_i = coeficiente que depende do valor de f_{ck} ;

E_{ci} = módulo de elasticidade tangente inicial do concreto.

E que por sua vez, são obtidos, respectivamente, pelas Equações 4.19 e 4.20:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (\text{com } f_{ck} \text{ em MPa}) \quad (4.19)$$

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}}, \quad \text{com } E_{ci} \text{ e } f_{ck} \text{ em MPa} \quad (4.20)$$

A Equação 4.18 é válida para concretos com $20 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$, conforme o item 8.2.8 da NBR 6118 (ABNT, 2014), onde:

$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio (item 8.2.8 da NBR 6118 (ABNT, 2014)).

O momento de fissuração (M_r) e o momento de inércia (I_{II}) são calculados pelas Equações 4.21 e 4.22, respectivamente.

$$M_r = \frac{\alpha_{f_{ct}} I_c}{y_t} \quad (4.21)$$

$$I_{II} = b_f \frac{x^3}{12} + b_f \frac{x^3}{12} + \alpha_e \sum A_{si} (d_i - x)^2, \text{ onde:} \quad (4.22)$$

$\alpha = 1,5$ para seções retangulares;

f_{ct} = resistência à tração direta do concreto;

I_c = momento de inércia da seção bruta de concreto;

y_t = distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada;

b_f = largura da viga (igual a 12,4 cm);

x = profundidade da linha neutra no Estádio II;

$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}}$ = relação entre os módulos de elasticidade do aço e de elasticidade

secante do concreto;

A_{si} = área de aço relacionado à altura útil (d_i);

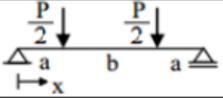
d_i = altura útil correspondente à área A_{si} ;

I_{II} = momento de inércia da seção transversal no Estádio II;

M_r = momento de fissuração da seção transversal.

Neste trabalho, o valor da flecha máxima, calculada para o meio do vão, é apresentado na Figura 120, extraída de Pinheiro, Catoia e Catoia (2010).

Figura 120 – Valor da flecha máxima calculada para o meio do vão

DESLOCAMENTOS ELÁSTICOS EM VIGAS		
VINCULAÇÃO E CARREGAMENTO	FLECHA	
	W_{max}	x
	$\frac{P}{24EI} a (3\ell^2 - 4a^2)$	$0,5\ell$

Onde:

W_{max} = é o deslocamento máximo (ou flecha) no meio do vão;

$\frac{P}{2}$ = é a força concentrada aplicada;

a = é a distância entre os apoios e as forças concentradas;

ℓ = é a distância entre os apoios (vão);

EI = é a rigidez equivalente;

x = é o eixo que define a posição onde se quer obter a flecha;

b = é a distância entre as forças concentradas.

Fonte: Pinheiro, Catoia e Catoia (2010)

A proposta, neste item, é determinar qual o valor do módulo de elasticidade que deveria ser aplicado para que a relação deslocamento experimental (f_{exp}) / deslocamento calculado (f_{calc}) fosse a mesma que a da situação das VIGAS REFERÊNCIA.

4.11.1.1 Vigas Referência

No caso das VIGAS REFERÊNCIA, para o Estado Limite de Serviço (flecha de 6 mm), a relação mencionada no item anterior, entre o deslocamento experimental e o deslocamento calculado (f_{exp} / f_{calc}), foi de 6,0 / 3,3 (igual a 1,82).

Para flecha de 8 mm, flecha máxima medida antes da retirada do equipamento, a relação entre o deslocamento experimental e o deslocamento calculado (f_{exp} / f_{calc}) foi de 8 / 5,2 (igual a 1,54). Os dados utilizados nos

cálculos das VIGAS REFERÊNCIA são apresentados nas Tabelas 18 e 19. Destaca-se que os dados relacionados às características da viga e da armadura são os mesmos que os já apresentados na Tabela 18, razão pela qual são omitidos na Tabela 19.

Tabela 18 – Dados para o cálculo do deslocamento (f_{calc}) das VIGAS REFERÊNCIA, em relação ao Estado Limite de Serviço (6 mm)

VIGAS REFERÊNCIA		
Parâmetro	Unidade	Valor
Resistência média à compressão do concreto (f_{ck})	MPa	25,43
Tensão de escoamento do aço tracionado (f_y)	MPa	592,8
Módulo de elasticidade da armadura tracionada (E_s)	MPa	168470
Módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs})	MPa	29264,59
Para basalto e diabásio (α_E)	-	1,2
Relação entre os módulos de elasticidade do aço e de elasticidade secante do concreto (α_e)	-	5,756786
Coefficiente que depende do valor de f_{ck} (α_i)	-	0,863575
Largura da viga (b_f)	cm	12,4
Altura da viga (h)	cm	15,0
Altura útil da camada 1 (aço) (d_{i1})	cm	13,33
Área de aço relacionado à altura útil da camada 1 (A_{s11})	cm ²	0,3927
Equação do 2º grau: $(-6,2)x^2 + (-2,26069)x + 30,13499 = 0$		
Profundidade da linha neutra no Estádio II (x)	cm	2,03
Momento de inércia da seção transversal no Estádio II (I_{II})	cm ⁴	323,0
Momento correspondente à flecha de 6 mm (E.L.Serviço)	kN.m	3,36
Força concentrada aplicada ($P/2$)	kN	6,4
Distância entre o apoio e a força concentrada (a)	cm	52,5
Distância entre os apoios (vão) (ℓ)	cm	150,0
Momento fletor máximo (M_a)	kN.cm	336,0
Momento de fissuração (M_r)	kN.cm	181,0

Momento de inércia da seção bruta de concreto (I_c)	cm⁴	3487,5
Rigidez equivalente calculada ($EI_{eq,calc}$)	cm⁴	817,5
Rigidez equivalente adotada ($EI_{eq,adot}$)	cm⁴	817,5
Deslocamento (flecha) experimental (f_{exp})	mm	6,0
Deslocamento (flecha) calculado (f_{calc})	mm	3,3
Deslocamento experimental (f_{exp}) / deslocamento calculado (f_{calc})	-	1,82

Fonte: Própria autora

Tabela 19 – Dados para o cálculo do deslocamento (f_{calc}) das VIGAS REFERÊNCIA, em relação à flecha máxima medida (8 mm)

VIGAS REFERÊNCIA		
Parâmetro	Unidade	Valor
Momento correspondente à flecha de 8 mm	kN.m	3,99
Força concentrada aplicada ($P/2$)	kN	7,6
Distância entre o apoio e a força concentrada (a)	cm	52,5
Distância entre os apoios (vão) (ℓ)	cm	150,0
Momento fletor máximo (M_a)	kN.cm	399,0
Momento de fissuração (M_r)	kN.cm	181,0
Momento de inércia da seção bruta de concreto (I_c)	cm⁴	3487,5
Rigidez equivalente calculada ($EI_{eq,calc}$)	cm⁴	618,4
Rigidez equivalente adotada ($EI_{eq,adot}$)	cm⁴	618,4
Deslocamento (flecha) experimental (f_{exp})	mm	8,0
Deslocamento (flecha) calculado (f_{calc})	mm	5,2
Deslocamento experimental (f_{exp}) / deslocamento calculado (f_{calc})	-	1,54

Fonte: Própria autora

4.11.1.2 Vigas Bambu

No caso das VIGAS BAMBU, para o Estado Limite de Serviço (flecha de 6 mm), para que a relação entre o deslocamento experimental e o deslocamento calculado (f_{exp}/f_{calc}) fosse a mesma que a das VIGAS REFERÊNCIA (igual a 1,82), o módulo de elasticidade do bambu obtido experimentalmente no item 4.5 teve de ser reduzido de 20,77 GPa para 19 GPa, correspondendo a uma redução de 8,5%.

