



ESTUDO DA ADERÊNCIA BAMBU-BIOCONCRETO

Nathalia Andrade da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Rio de Janeiro

Agosto 2019

Silva, Nathalia Andrade da

Estudo da aderência bambu-bioconcreto/Nathalia
Andrade da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XVIII, 112 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE/Programa de
Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 106-112.

1.Bambu. 2.Bioconcreto. 3.Reforço estrutural.
4.Aderência. I. Toledo Filho, Romildo Dias. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Dedico este trabalho ao meu filho, valente,

Matias Andrad

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus, que me sustentou durante todas as aflições que vivi durante este mestrado e não foram poucas, Sua fidelidade nunca faltou. Obrigada Pai!

Ao Marlon, que sempre me motivou a prosseguir, acreditando no meu potencial e embarcando em todos os meus sonhos. Amor, obrigada porque sem você eu não teria conseguido!

Para o Matias, eu digo que ele é minha inspiração desde seu nascimento, nunca desistiu de lutar pela vida e foi o presente que Deus me deu no começo da minha pesquisa. Filho todo o amadurecimento que conquistei aqui é graças a você. Obrigada meu amor!

Aos meus pais que são incansáveis em me ajudar em todas as etapas da minha formação, todos os conselhos, apoio com Matias e orações foram fundamentais. Aos meus sogros pelas orações, apoio e cuidado de maneira intensa do Matias nesta reta final. A minha tia Edna que uma vez na semana durante meses, cuidou do Matias para que eu pudesse me dedicar à pesquisa.

Ao meu orientador Professor Romildo, que acreditou em mim até o final, sempre me dando forças para terminar com a palavra que levarei para sempre: AVANTE!

Aos meus amigos Raphael, Joyce, Daniel, Thiago, Flávia, Tainá, Pedro, Rael, Camila e Sol por sempre estarem torcendo por mim, me dando palavras de encorajamento e sempre acreditando no meu potencial. Em especial a Raila que cuidou de Matias desde que ele tinha 4 meses, amiga todo seu apoio foi fundamental, serei eternamente grata.

No Numats conheci e amadureci amizades maravilhosas. Yassin foi um presente de Deus para minha vida, uma pessoa de coração tão grande que me ajudou e me aconselhou durante todo o período que fiquei aqui, obrigada por estar comigo nos momentos de choro e sorriso, você com certeza faz parte da minha família. Vanessa, aquela que me inspirou a trabalhar com bambu, seu potencial, responsabilidade e inteligência levo como referência para a vida, em todas as vezes que estive no hospital com Matias não deixava minha pesquisa parar, menina tenho certeza que vou ver muito ANDREOLA citado pelo

mundo a fora. Dani, a nordestina mais forte que já conheci, muito obrigada por sempre me ajudar a procurar maneiras mais eficientes de fazer a minha pesquisa, seus conselhos foram valiosos. Bruno tenho um carinho imenso por você menino e acredito no seu potencial, obrigada pelos doces, discussões sobre a pesquisa e por sempre acreditar em mim, o “filho” grande que Deus me deu.

À melhor sala deste laboratório composta por pessoas que deixavam meus dias mais leves e alegres, amo vocês! Giu adorava receber seus abraços, Monica sempre se preocupando comigo e me ajudando em tudo que estava ao seu alcance, Pedro obrigada pela disponibilidade e todos os bate papos espirituais, Amandinha obrigada por estar comigo na cama elástica quando rompi o ligamento do joelho, rs, menina que tem o sotaque mais bonito do Numats e Yasmim por me acompanhar desde o início e sempre me dando palavras de apoio.

Ao Rodrigo, um IC super responsável e competente que me ajudou muito no início da pesquisa, sou super grata por tudo.

Aos demais pesquisadores do Numats, Tamara, Iolanda, Carol, Mayara, Lucas, Anilé, Fabrício, Camila, Alfredo, Amanda V., Rayane, Karla, Liu e Carol, agradeço muito todo o carinho que demonstraram a mim e a minha família, só eu sei o quanto me ajudaram no momento que descobri a doença do Matias.

Aos funcionários do Numats, Márcio, Flavinho, Bruna, Luzidelle, Marcelo, Mauro, Helder, Claudinha e Adailton vocês foram fundamentais na pesquisa, de limpar a sala, resolver questões burocráticas, preparar corpos-de-prova até a realização dos ensaios. Etapas que regeram toda a minha pesquisa, obrigada!

A dupla que conheci no Numats e levo para vida as Gabi's, mesmo longe nunca se esqueceram de mim, sempre mandando mensagens cheias de amor e abraçando a causa do Matias. Amo vocês!

A CAPES, através do PEC/COPPE/UFRJ pelo apoio financeiro.

Não foi nada fácil chegar até aqui, fiquei grávida, tive um diagnóstico que meu filho possui uma doença rara, tratamentos, internações, mas ter uma REDE me apoiando e cuidado de mim foi essencial. Muito obrigada, serei eternamente grata!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DA ADERÊNCIA BAMBU-BIOCONCRETO

Nathalia Andrade da Silva

Agosto/2019

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho tem como objetivo o estudo da aderência de ripas de bambu da espécie *Dendrocalamus Giganteus* a bioconcretos de bambu. As ripas foram caracterizadas mecanicamente através de ensaios de tração direta e flexão e os bioconcretos foram produzidos contendo frações volumétricas de 25, 35 e 45% de bioagregados de bambu. Os bioconcretos foram caracterizados mecanicamente através de ensaios de tração direta, compressão uniaxial e tração por compressão diametral. Para promover uma maior aderência ao bioconcreto, as ripas de bambu foram tratadas com resina epóxi e areia e o efeito destes tratamentos foi avaliado através de ensaio de arrancamento. A análise da transferência de tensões entre o bioconcreto e as ripas de reforço foi realizada através do ensaio de tirante. Nesse caso apenas ripas tratadas com o tratamento que apresentou melhor resultado no ensaio de arrancamento (resina+areia) foi utilizado. Os resultados mostram que as ripas de bambu sem nó apresentam uma resistência à tração de 160 MPa e um módulo de elasticidade de 22 GPa. O tratamento com areia e epóxi resultou uma tensão de aderência bambu-bioconcreto de 4,53 MPa e que no ensaio de tirante o comportamento apresentando pelo compósito bioconcreto-bambu exibe a fase elástica, múltipla fissuração e pós-fissuração.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

BOND-BEHAVIOR OF BAMBOO STRIP AND BAMBOO - BIOCONCRETE

Nathalia Andrade da Silva

August/2019

Advisor: Romildo Dias Toledo Filho

Department: Civil Engineering

This work aims to study the bond-behavior of bamboo strips of the species *Dendrocalamus Giganteus* to bamboo bioconcretes. The strips were mechanically characterized by direct tensile and flexural tests and the bioconcretes were produced containing 25, 35 and 45% volumetric fractions of bamboo bioaggregates. Bioconcretes were mechanically characterized by direct tensile, uniaxial compression and diametral compression tensile tests. In order to promote greater adherence to the bioconcrete, the bamboo strips were treated with epoxy resin and sand and the effect of these treatments was evaluated by pullout test. The stress transfer analysis between the bioconcrete and the reinforcement strips was performed by the tension stiffening test. In this case only strips treated with the treatment that presented the best result in the pullout test (resin + sand) was used. The results show that the knotless bamboo strips have a tensile strength of 160 MPa and a modulus of elasticity of 22 GPa. Treatment with sand and epoxy resulted in a bamboo-bioconcrete bonding stress of 4.53 MPa and in the tension stiffening test the behavior presented by the bioconcrete-bamboo composite exhibits the elastic phase, multiple cracking and post-cracking.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Objetivo Geral..... | 2 |
| 1.2 Objetivos específicos | 3 |
| 1.3 Organização do Trabalho | 3 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1 O bambu..... | 4 |
| 2.1.1 Características morfológicas e anatômicas..... | 4 |
| 2.1.2 Características químicas | 8 |
| 2.1.3 Características físicas | 9 |
| 2.1.4 Características mecânicas | 10 |
| 2.1.5 Aplicações do bambu..... | 13 |
| 2.2 Compósitos de matriz cimentícia e bambu | 16 |
| 2.3 Uso do bambu como reforço estrutural..... | 19 |
| 2.4 Aderência | 22 |
| 2.4.1 Tipos de aderência | 22 |
| 2.4.2 Ensaio de aderência..... | 23 |
| 2.4.2.2 Ensaio de Tirante de Concreto..... | 24 |
| 2.4.3 Aderência bambu-concreto..... | 27 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS EXPERIMENTAIS | 35 |
| 3.1 Metodologia | 35 |
| 3.2 Ripas de Bambu | 35 |
| 3.2.1 Características dos colmos | 35 |
| 3.2.2 Processamento dos colmos | 36 |
| 3.2.3 Ensaio Físicos | 37 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2.4 | Ensaio Mecânicos | 39 |
| 3.3 | Agregado de Bambu | 41 |
| 3.3.1 | Características dos resíduos de bambu | 41 |
| 3.3.2 | Produção do agregado | 41 |
| 3.3.3 | Homogeneização dos agregados de bambu | 44 |
| 3.3.4 | Pré-tratamento do agregado de bambu | 44 |
| 3.3.5 | Morfologia do agregado de bambu-AIMS | 45 |
| 3.3.6 | Teor de umidade, massa específica e absorção de água | 47 |
| 3.4 | Bioconcreto de Bambu (BCB) | 49 |
| 3.4.1 | Materiais | 49 |
| 3.4.2 | Produção do bioconcreto de bambu | 50 |
| 3.4.3 | Ensaio no Bioconcreto de bambu | 51 |
| 3.5 | Aderência bambu- bioconcreto | 55 |
| 3.5.1 | Tratamento das ripas de bambu | 55 |
| 3.5.2 | Ensaio de Aderência..... | 56 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 64 |
| 4.1 | Ripas de bambu..... | 64 |
| 4.1.1 | Ensaio físicos | 64 |
| 4.1.2 | Ensaio mecânicos | 65 |
| 4.2 | Agregado de bambu..... | 72 |
| 4.2.1 | Ensaio de extrativos..... | 72 |
| 4.2.2 | Morfologia – AIMS | 73 |
| 4.2.3 | Massa específica, absorção de água e teor de umidade | 76 |
| 4.3 | Bioconcreto de bambu | 77 |
| 4.3.1 | Cimento, metacaulinita e cinza volante..... | 77 |
| 4.3.2 | Espalhamento e densidade..... | 78 |
| 4.4 | Aderência bambu-bioconcreto..... | 87 |