Considerando-se a flecha de 8 mm (flecha máxima medida antes que o relógio comparador fosse retirado), a fim de que a relação entre o deslocamento experimental e o deslocamento calculado (f_{exp}/f_{calc}) fosse a mesma que a das VIGAS REFERÊNCIA (igual a 1,54), o módulo de elasticidade do bambu obtido experimentalmente no item 4.5 teve de ser reduzido de 20,77 GPa para 7,5 GPa, correspondendo a uma redução de 63,9%.

Os dados utilizados nos cálculos das VIGAS BAMBU são apresentados nas Tabelas 20 e 21. Destaca-se que os dados relacionados às características da viga e da armadura são os mesmos que os já apresentados na Tabela 20, razão pela qual são omitidos na Tabela 21.

Tabela 20 – Dados para o cálculo do deslocamento (f_{calc}) das VIGAS BAMBU, em relação ao Estado Limite de Serviço (6 mm)

VIGAS BAMBU		
Parâmetro	Unidade	Valor
Resistência média à compressão do concreto (f_{ck})	MPa	26,35
Tensão de escoamento do aço tracionado (f_y)	MPa	592,8
Módulo de elasticidade da armadura tracionada (E_s)	MPa	168470
Módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs})	MPa	29868,59
Módulo de elasticidade do bambu sem reforço nos nós (E_b)	MPa	19000
Relação entre os módulos de elasticidade do bambu sem reforço nos nós e de elasticidade secante do concreto (α_{eb})	-	0,636
Para basalto e diabásio (α_E)	-	1,2
Relação entre os módulos de elasticidade do aço e de elasticidade secante do concreto (α_e)	-	5,640373
Coeficiente que depende do valor de f_{ck} (α_i)	-	0,865875

Largura da viga (b_f)	cm	12,4
Altura da viga (h)	cm	15,0
Altura útil da camada 1 (aço) (d_{i1})	cm	13,33
Altura útil da camada 2 (bambu lateral) (d_{i2})	cm	10,58
Altura útil da camada 3 (bambu inferior) (d_{i3})	cm	13,33
Área de aço relacionado à altura útil da camada 1 (A_{si1})	cm ²	0,3927
Área de bambu lateral relacionado à altura útil da camada 2 (A_{si2})	cm ²	2,0
Área de bambu inferior relacionado à altura útil da camada 3 (A_{si3})	cm ²	1,0
Equação do 2º grau: $(-6,2)x^2 + (-4,12333)x + 51,47 = 0$		
Profundidade da linha neutra no Estádio II (x)	cm	2,57
Momento de inércia da seção transversal no Estádio II (I_{II})	cm ⁴	487,0
Momento correspondente à flecha de 6 mm (E.L.Serviço)	kN.m	3,66
Força concentrada aplicada ($P/2$)	kN	6,97
Distância entre o apoio e a força concentrada (a)	cm	52,5
Distância entre os apoios (vão) (l)	cm	150,0
Momento fletor máximo (M_a)	kN.cm	365,9
Momento de fissuração (M_r)	kN.cm	185,3
Momento de inércia da seção bruta de concreto (I_c)	cm ⁴	3487,5
Rigidez equivalente calculada ($EI_{eq,calc}$)	cm ⁴	876,7
Rigidez equivalente adotada ($EI_{eq,adot}$)	cm ⁴	876,7
Deslocamento (flecha) experimental (f_{exp})	mm	6,0
Deslocamento (flecha) calculado (f_{calc})	mm	3,3
Deslocamento experimental (f_{exp}) / deslocamento calculado (f_{calc})	-	1,82

Fonte: Própria autora

Tabela 21 – Dados para o cálculo do deslocamento (f_{calc}) das VIGAS BAMBU, em relação à flecha máxima medida (8 mm)

VIGAS BAMBU		
Parâmetro	Unidade	Valor
Módulo de elasticidade do bambu sem reforço nos nós (E_b)	MPa	7500
Relação entre os módulos de elasticidade do bambu sem reforço nos nós e de elasticidade secante do concreto (α_{eb})	-	0,251
Equação do 2º grau: $(-6,2)x^2 + (-2,96827)x + 38,19 = 0$		
Profundidade da linha neutra no Estádio II (x)	cm	2,25
Momento de inércia da seção transversal no Estádio II (I_{II})	cm⁴	390,0
Momento correspondente à flecha de 8 mm	kN.m	4,26
Força concentrada aplicada ($P/2$)	kN	8,11
Distância entre o apoio e a força concentrada (a)	cm	52,5
Distância entre os apoios (vão) (ℓ)	cm	150,0
Momento fletor máximo (M_a)	kN.cm	425,8
Momento de fissuração (M_r)	kN.cm	185,3
Momento de inércia da seção bruta de concreto (I_c)	cm⁴	3487,5
Rigidez equivalente calculada ($EI_{eq,calc}$)	cm⁴	645,6
Rigidez equivalente adotada ($EI_{eq,adot}$)	cm⁴	645,6
Deslocamento (flecha) experimental (f_{exp})	mm	8,0
Deslocamento (flecha) calculado (f_{calc})	mm	5,2
Deslocamento experimental (f_{exp}) / deslocamento calculado (f_{calc})	-	1,54

Fonte: Própria autora

4.11.1.3 Vigas Bambu Reforçado

No caso das VIGAS BAMBU REFORÇADO, para o Estado Limite de Serviço (flecha de 6 mm), para que a relação entre o deslocamento experimental e o deslocamento calculado (f_{exp} / f_{calc}) fosse a mesma que a das VIGAS REFERÊNCIA (igual a 1,82), o módulo de elasticidade do bambu obtido experimentalmente no item 4.5 teve de ser reduzido de 20,77 GPa para 6,0 GPa, correspondendo a uma redução de 71,1%.

Para uma flecha 8 mm, flecha máxima medida antes que o relógio comparador fosse retirado), a fim de que a relação entre o deslocamento experimental e o deslocamento calculado (f_{exp}/f_{calc}) fosse a mesma que a das VIGAS REFERÊNCIA (igual a 1,54), o módulo de elasticidade do bambu obtido experimentalmente no item 4.5 teve de ser reduzido de 20,77 GPa para 8,5 GPa, correspondendo a uma redução de 59,1%.

Os dados utilizados nos cálculos das VIGAS BAMBU REFORÇADO são apresentados nas Tabelas 22 e 23. Destaca-se que os dados relacionados às características da viga e da armadura são os mesmos que os já apresentados na Tabela 22, razão pela qual são omitidos na Tabela 23.