| | |
|--|-----|
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 104 |
| 5.1 Conclusões..... | 104 |
| 5.2 Sugestões para trabalhos futuros | 105 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 106 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1- Distribuição do bambu no mundo. | 4 |
| Figura 2.2- Morfologia de crescimento do bambu paquimorfo. Adaptada de Bamboo Botanicals em: www.bamboobotanicals.ca | 5 |
| Figura 2.3- Divisão das partes do colmo e corte transversal do colmo de bambu da região interna ilustrando feixes no interior do nó. | 5 |
| Figura 2.4- Distribuição dos feixes vasculares na parede do colmo. | 6 |
| Figura 2.5- A) Região da interface entre fibra e matriz; B) Seção de transição fibra e da matriz do bambu; C) Feixe fibrovascular. Adaptado Krause (2015); Azadeh (2018) | 7 |
| Figura 2.6- Seccionamento das camadas da parede do colmo da espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i> | 8 |
| Figura 2.7- Grânulos de amido em variadas espécies de bambu. | 9 |
| Figura 2.8- Usos do bambu de acordo com as idades de maturação. Adaptado: Hildalgo-López (2003). | 14 |
| Figura 2.9- Estação Terminal Cabecera Aguablanca, Cali. | 15 |
| Figura 2.10- Orfanato para crianças refugiadas, Tailândia. | 15 |
| Figura 2.11- Construções de bambu no Brasil. (A) Pergolado-Angra dos Reis. Ebiobambu, Brasil. (B) Albergue- Bahia. IR Arquitectura, Argentina. | 15 |
| Figura 2.12- Produtos gerados pelo processamento do bambu. Adaptada de Moizés (2007) | 16 |
| Figura 2.13- Partículas obtidas após o processo de obtenção dos bioagregados. | 16 |
| Figura 2.14- Comparação da resistência a compressão x teor de agregado de bambu. ... | 18 |
| Figura 2.15- Estrutura do painel. | 19 |
| Figura 2.16- A) Representação do painel; B) Aplicação do painel para habitação popular e C) Painel na forma reduzida. | 20 |
| Figura 2.17- Edificações construídas com painéis de bambu revestidos com argamassa. | 21 |
| Figura 2.18- Vigas de concreto reforçadas com ripas de bambu. | 21 |
| Figura 2.19- Curvas esquemáticas tensão de aderência x deslocamento e estágios da aderência aço-concreto. Adaptada de FIB (1999) | 22 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.20- Ensaio de Tirantes de Concreto. | 24 |
| Figura 2.21- A) Curva tensão x deformação-modelo ACK, Bentur (2007); B) Comportamento do tirante de concreto sob esforço de tração.FIB (2000)..... | 24 |
| Figura 2.22- Comparação entre as curvas típicas força x deformação axial aos 28 dias de concreto de resistência normal e de concreto de alto desempenho: C25-25 e C65-25. Fonte: Rangel (2015)..... | 26 |
| Figura 2.23- A) Curva tensão x deformação dos tirantes de concreto da classe C25; B) Processo de fissuração no corpo-de-prova de tirantes de concreto da classe C25 sob esforços de tração, com marcação da ordem das fissuras. Rangel (2015)..... | 26 |
| Figura 2.24- Inchamento associado ao uso do bambu cru no concreto..... | 27 |
| Figura 2.25- Lajes de concreto reforçadas com bambu..... | 28 |
| Figura 2.26- Características dos corpos-de-prova para ensaio de arrancamento. | 29 |
| Figura 2.27- Revestimentos utilizados nas ripas: A) Epóxi a base de água; B) Truegrip BT e EP; C) ExaPhe; D) revestimento de esmalte. | 31 |
| Figura 2.28- Ensaio de pull-out bambu-concreto. | 32 |
| Figura 2.29- Reforços dos painéis: A) RCC; B)UTBRC; C) PTBRC D) GTBRC..... | 32 |
| Figura 2.30- Painel PCC sendo ensaiado. | 33 |
| Figura 3.1- Colmos de bambu adquiridos para a pesquisa da espécie <i>Dendrocalamus Giganteus</i> | 36 |
| Figura 3.2- Processo utilizado para obtenção das ripas..... | 36 |
| Figura 3.3- Maquinário utilizado para processamento dos colmos: A) Serra circular esquadrejadeira; B) Plaina desengrossadeira; C) Plaina desempenadeira..... | 37 |
| Figura 3.4- Ripas de bambu utilizadas na pesquisa..... | 37 |
| Figura 3.5- Corpo de prova para ensaios físicos. | 38 |
| Figura 3.6- Ensaio de absorção. A) Corpos de prova submersos em água para o ensaio de absorção; B) Balança utilizada para pesagem dos corpos de prova. | 38 |
| Figura 3.7- Ensaio de tração simples em ripas de bambu: A) MUE-Shimadzu AG-X com setup para o ensaio de tração simples; B) Clip-gage posicionado na ripa de bambu; C) Detalhe das garras prendendo a ripa de bambu. | 39 |
| Figura 3.8- Ripas para ensaios mecânicos..... | 40 |
| Figura 3.9- Ensaio de flexão 3 pontos em ripas de bambu: A) MUE-Shimadzu AG-X com setup para ensaio de flexão 3 pontos; B) Montagem ensaio de flexão; C) Ruptura da ripa de bambu durante ensaio de flexão. | 40 |
| Figura 3.10- Resíduos de bambu utilizados na presente pesquisa..... | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.11- Etapas de produção do agregado de bambu..... | 41 |
| Figura 3.12- Etapa 1 da produção dos agregados: A) Corte dos resíduos de bambu em serra circular; B) Resíduos após o corte. | 42 |
| Figura 3.13- Etapa 2 da produção dos agregados: A) Moinho industrial de construção civil (Marca Framaq); B) Inserção dos resíduos no moinho e C) Agregado graúdo de bambu. | 42 |
| Figura 3.14- Etapa 3 da produção dos agregados: A) Moinho de facas (Marca: Primotécnica); B) Tela do moinho com abertura de 9 mm; C) Agregado miúdo de bambu. | 43 |
| Figura 3.15- Etapa 4 da produção dos agregados: A) Peneirador mecânico; B) Agregados de bambu utilizado na pesquisa..... | 43 |
| Figura 3.16- Homogeneização dos agregados de bambu: A) Preparo da pilha alongada de agregado de bambu; B) Pilha de agregado finalizada. | 44 |
| Figura 3.17- Pré-tratamento do bioagregado de bambu: A) Água em processo de aquecimento até atingir 80°C; B) Agregado de bambu em água. | 45 |
| Figura 3.18- Análise da morfologia dos agregados de bambu: A) Equipamento AIMS; B) Disposição das partículas de bambu. | 46 |
| Figura 3.19- Amostras utilizadas para ensaio de teor de umidade. | 47 |
| Figura 3.20- Etapa inicial do ensaio de massa específica do agregado de bambu: A) Agregado imerso em água por 24h; B) Agregado seco ao ar..... | 47 |
| Figura 3.21- Ensaio de massa específica: A)Tronco de cone; B) Agregado de bambu após a compactação; C) Frasco com amostra do agregado. | 48 |
| Figura 3.22- Agregado de bambu em água para ensaio de absorção. | 48 |
| Figura 3.23- Ensaio de compressão uniaxial do bioconcreto de bambu. | 53 |
| Figura 3.24- Corpo-de-prova de bioconcreto para ensaio de tração direta. | 53 |
| Figura 3.25- Ensaio de tração direta do bioconcreto de bambu. | 54 |
| Figura 3.26- Ensaio de resistência a tração por compressão diametral do bioconcreto de bambu. | 54 |
| Figura 3.27- Etapas dos tratamentos das ripas de bambu..... | 56 |
| Figura 3.28- Ripas tratadas utilizados no ensaio de arrancamento. | 57 |
| Figura 3.29- A) Ripas fixadas no fundo do molde; B) Finalização da moldagem..... | 57 |
| Figura 3.30- A) Corpos-de-prova utilizados nos ensaios de arrancamento; B) Setup do ensaio de arrancamento. | 58 |
| Figura 3.31- Vista 3D do tirante de bioconcreto reforçado com bambu..... | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.32- Vista frontal com as dimensões do tirante e as extremidades das ripas. | 59 |
| Figura 3.33- Dimensões da ripa de bambu utilizada no ensaio de tirante..... | 60 |
| Figura 3.34- Ensaio de tração direta na ripa de bambu tratada e de 72 cm de comprimento..... | 60 |
| Figura 3.35- Moldagem dos corpos-de-prova do ensaio de tirante: A) Posicionamento das ripas no molde; B) Lançamento do bioconcreto de bambu e C) Após a aplicação da terceira camada de bioconcreto. | 61 |
| Figura 3.36- Montagem do ensaio de tirante..... | 62 |
| Figura 3.37- Análise do espaçamento entre fissuras no tirante..... | 62 |
| Figura 4.1- Curvas tensão x deformação das ripas de bambu sem nó na tração direta.... | 65 |
| Figura 4.2- Curvas tensão x deformação das ripas de bambu com nó na tração direta.... | 67 |
| Figura 4.3- Modos de ruptura das ripas de bambu sem nó: A) Tração em bloco; B) Cisalhamento. | 69 |
| Figura 4.4- Modo de ruptura ripas com nó..... | 69 |
| Figura 4.5- Curvas típicas ensaio de flexão das ripas de bambu sem nó | 70 |
| Figura 4.6- Modo de ruptura das ripas sem nó submetidas a cargas de flexão..... | 71 |
| Figura 4.7- Concentração de extrativos após os ciclos de lavagem. | 72 |
| Figura 4.8- Curva de extrativos acumulados x número de lavagens..... | 73 |
| Figura 4.9- Curvas de distribuição para o agregado de bambu. | 74 |
| Figura 4.10- Morfologia dos agregados de bambu..... | 75 |
| Figura 4.11- Curvas granulométricas dos materiais cimentícios..... | 78 |
| Figura 4.12- Espalhamentos obtidos para as misturas realizadas: A) 25% de bambu; B) 35% de bambu; C) 45% de bambu. | 79 |
| Figura 4.13- Curvas tensão x deformação dos bioconcretos em cura seca e úmida após 28 dias de cura. | 80 |
| Figura 4.14- Curvas tensão x deformação aos 7 e 28 dias de idade..... | 81 |
| Figura 4.15- BCB 25%..... | 83 |
| Figura 4.16- BCB 35%..... | 83 |
| Figura 4.17- BCB 45%..... | 83 |
| Figura 4.18- Curvas tensão x deformação na tração direta para bioconcreto de bambu.. | 84 |
| Figura 4.19- Modo de ruptura do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. | 86 |
| Figura 4.20- Região de esmagamento ocasionada durante a realização do ensaio. | 86 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.21- Curvas força x deslocamento do ensaio de arrancamento para os diferentes tratamentos estudados..... | 87 |
| Figura 4.22- Amostras após a realização do ensaio: A) REF; B) SIK. | 89 |
| Figura 4.23- Amostras após a realização do ensaio: A) AS1; B) AS2..... | 90 |
| Figura 4.24- Curva força x deslocamento do ensaio de arrancamento com ripas tratadas e bioconcreto de diferentes misturas. | 91 |
| Figura 4.25- Curva típica força x deformação para ripa de bambu tratada..... | 92 |
| Figura 4.26- Comportamento do tirante de bioconcreto reforçado com bambu. | 93 |
| Figura 4.27- Curvas força x deformação resultante do ensaio de tirante. | 96 |
| Figura 4.28- Fissuras típicas apresentadas nos tirantes..... | 97 |
| Figura 4.29- Configuração final das fissuras no tirante com 25% de agregado de bambu. | 98 |
| Figura 4.30- Configuração final das fissuras no tirante com 35% de agregado de bambu. | 98 |
| Figura 4.31- Configuração final das fissuras no tirante com 45% de agregado de bambu. | 98 |
| Figura 4.32- Fissuras apresentadas no tirante após ensaio: 25%..... | 100 |
| Figura 4.33- Fissuras apresentadas no tirante após ensaio: 35%..... | 101 |
| Figura 4.34- Fissuras apresentadas nos tirantes após ensaio: 45%. | 102 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1- Distribuição dos elementos anatômicos da espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i> . Beraldo & Zoulalian (1995) | 7 |
| Tabela 2.2- Massa específica aparente em ripas laminadas de bambu. Pereira (2006).... | 10 |
| Tabela 2.3- Tensão máxima e módulo de elasticidade das ripas de <i>Dendrocalamus Giganteus</i> . Krause (2015)..... | 12 |
| Tabela 2.4- Revisão da literatura das características mecânicas de espécies de bambu mais utilizadas para fins estruturais..... | 13 |
| Tabela 2.5- Tensões de aderência (MPa) dos corpos-de-prova. Mesquita et al. (2006)... | 30 |
| Tabela 2.6- Tensão de aderência de acordo com os tratamentos. Agarwal et al. (2014) . | 31 |
| Tabela 2.7- Tensão de aderência. Pereira (2002); Culzoni (1986)..... | 34 |
| Tabela 3.1- Índices de angularidade e limites de classificação. Al Rousan (2005)..... | 46 |
| Tabela 3.2- Dosagem do bioconcreto de bambu (kg/m ³). | 51 |
| Tabela 4.1- Características física das ripas de bambu. | 64 |
| Tabela 4.2- Valores de resistência à tração para ripas de bambu sem nó..... | 66 |
| Tabela 4.3- Valores de resistência à tração para as ripas de bambu com nó..... | 68 |
| Tabela 4.4- Valores de resistência à flexão para ripas de bambu sem nó. | 71 |
| Tabela 4.5- Valores médios das análises de angularidade e forma 2D. | 74 |
| Tabela 4.6- Dimensões dos agregados de bambu..... | 76 |
| Tabela 4.7- Valores de massa específica, absorção de água e teor de umidade obtidos para o agregado de bambu..... | 76 |
| Tabela 4.8- Composição química e densidade dos matérias cimentícios..... | 77 |
| Tabela 4.9- Densidade dos bioconcretos. | 80 |
| Tabela 4.10- Valores médios de resistência à compressão de acordo com o tipo de cura aplicado..... | 81 |
| Tabela 4.11- Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 7 e 28 dias de idade, com coeficiente de variação em %. | 82 |
| Tabela 4.12- Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade aos 28 dias de idade, com coeficiente de variação em %..... | 85 |