Tabela 22 – Dados para o cálculo do deslocamento (f_{calc}) das VIGAS BAMBU REFORÇADO, em relação ao Estado Limite de Serviço (6 mm)

VIGAS BAMBU REFORÇADO		
Parâmetro	Unidade	Valor
Resistência média à compressão do concreto (f_{ck})	MPa	27,58
Tensão de escoamento do aço tracionado (f_y)	MPa	592,8
Módulo de elasticidade da armadura tracionada (E_s)	MPa	168470
Módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs})	MPa	30666,29
Módulo de elasticidade do bambu reforçado nos nós (E_{bref})	MPa	6000
Relação entre os módulos de elasticidade do bambu reforçado nos nós e de elasticidade secante do concreto (α_{ebref})	-	0,196
Para basalto e diabásio (α_E)	-	1,2
Relação entre os módulos de elasticidade do aço e de elasticidade secante do concreto (α_e)	-	5,493655
Coeficiente que depende do valor de f_{ck} (α_i)	-	0,868950
Largura da viga (b_f)	cm	12,4
Altura da viga (h)	cm	15,0
Altura útil da camada 1 (aço) (d_{i1})	cm	13,33
Altura útil da camada 2 (bambu lateral) (d_{i2})	cm	10,58
Altura útil da camada 3 (bambu inferior) (d_{i3})	cm	13,33

Área de aço relacionado à altura útil da camada 1 (A_{si1})	cm ²	0,3927
Área de bambu lateral relacionado à altura útil da camada 2 (A_{si2})	cm ²	2,0
Área de bambu inferior relacionado à altura útil da camada 3 (A_{si3})	cm ²	1,0
Equação do 2º grau: $(-6,2)x^2 + (-2,74432)x + 35,51 = 0$		
Profundidade da linha neutra no Estádio II (x)	cm	2,18
Momento de inércia da seção transversal no Estádio II (I_{II})	cm ⁴	376,0
Momento correspondente à flecha de 6 mm (E.L.Serviço)	kN.m	3,60
Força concentrada aplicada (P/2)	kN	6,86
Distância entre o apoio e a força concentrada (a)	cm	52,5
Distância entre os apoios (vão) (ℓ)	cm	150,0
Momento fletor máximo (M_a)	kN.cm	360,2
Momento de fissuração (M_r)	kN.cm	191,0
Momento de inércia da seção bruta de concreto (I_c)	cm ⁴	3487,5
Rigidez equivalente calculada ($EI_{eq,calc}$)	cm ⁴	840,0
Rigidez equivalente adotada ($EI_{eq,adot}$)	cm ⁴	840,0
Deslocamento (flecha) experimental (f_{exp})	mm	6,0
Deslocamento (flecha) calculado (f_{calc})	mm	3,3
Deslocamento experimental (f_{exp}) / deslocamento calculado (f_{calc})	-	1,82

Fonte: Própria autora

Tabela 23 – Dados para o cálculo do deslocamento (f_{calc}) das VIGAS BAMBU REFORÇADO, em relação à flecha máxima medida (8 mm)

VIGAS BAMBU REFORÇADO		
Parâmetro	Unidade	Valor
Módulo de elasticidade do bambu reforçado nos nós (E_{bref})	MPa	8500
Relação entre os módulos de elasticidade do bambu reforçado nos nós e de elasticidade secante do concreto (α_{ebref})	-	0,277
Equação do 2º grau: $(-6,2)x^2 + (-2,98889)x + 38,32 = 0$		

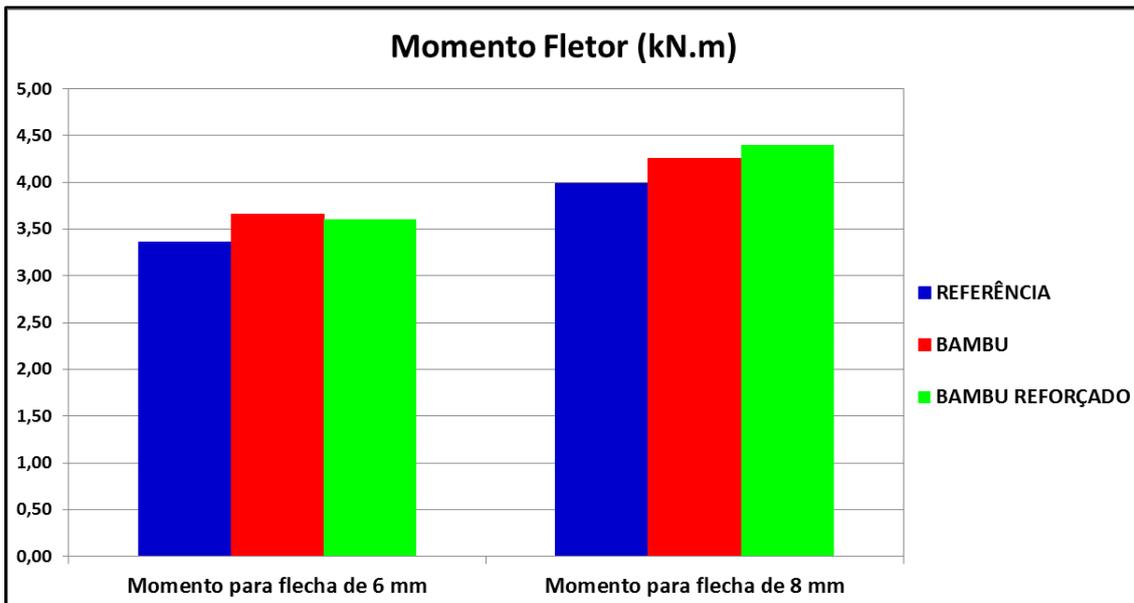
Profundidade da linha neutra no Estádio II (x)	cm	2,26
Momento de inércia da seção transversal no Estádio II (I_{II})	cm ⁴	397,0
Momento correspondente à flecha de 8 mm	kN.m	4,40
Força concentrada aplicada ($P/2$)	kN	8,38
Distância entre o apoio e a força concentrada (a)	cm	52,5
Distância entre os apoios (vão) (ℓ)	cm	150,0
Momento fletor máximo (M_a)	kN.cm	440,0
Momento de fissuração (M_r)	kN.cm	191,0
Momento de inércia da seção bruta de concreto (I_c)	cm ⁴	3487,5
Rigidez equivalente calculada ($EI_{eq,calc}$)	cm ⁴	650,0
Rigidez equivalente adotada ($EI_{eq,adot}$)	cm ⁴	650,0
Deslocamento (flecha) experimental (f_{exp})	mm	8,0
Deslocamento (flecha) calculado (f_{calc})	mm	5,2
Deslocamento experimental (f_{exp}) / deslocamento calculado (f_{calc})	-	1,54

Fonte: Própria autora

4.11.2 Comparação entre os valores obtidos

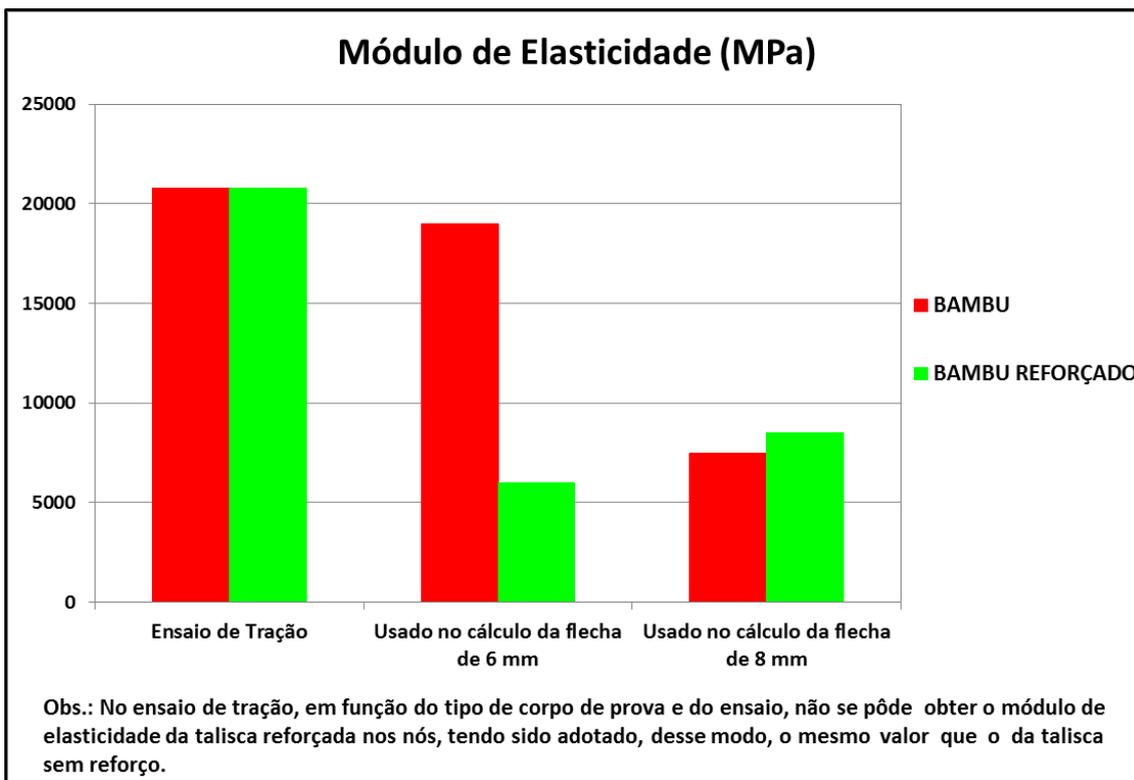
A Figura 121 apresenta os valores dos momentos fletores experimentais correspondentes às flechas de 6 mm e 8 mm; já a Figura 122 apresenta os valores dos módulos de elasticidade experimental e dos usados nos cálculos relativos às flechas de 6 mm e 8 mm, de modo que a relação entre os deslocamentos experimentais e os deslocamentos calculados (f_{exp} / f_{calc}) fossem os mesmos que as das situações correspondentes das VIGAS REFERÊNCIA. Vale destacar que, no ensaio de tração, em função do tipo de corpo de prova e do ensaio, não se pôde obter o módulo de elasticidade da talisca reforçada nos nós, tendo sido adotado, desse modo, o mesmo valor que o da talisca sem reforço.

Figura 121 – Dados do momento fletor para as flechas de 6 mm e 8 mm



Fonte: Própria autora

Figura 122 – Dados do módulo de elasticidade experimental e dos módulos de elasticidade estimados para o Estado Limite de Serviço (6 mm) e para a flecha máxima medida (8 mm)



Fonte: Própria autora

Comparando-se os resultados obtidos, pôde-se verificar que o reforço nos nós das taliscas de bambu não são eficazes para a flecha de 6 mm

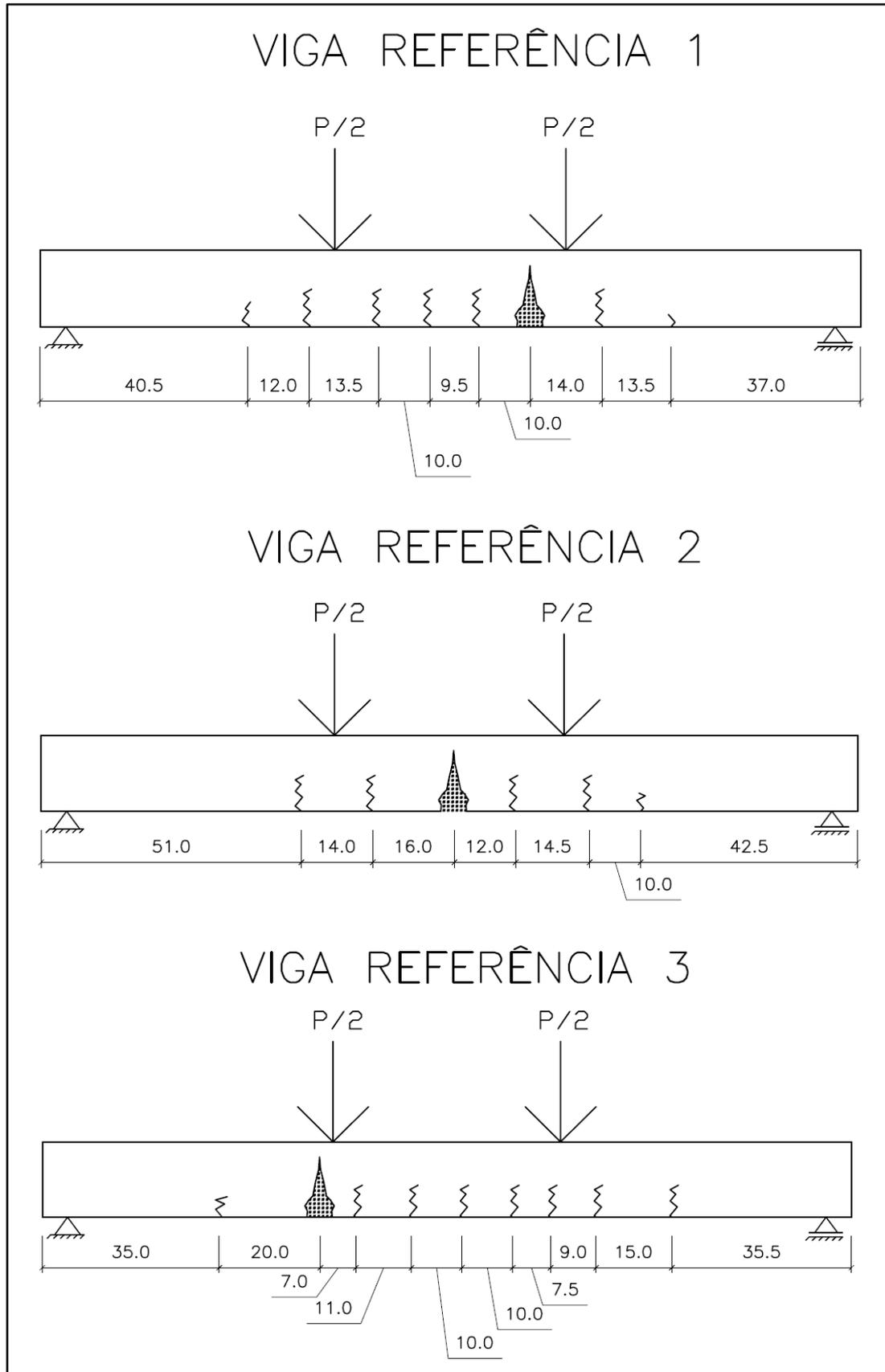
(Estado Limite de Serviço), visto que as VIGAS BAMBU e as VIGAS BAMBU REFORÇADO apresentaram módulo de elasticidade iguais a 19 GPa e 6,0 GPa, respectivamente. Este resultado foi completamente inesperado, uma vez que, com o reforço, a rigidez da viga deveria ser maior.