| | |
|--|----|
| Tabela 4.13- Valores médios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade, com coeficiente de variação em % | 86 |
| Tabela 4.14- Valores de força de arrancamento e tensão de aderência para diferentes tratamentos, com coeficiente de variação em % | 88 |
| Tabela 4.15- Valores de força de arrancamento e tensão de aderência para diferentes bioconcretos e ripas tratadas, com coeficiente de variação em % | 91 |
| Tabela 4.16- Resultados do ensaio de tirantes até o surgimento da primeira fissura. Coeficiente de variação entre parênteses em % | 94 |
| Tabela 4.17- Resultados do ensaio de tirantes após a múltipla fissuração. Coeficiente de variação entre parênteses em % | 95 |
| Tabela 4.18- Coeficiente de conformação superficial e tensão de aderência. | 99 |

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais motivos para a utilização de materiais ecológicos é o aumento da degradação do ecossistema global, a relação agressiva entre o homem e o meio em que habita. Neste sentido torna-se necessário que a indústria busque novas alternativas para substituição dos materiais convencionais, tais como o aço e o cimento, no âmbito da construção civil. Portanto, resíduos agroindustriais, fibras vegetais e bambu, têm sido estudados no Núcleo de Materiais e Tecnologias Sustentáveis (NUMATS/UFRJ/COPPE), assim como em outras universidades no Brasil e no mundo, para que futuramente sejam empregados como materiais de construção.

Entre os materiais estudados, Greco & Cromberg (2011) relatam que o bambu é amplamente aplicado em praticamente todos os ramos das atividades humanas. Não é por acaso que é conhecido popularmente como “a planta dos mil usos”. As aplicações vão desde procedimentos rudimentares e artesanais até os mais complexos processos industriais.

O bambu surge hoje como uma solução para o futuro, já que é amigável para o homem e para a natureza e pode ser utilizado na construção de pontes, casas, monumentos, estruturas efêmeras, mobiliário, papel, biodiesel, fertilizantes, sustentação de barrancos e alimento. Além disso possui níveis baixos de emissões de CO₂ e podem equilibrar as emissões causadas por materiais de construção convencionais (CAEIRO, 2010; ZEA ESCAMILLA *et al.* 2018).

No Brasil a utilização do bambu ainda é predominantemente artesanal, não sendo possível, por exemplo, ser encontrado em lojas de materiais de construção. Segundo Gonçalves (2014) a justificativa para não comercialização em larga escala é que o material possui enorme vulnerabilidade, e que se não for adequadamente tratado contra insetos, seu desempenho é inadequado, reduzindo assim sua utilização.

Alguns estudos realizados por Javadian (2019), Andreola (2017), Pereira (2012), Ghavami (2005), Hidalgo-lópez (2003), Pereira da Rosa (2002), Navarro (2002), Beraldo (1997), Ghavami & Toledo (1992) mostram resultados promissores quanto às maneiras de processamento do bambu, suas propriedades físicas e mecânicas e os vários tipos de aplicações em construções, inclusive como reforço estrutural.

Uma das aplicações que vale ressaltar é o uso de resíduos do bambu como agregado em matrizes cimentícias para produzir o bioconcreto de bambu. Esse material possibilita a redução dos impactos ambientais por utilizarem materiais renováveis em sua composição e por apresentarem propriedades mecânicas tais como resistência a compressão, tração, ductilidade e comportamento pós-fratura adequadas para uso nas construções (ANDREOLA 2017).

Para o bambu ser utilizado como elemento de reforço em estruturas na forma de ripas ou partes do colmo, um estudo de suma importância é a aderência bambu-concreto, pois assim como ocorre uma transferência de tensões entre o concreto e a armadura de aço, o sistema bambu-concreto similarmente necessita ser eficiente e responder adequadamente às solicitações estruturais externas.

Uma alternativa interessante e sustentável é a combinação do bambu com o bioconcreto visando o desenvolvimento de elementos estruturais leves para sistemas estruturais sustentáveis. Com base no exposto, a presente pesquisa propõe o estudo da aderência bambu-bioconcreto de bambu, onde o reforço se apresenta no formato de ripas e recebem tratamentos com resina epóxi e areia com o objetivo de melhorar a aderência desses materiais.

1.1 Objetivo Geral

Objetivou-se com presente estudo analisar a aderência de ripas de bambu ao bioconcreto de bambu.

1.2 Objetivos específicos

- Estudar tratamentos superficiais da ripa de bambu que melhorem sua aderência com bioconcreto de bambu;
- Analisar a influência do teor de biomassa na aderência entre o bio-concreto e a ripa do bambu;
- Desenvolver o modelo comportamental do tirante ripa de bambu-bioconcreto sob esforço de tração;

1.3 Organização do Trabalho

Capítulo 1: Introdução ao tema estudado, apresentando o objetivo geral e a organização da pesquisa.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica sobre as características físicas e mecânicas do bambu, suas aplicações na forma de ripa como reforço e no formato de partículas associadas ao cimento. E por fim um estudo sobre aderência bambu-concreto.

Capítulo 3: Apresentação do programa experimental, com descrição das etapas e especificação dos processos de produção das ripas, do agregado de bambu, do bioconcreto de bambu e dos métodos aplicados para a análise da aderência bambu-bioconcreto.

Capítulo 4: Expõe todos os resultados e discussões obtidos através dos ensaios realizados para cada etapa da pesquisa.

Capítulo 5: Conclusões dos resultados da pesquisa e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O bambu

O bambu pertence à subfamília *Bambusoideae* da família das gramíneas *Poaceae* (ou *Gramineae*). Existem cerca de 75 milhões de gêneros com aproximadamente 1.300 espécies e variedades que cobrem 25 milhões de hectares no mundo (LIESE & KOHL, 2015). No Brasil existem 35 gêneros e 258 espécies, sendo que algumas ainda não foram descritas e 175 espécies são consideradas endêmicas (FILGUEIRAS & VIANA, 2017). Pode ser visualizado na Figura 2.1 a distribuição de florestas de bambu no mundo.



Figura 2.1- Distribuição do bambu no mundo.

Fonte: China Scenic, em: www.chinascenic.com

2.1.1 Características morfológicas e anatômicas

Os principais componentes estruturais do bambu são: raízes, rizomas, colmos, ramos, folhas e flores. Portanto, as estruturas mais estudadas são colmos e rizomas (Figura 2.2). O colmo, localizado na parte superior da planta, é um tubo cilíndrico e oco, que se difere em altura, diâmetro, espessura de parede e forma de crescimento, conforme a espécie a que pertença. O diâmetro do colmo é definido a partir do momento que ele

brota, na região basal é maior, menor na região intermediária e afunila-se em direção à região do topo. A parte subterrânea é constituída de rizomas e raízes. O rizoma exerce um papel fundamental no desenvolvimento do bambu, armazenando nutrientes e sendo responsável pela propagação do bambu (RUSCH *et al.*, 2018; PEREIRA & BERALDO, 2016; GRECO & CROMBERG, 2011).

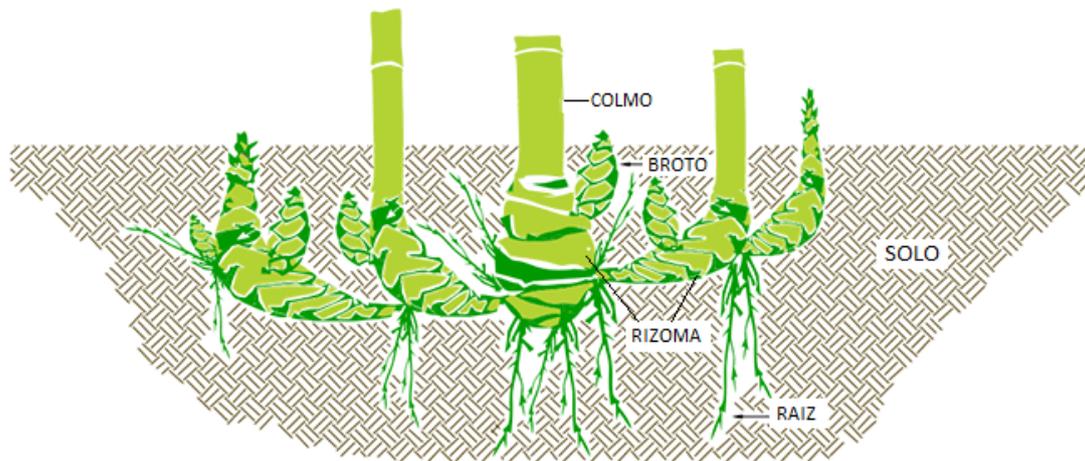


Figura 2.2- Morfologia de crescimento do bambu paquimorfo. Adaptada de Bamboo Botanicals em: www.bamboobotanicals.ca.