Entretanto, os reforços nos nós começam a ser eficientes para flechas maiores, conforme verificado para a flecha de 8 mm, nos quais as VIGAS BAMBU e as VIGAS BAMBU REFORÇADO apresentaram módulo de elasticidade iguais a 7,5 GPa e 8,5 GPa, respectivamente. Neste caso, o resultado foi como o esperado, visto que, com o reforço, a rigidez da viga foi maior.

4.12 ANÁLISE DO PADRÃO DE FISSURAÇÃO DAS VIGAS

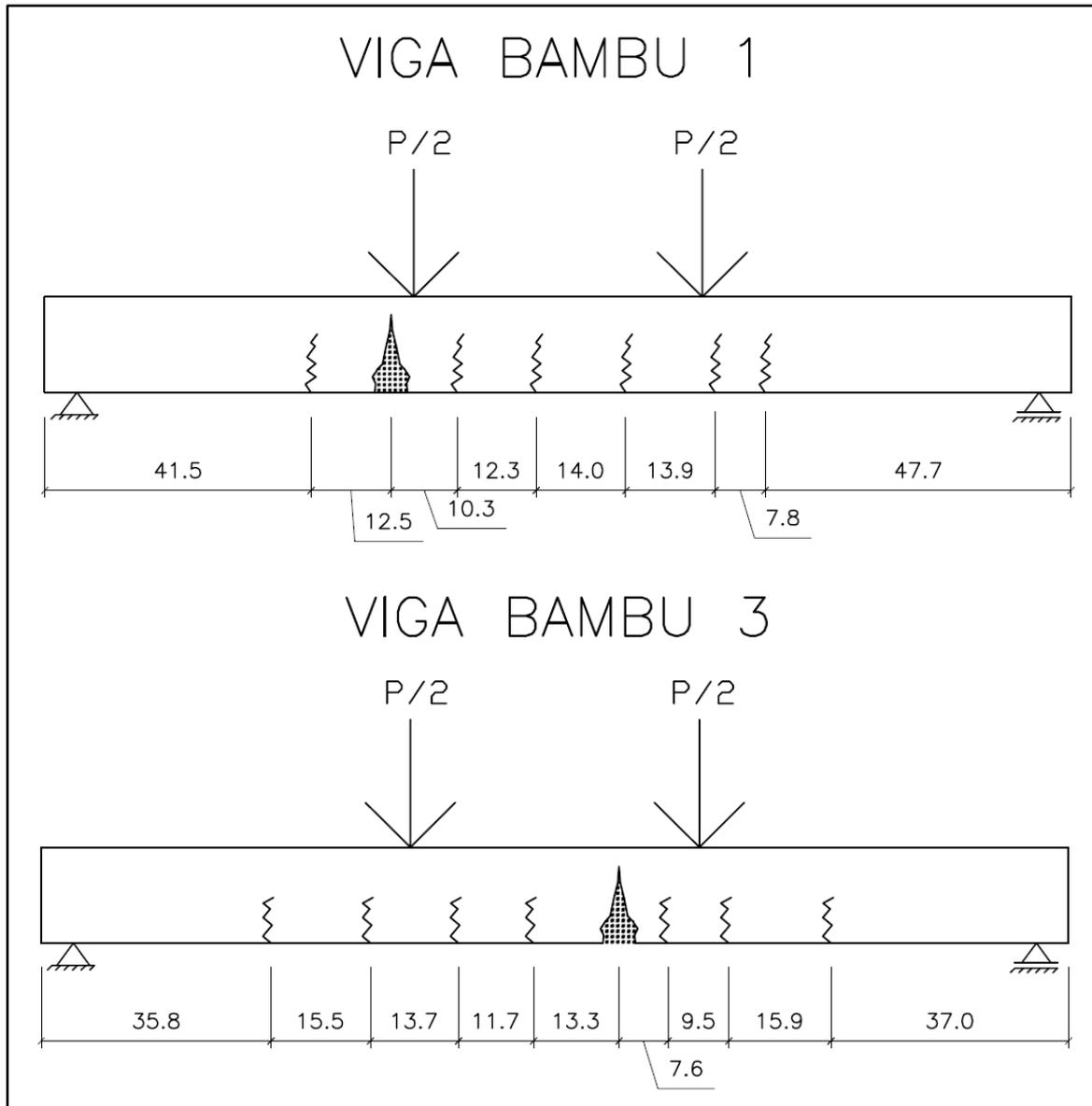
As Figuras 123, 124 e 125 apresentam o comportamento das VIGAS REFERÊNCIA, BAMBU e BAMBU REFORÇADO em relação ao padrão de fissuração, respectivamente.

Figura 123 – Fissuração das VIGAS REFERÊNCIA, medidas em cm



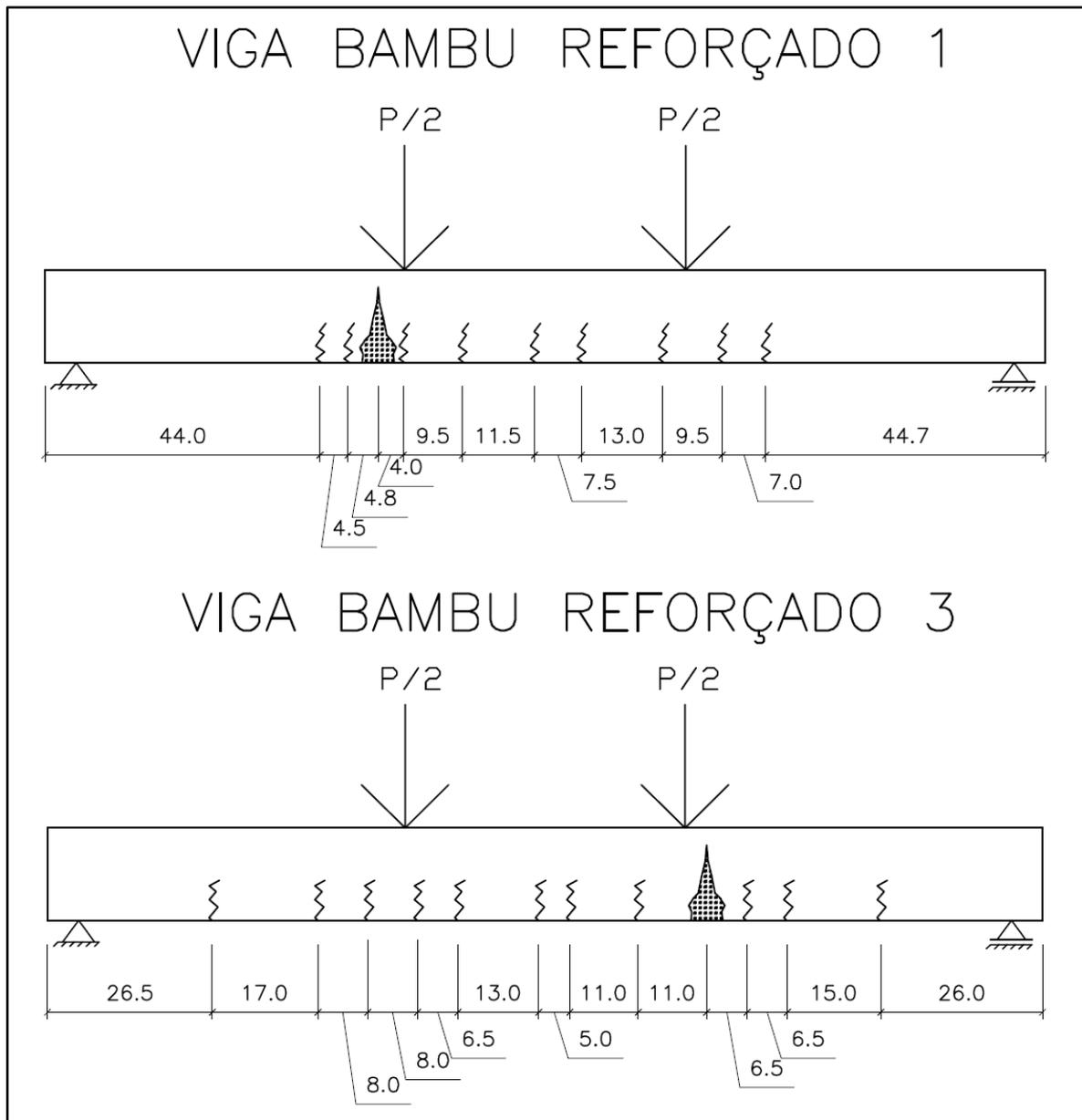
Fonte: Própria autora

Figura 124 – Fissuração das VIGAS BAMBU, medidas em cm



Fonte: Própria autora

Figura 125 – Fissuração das VIGAS BAMBU REFORÇADO, medidas em cm



Fonte: Própria autora

Analisando os resultados obtidos, foi possível verificar que a ruptura das vigas ocorreu na região central, conforme o esperado, justamente na região submetida aos maiores momentos fletores. Aparentemente, o padrão de fissuração foi basicamente o mesmo para todas as vigas ensaiadas, embora as VIGAS BAMBU REFORÇADO tenham apresentado um maior número de fissuras e menor espaçamento entre elas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Com relação à avaliação do desempenho da Resina Poliuretana Bicomponente à base de óleo de Mamona (RM), foi observado que em todos os ensaios de tração houve primeiramente o rompimento da cola que fixava os reforços ao corpo de prova, e, imediatamente depois, havia a ruptura da talisca na região do nó. Nos corpos de prova sem reforço, a ruptura das taliscas também ocorreu na região dos nós. Nas amostras com reforços colados, observou-se um aumento na média da tensão de ruptura, de 103,5 MPa para 137,5 MPa, embora os desvios também tenham sido maiores.

Com relação ao ensaio de arrancamento, a existência do reforço nos nós internos permitiu um acréscimo de 28% (76,5 MPa para 97,0 MPa) com relação à tensão normal, provocando a ruptura da talisca e não o seu escorregamento. O valor da tensão de aderência observado para as taliscas sem reforço foi de 0,889 MPa.

Quanto ao ensaio de flexão das vigas, constatou-se que:

- a colocação de taliscas de bambu sem reforço e reforçadas nos nós aumentaram a resistência das vigas em 39,4% e 58%, respectivamente;
- a inserção das taliscas de bambu nas vigas (taxa de 1,61% de bambu em relação à seção transversal da viga) proporcionou uma discreta melhora no seu comportamento em serviço;
- a inclusão das taliscas nas vigas fez com que as mesmas fissurassem com uma carga menor. Destaca-se que tanto para as VIGAS REFERÊNCIA como para as VIGAS BAMBU e BAMBU REFORÇADO, o momento de fissuração é baixo e a flecha com que acontece também é muito pequena;
- a ruptura das vigas ocorreu na região central, trecho onde o diagrama do momento fletor é máximo, e não foi possível notar uma mudança significativa no padrão de fissuração das vigas;
- o reforço nos nós das taliscas de bambu não são eficazes para a flecha de 6 mm, correspondente ao Estado Limite de Serviço; entretanto, os

reforços nos nós começam a ser eficientes para flechas maiores, conforme verificado para a flecha de 8 mm, visto que, com o reforço, a rigidez da viga foi maior. As VIGAS BAMBU e BAMBU REFORÇADO apresentaram, para a flecha máxima medida antes que o relógio comparador fosse retirado, módulos de elasticidade iguais a 7,5 GPa e 8,5 GPa, respectivamente.

Deste modo, conclui-se que o bambu aumentou a capacidade das vigas e, portanto, poderia se pensar na redução da quantidade de aço a ser utilizado. Conclui-se ainda que, no que diz respeito à comparação entre a inclusão de taliscas de bambu com e sem reforço nos nós, constatou-se que o reforço aumentou a resistência das vigas em 13,4%.

6. PESQUISAS FUTURAS

As vigas e os corpos de prova de caracterização do concreto serão ensaiados com o intuito de se estudar e avaliar a durabilidade desses materiais com uma idade acima de 360 dias.

Visando ampliar o estudo sobre a utilização de taliscas de bambu em vigas de concreto armado, no que diz respeito aos Estados Limites de Serviço, serão feitas medições para verificar a abertura de fissuras das vigas.

Outra continuidade seria a de se buscar um adesivo para reforçar os nós que seja mais eficiente que a resina à base de óleo de mamona.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5739**: concreto – ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892-1**: materiais metálicos – ensaio de tração – parte 1: método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 70 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7215**: cimento portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7222**: concreto e argamassa – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8522**: concreto – determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 30**: agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 45**: agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 46**: agregados – determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49**: agregado fino – determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 52:** agregado miúdo – determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 53:** agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 248:** agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 67:** concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998. 8 p.

AZAMBUJA, M. A.; ALVISI, L. G.; PEREIRA, M. A. R.; BARATA, T. Q. F.; VALARELLI, I. D. Execução e montagem de galpão oficina com componentes de bambu. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 13., 2012. Vitória, ES. **Anais...** Alegre: EBRAMEM, 2012. p. 1-10. CD-ROM.

BRAGA FILHO, A. C.; LIMA JÚNIOR, H. C.; BARBOSA, N. P.; WILLRICH, F. L. Comportamento Estrutural de vigas de concreto reforçadas com ripas de bambu cravejadas de pinos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 10, p.1115-1122, 2010.

FARRELLY, D. **The book of bamboo**. San Francisco: Sierra Club Books, 1984. 352 p.

FAZZAN, J. V. **Comportamento estrutural de lajes pré-moldadas treliçadas com adição de resíduo de borracha de pneu**. 2011. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

FERREIRA, G. C. S. **Vigas de concreto armadas com bambu**. 2002. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

FERREIRA, G. C. S. **Vigas de Concreto Armadas com Taliscas de Bambu Dendrocalamus giganteus**. 2007. 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

FREIRE, W. J. Prefácio. In: PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. 2. ed. Bauru: Canal6, 2008. p. 19-22.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1995.

GHAVAMI, K. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. **Cement & Concrete Composites**, Kidlington, v. 27, p. 637-649, 2005.

GHAVAMI, K. Ultimate load behaviour of bamboo reinforced lightweight concrete beams. **Cement & Concrete Composites**, Kidlington, v. 17, p. 281-288, 1995.

JAVARONI, C. E.; AZAMBUJA, M. A.; VALARELLI, I. D.; PEREIRA, M. A. R.; BARATA, T. Q. F. Projeto e dimensionamento de galpão oficina em telhado duas água em estrutura de bambu. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 13., 2012. Vitória. **Anais...** Alegre: EBRAMEM, 2012. p.1-10. CD-ROM.