O colmo do bambu é dividido em região de nó e entrenó, conforme ilustrado na Figura 2.3. Externamente o colmo é constituído por células epidérmicas cobertas por uma camada cutinizada e internamente é formado por células de parênquima e feixes fibrovasculares (RUSCH *et al.* 2018; PEREIRA & BERALDO, 2016).



Figura 2.3- Divisão das partes do colmo e corte transversal do colmo de bambu da região interna ilustrando feixes no interior do nó.

Na região interna do nó, verificam-se abundantes feixes fibrovasculares (fibras) envolvidos por células de parênquima (matriz), que possuem função de estocar água e nutrientes. Os feixes fibrovasculares constituem o tecido esclerenquimático e são os principais responsáveis pela resistência mecânica dos colmos.

Os feixes fibrovasculares na região nodal seguem de forma direta e indireta de um entrenó para o outro, região conhecida como diafragma nodal, que proporciona suporte aos colmos, tornando-os capazes de resistir à ação do vento e permitindo suportar o próprio peso (RUSCH *et al.* 2018; LUIS, ZGL *et al.* 2017).

Na Figura 2.4, analisando a parede do colmo de forma macroscópica, percebe-se que os feixes fibrovasculares (região mais escura) e as células parenquimáticas (região mais clara) estão distribuídos de forma desigual na seção transversal. Os feixes vasculares são menores e mais numerosos na periferia do colmo e maiores e em menor número na sua parte interna.

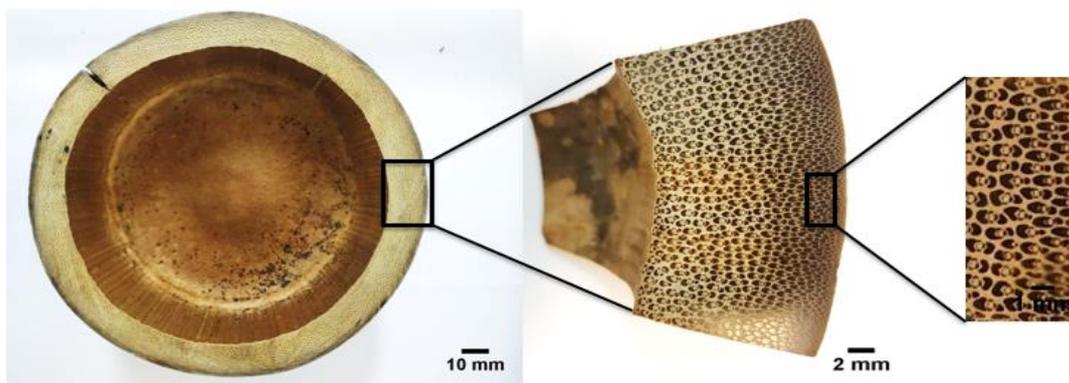


Figura 2.4- Distribuição dos feixes vasculares na parede do colmo.

Na Figura 2.5- A e B, pode-se observar a região selecionada exemplifica as regiões de fibra e matriz, a região fibrosa que engloba todo o feixe fibrovascular (Figura 5-C) é subdividida em feixe fibrovascular, xilema, cordão de esclerênquima, espaço intercelular e o floema. As células parenquimáticas envolvem todo o feixe fibrovascular e estão em sua maioria presentes na região mais interna da parede do colmo (AHMAD, 2000).

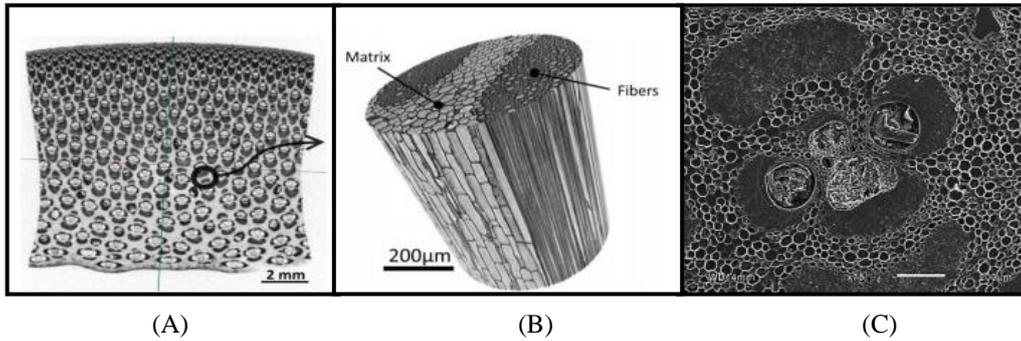


Figura 2.5- A) Região da interface entre fibra e matriz; B) Seção de transição fibra e da matriz do bambu; C) Feixe fibrovascular. Adaptado Krause (2015); Azadeh (2018)

De modo geral, Liese (1980) afirma que o bambu é constituído de 40% de fibras, 50% de parênquima e 10% de vasos, dando ao bambu de acordo com Ghavami & Rodrigues (2000) a classificação de um material compósito formado por fibras longas e alinhadas de celulose imersas em uma matriz de lignina.

As análises visuais de lâminas microscópicas do bambu *Dendrocalamus giganteus* realizadas por Beraldo & Zoulalian (1995), apresentam a distribuição dos elementos anatômicos da espécie *Dendrocalamus giganteus* (Tabela 2.1) de acordo com a camada da parede do colmo.

Tabela 2.1-Distribuição dos elementos anatômicos da espécie *Dendrocalamus giganteus*. Beraldo & Zoulalian (1995)

| Camada da parede do colmo | Vasos (%) | Fibras (%) | Parênquima (%) |
|---------------------------|-----------|------------|----------------|
| Interna | 11 | 16 | 73 |
| Intermediária | 9 | 32 | 59 |
| Externa | 8 | 55 | 37 |

Desta forma, verifica-se uma maior concentração de fibras na parte externa do colmo, conferindo-a uma maior resistência, ao contrário das células parenquimatosas que são em maior número na camada interna. Observa-se esta distribuição na Figura 2.6.