KUSHWARA, P. K.; KUMAR, R. Studies on Water Absorption of Bamboo-Epoxy Composites: Effect of Silane Treatment of Mercerized Bamboo. **Journal of Applied Polymer Science**, New Delhi, v. 115, p. 1846-1852, 07 out. 2009. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.31317/full>>. Acesso em: 27 out. 2015.

LIMA JÚNIOR, H. C.; MESQUITA, L. P.; FABRO, G.; WILLRICH, F. L.; CZARNIESKI, C. J. Vigas de concreto reforçadas com bambu *Dendrocalamus giganteus*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 642-651, 2005.

LIMA JÚNIOR, H. C.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P.; ROSA, M. A.; CUNHA, B. S. Durability analysis of bamboo as concrete reinforcement. **Materials and Structures**, Dordrecht, v. 41, p. 805-999, 2008.

LIMA JÚNIOR, H. C.; XAVIER, A. C.; TOLÊDO FILHO, R. D.; BARBOSA, N. P. Aderência bambu-concreto. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, 2., 1996. Juiz de Fora, MG. **Anais...** Juiz de Fora: UFJF, 1996a. p. 312-323.

LIMA JÚNIOR, H. C.; XAVIER, A. C.; TOLÊDO FILHO, R. D.; BARBOSA, N. P.; GHAVAMI, K. Análise experimental de lajes de concreto em fôrma permanente de bambu. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, 2., 1996. Juiz de Fora, MG. **Anais...** Juiz de Fora: UFJF, 1996b. p. 324-339.

LOPES, W. G. R.; FREIRE, W. J.; FERREIRA, G. C. S. Ensaios de arrancamento e empuxamento aplicados a taliscas de bambu encravadas em corpos-de-prova de solo-cimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 504-510, 26 fev. 2002.

LUGT, P. V. D.; DOBBELSTEEN, A. A. J. F. V. D.; JANSSEN, J. J. A. An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. **Construction & Building Materials**, Amsterdam, v. 20, p. 648-656, 2006.

MARK, A. A.; RUSSEL, A. O. A comparative study of bamboo reinforced concrete beams using different stirrup materials for rural. **International Journal of Civil and Structural Engineering**, Kangayam, v. 2, n. 1, p. 407-423, 2011.

MELO, J. V. C.; RIPPER, J. L. M.; MOREIRA, L. E. Estruturas de bambus amarrados com geometria dada pelas bolhas de sabão. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 14., 2014. Natal, RN. **Anais...** Natal: EBRAMEM, 2014. CD-ROM.

MESQUITA, L. P.; CZARNIESKI, C. J.; BRAGA FILHO, A. C.; WILLRICH, F. L.; LIMA JÚNIOR, H. C.; BARBOSA, N. P. Determinação da tensão de aderência do bambu-concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 505-516, 17 nov. 2006.

MORAES, J. C. B.; MELGES, J. L. P. **Estudo da aderência entre o concreto e a espécie de bambu *Bambusa vulgaris* impermeabilizada com látex extraído de seringueira**. 2013. 46 f. Relatório (Iniciação Científica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

MOROZ, G.; LISSEL, S. L., HAGEL, M. D. Performance of bamboo reinforced concrete masonry shear walls. **Construction & Building Materials**, Amstrdam, v. 61, p. 125-137, 2014.

NAYAK, A.; BAJAJ, A. S.; JAIN, A.; KHANDELWAL, A.; TIWARI, H. Replacement of Steel by Bamboo Reinforcement. **Journal of Mechanical and Civil Engineering**, New Delhi, v. 8, n. 1, p. 50-61, jul. – ago. 2013.

O'REILLY DÍAZ, VITERVO. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. São Paulo: Pini, 1998. 122 p.

PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. 2. ed. Bauru: Canal6, 2008. 240 p.

PEREIRA, M. A. R.; CARRARA, H. B.; BARATA, T. Q. F.; VALARELLI, I. D.; AZAMBUJA, M. A. Projeto de produção e processo de pré-fabricação de componentes de bambu. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 13., 2012. Vitória. **Anais...** Alegre: EBRAMEM, 2012. p.1-10. CD-ROM.

PEREIRA, M. A. R.; TOMAZELLO FILHO, M. Desenvolvimento e utilização de espécies de bambu cultivadas na UNESP de Bauru. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 14., 2014. Natal. **Anais...** Natal: EBRAMEM, 2014. 1 CD-ROM.

PINHEIRO, L. M.; CATOIA, B.; CATOIA, T. **Tabelas de vigas**: deslocamentos e momentos de engastamento perfeito. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. 10 p.

RIPPEL, M. M. **Caracterização Microestrutural de Filmes e Partículas de Látex de Borracha Natural**. 2005. 350 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SANTOS, M. R. **Análise numérica de lajes treliçadas pré-moldadas com adição de resíduo de borracha de pneu**. 2009. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

SEIXAS, M.; RIPPER, L. A.; GHAVAMI, K. Deployable Bamboo structures for sustainable architecture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NON-CONVENTIONAL MATERIALS AND TECHNOLOGIES, 15., 2014. Pirassununga. **Resumos...** Pirassununga: NOCMAT, 2014. p.148.

SILVA, C. G.; BARBOSA, N. P.; OLIVEIRA, M. P. Tratamentos superficiais visando à melhoria da aderência entre gesso e taliscas de bambu. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 2, p. 222–228, 2012.

TOLÊDO FILHO, R. D.; JOSEPH, K.; GHAVAMI, K.; ENGLAND, G. L. The use of sisal fibre as reinforcement in cement based composites. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 245-256, 1999.

TRENTIN, T. F. S. **Análise estrutural de tubos de concreto com resíduo de borracha de pneu**. 2014. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

XIAO, Y.; ZHOU, Q.; SHAN, B. Design and construction of modern bamboo bridges. **Journal of Bridge Engineering**, Reston, v. 15, p. 533-541, set. – out. 2010. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000089](http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000089)>. Acesso em: 27 out. 2015.

ANEXOS

ANEXO I – Análise da massa de látex aderida em 4 camadas.

Corpo de Prova	Largura (cm)	Espessura (cm)	Comprimento (cm)	Área da superfície da talisca (cm ²)	Massa da talisca sem látex (g)	Massa da talisca com 4 camadas de látex (g)
CP 01	2	0,4	40,2	194,56	29,49	31,81
CP 02	2	0,4	40,4	195,52	29,58	31,99
CP 03	2	0,4	40,2	194,56	29,59	31,95
Média				194,88	29,55	31,92
Desvio Padrão					± 0,04	± 0,08
Desvio Padrão (%)					± 0,15	± 0,24
Acréscimo de massa para 4 camadas de látex = 8,00%						
Acréscimo de massa para 4 camadas de látex em termos de área = 0,15g/cm² de área superficial						

ANEXO II – Dimensões dos corpos de prova submetidos ao Ensaio de Tração.

Taliscas sem reforço*	CP	Espessura (mm)	Largura (mm)
	1	4,90	21,40
	2	4,98	21,29
	3	5,00	20,75
	4	4,97	20,73
	5	4,83	21,25
	6	4,82	21,42
	7	4,92	21,06
	Média	4,92	21,13
	Área da seção transversal (calculada com valores médios da espessura e da largura): 103,89 mm²		
Taliscas com reforço: RESINA À BASE DE ÓLEO DE MAMONA (RM)*	CP	Espessura (mm)	Largura (mm)
	1	4,45	20,60
	2	4,34	20,00
	3	4,39	20,68
	4	4,41	20,94
	5	5,49	20,61
	6	4,51	20,17
	7	4,22	20,53
	Média	4,54	20,50
	Área da seção transversal (calculada com valores médios da espessura e da largura): 93,18 mm²		
<p>* Observação: Comprimento da talisca igual a 30 cm (ℓ); Largura, espessura e comprimento do reforço iguais a respectivamente, 2 cm, 0,5 cm e 10 cm; Comprimento do trecho a ser alongado igual a 18 cm (ℓ_0).</p>			

ANEXO III – Tensões e Forças relativas ao Ensaio de Tração.

Corpos de Prova		Força de Ruptura (kgf)	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Taliscas sem reforço	CP 1*	959,44	91,5	21,39
	CP 2*	867,73	81,8	20,15
	CP 3	1004,79	96,8	-
	CP 4	1230,54	119,4	-
	CP 5	947,34	92,3	-
	CP 6	1282,94	124,3	-
	CP 7	1227,51	118,5	-
Média		1074,3	103,5	20,77
Desvio Padrão		± 155,0	± 15,5	± 0,62
Taliscas com reforço	CP 1*	1097,51	119,7**	-
	CP 2*	1037,04	119,5**	-
	CP 3	1428,07	157,3**	-
	CP 4	1065,26	115,4**	-
	CP 5	1798,94	159,0**	-
	CP 6	1399,85	153,9**	-
	CP 7	1194,26	137,8**	-
Média		1288,7	137,5**	-
Desvio Padrão		± 253,8	± 17,9	-
<p>* Os CPs 1 e 2, das taliscas com e sem reforço, foram instrumentados com extensômetros elétricos.</p> <p>** Considerando-se a área da seção transversal fora do reforço com dimensão de ±(2 cm x 0,5 cm).</p>				

ANEXO IV – Características Mecânicas do Concreto.

IV.1 Concreto usado nas VIGAS REFERÊNCIA e nos Ensaios de Arrancamento

Idade de Ruptura	Corpo de Prova	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Módulo (MPa)	Resistência à Compressão Diâmetral (MPa)	Absorção (%)		
7 DIAS	1	15,94					
	2	16,84					
	3	17,16					
	4	15,12					
MÉDIA \leq 6%		16,65					
DESVIO PADRÃO		\pm 0,516					
28 DIAS	1	24,88	32420,42				
	2	25,32					
	3	24,75	30789,79	3,00	3,75		
	4	25,78	31989,77	2,35	5,39		
	5	25,67	30780,48	2,66	6,71		
	6	26,19	31374,21	2,84	4,74		
MÉDIA \leq 6%		25,43	31470,93	2,71	5,15		
DESVIO PADRÃO		\pm 0,506	\pm 651,27	\pm 0,241	\pm 1,07		
360 DIAS	1	35,46					
	2	32,84				30157,09	2,84
	3	32,10				27644,00	3,28
	4	29,73				30205,58	3,63
MÉDIA \leq 6%		32,47	29335,56	3,25			
DESVIO PADRÃO		\pm 0,370	\pm 1196,27	\pm 0,323			

IV.2 Concreto usado nas VIGAS BAMBU

Idade de Ruptura	Corpo de Prova	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Módulo (MPa)	Resistência à Compressão Diâmetral (MPa)	Absorção (%)		
7 DIAS	1	17,62					
	2	17,42					
	3	17,35					
	4	17,28					
MÉDIA \leq 6%		17,42					
DESVIO PADRÃO		$\pm 0,127$					
28 DIAS	1	26,95	27455,48		7,20		
	2	29,32	30517,43	2,40	7,00		
	3	26,14	29152,97	3,46	6,80		
	4	25,97	26638,53	3,25	7,00		
MÉDIA \leq 6%		26,35	28441,10	3,04	7,00		
DESVIO PADRÃO		$\pm 0,428$	$\pm 1503,21$	$\pm 0,458$	$\pm 0,141$		
360 DIAS	1	33,57					
	2	32,61				28972,07	3,57
	3	29,63				27349,90	2,56
	4	33,91				30409,17	3,49
MÉDIA \leq 6%		33,37	28910,38	3,21			
DESVIO PADRÃO		$\pm 0,549$	$\pm 1249,70$	$\pm 0,458$			

IV.2 Concreto usado nas VIGAS BAMBU REFORÇADO

Idade de Ruptura	Corpo de Prova	Resistência à Compressão Axial (MPa)	Módulo (MPa)	Resistência à Compressão Diâmetral (MPa)	Absorção (%)	
7 DIAS	1	16,93				
	2	15,21				
	3	16,85				
MÉDIA \leq 6%		16,89				
DESVIO PADRÃO		\pm 0,040				
28 DIAS	1	27,68	30230,29	3,79	6,92	
	2	26,19			3,20	
	3	27,59			5,49	
	4	28,88			3,97	
MÉDIA \leq 6%		27,58	27927,98	3,13	4,90	
DESVIO PADRÃO		\pm 0,953	\pm 5300,48	\pm 0,517	\pm 1,43	
360 DIAS	1	34,19	30088,01	2,73		
	2	35,14				2,35
	3	30,77				2,83
	4	37,26				3,02
MÉDIA \leq 6%		34,67	30088,01	2,73		
DESVIO PADRÃO		\pm 0,475	\pm 1048,06	\pm 0,282	\pm 1,43	

ANEXO V – Resultados do Ensaio de Arrancamento.

V.1. Tensão máxima de Aderência e Normal (em MPa) dos corpos de prova moldados com concreto (mesmo concreto que foi usado para moldar as VIGAS REFERÊNCIA)

Corpo de Prova		Tensão de Aderência (MPa)	Tensão de Tração (MPa)
Com reforço	CP 01	Ruptura por tração	117,3
	CP 02	Ruptura por tração	88,4
	CP 03	Ruptura por tração	93,3
	CP 04	Ruptura por tração	81,4
	CP 05	Ruptura por tração	104,7
Média		-	97,0
Desvio Padrão		-	± 12,7
Sem reforço	CP 06	0,866	74,6
	CP 07	0,859	73,6
	CP 08	0,828	71,4
	CP 09	0,904	77,9
	CP 10	0,988	85,2
Média		0,889	76,5
Desvio Padrão		± 0,055	± 4,8

V.2. Modos de ruptura dos corpos de prova moldados com concreto (mesmo concreto que foi usado para moldar as VIGAS REFERÊNCIA)

Corpo de Prova		Modos de Ruptura
Com reforço	CP 01	Tração (ruptura no nó interno reforçado)
	CP 02	Tração (ruptura no nó externo reforçado, após o descolamento dos reforços)
	CP 03	Tração (ruptura no nó externo reforçado, após o descolamento dos reforços)
	CP 04	Tração (ruptura no nó externo reforçado, após o descolamento dos reforços)
	CP 05	Tração (ruptura da talisca na região da sua fixação à prensa, com descolamento de um dos reforços)
Sem reforço	CP 06	Escorregamento
	CP 07	Escorregamento
	CP 08	Escorregamento
	CP 09	Escorregamento
	CP 10	Escorregamento