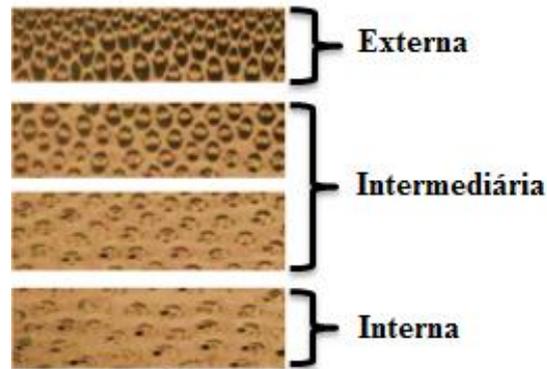


Figura 2.6- Seccionamento das camadas da parede do colmo da espécie

Dendrocalamus giganteus.

Fonte: Krause (2015)

2.1.2 Características químicas

As propriedades químicas do bambu variam de acordo com a espécie, a idade, a região do colmo que está sendo analisada e as condições ambientais onde a planta se desenvolve.

Azadeh (2018) realizou a análise química da espécie *Dendrocalamus Giganteus* onde os principais componentes orgânicos estudados foram: holocelulose (celulose + hemicelulose), lignina e extrativos. Os resultados estão distribuídos quantitativamente em 68,5% de holocelulose, 27,4% de lignina e 4,6% de extrativos.

Os extrativos que compõem os colmos são: resinas, taninos, ceras, sais orgânicos, açúcares, proteínas, gorduras, aminoácidos e vitaminas (Greco & Cromberg, 2011; BAI, 1996). O amido é um desses compostos energéticos e é a principal substância armazenada nas células parenquimáticas (Figura 2.7) tornando essas células atrativas para insetos e fungos (Liese, 2004). Alguns tratamentos naturais ou químicos são utilizados a fim de preservar o material dos insetos e fungos. São eles: banho quente e frio, imersão em água, assar sobre fogo aberto, tratamento com ácido bórico/bórax, utilização de substâncias hidrossolúveis e produtos oleosos.

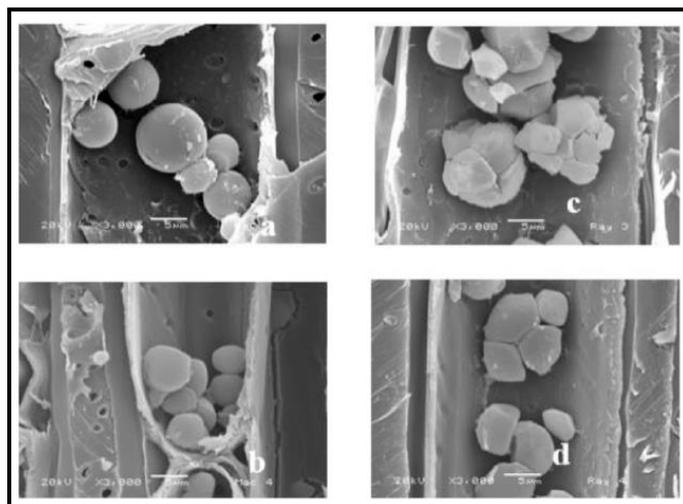


Figura 2.7- Grânulos de amido em variadas espécies de bambu.

Fonte: Sánchez *et al.* (2019)

2.1.3 Características físicas

Cada espécie de bambu apresenta suas próprias características físicas e mecânicas, que são influenciadas por fatores como: constituição química, idade, tipo de solo, partes do colmo que estão sendo analisadas, condições topográficas, colheita, clima e presença ou ausência de nós.

Dependendo do tamanho, da quantidade e da distribuição dos feixes de fibras ao redor dos vasos, massa específica do bambu pode variar de 0,50 a 0,90 g/cm³. Assim, a camada mais externa do colmo é mais densa, pois concentra uma menor quantidade de células parenquimatosas e uma maior quantidade de fibras (LIESE 1998).

A massa específica é uma propriedade importante, visto que influencia nas propriedades mecânicas do material. Pereira (2006) analisou a massa específica aparente em ripas laminadas de bambu com nó e sem nó, oriundas de colmos com 3,5 anos (Tabela 2.2). Os resultados mostram que a massa específica aumenta de baixo para cima e que nas ripas com nó é maior que nas sem nó. A massa específica do *Dendrocalamus Giganteus* é de aproximadamente 0,66 g/cm³, segundo Brito *et al.* (2015).

Tabela 2.2- Massa específica aparente em ripas laminadas de bambu. Pereira (2006)

| Parte do Colmo | Sem nó | Com nó |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | ρ (g/cm ³) | ρ (g/cm ³) |
| Basal | 0,76 | 0,82 |
| Mediana | 0,84 | 0,91 |
| Apical | 0,84 | 0,90 |
| Média do Colmo | 0,81 | 0,88 |

Outra característica física é o teor de umidade, que quando o bambu está na fase de crescimento apresenta um valor bastante alto, dependendo das diferentes estações e espécies. Colmos mais maduros apresentam um teor de umidade menor que os imaturos e na base do colmo o teor de umidade é mais elevado que nas partes intermediária e topo (CHUN, 2003).

Com o aumento do teor de umidade, o módulo de elasticidade, a resistência à compressão, tração, cisalhamento e flexão paralela à fibra diminuem. A justificativa é que isso acontece porque a direção dos vasos está com um ângulo reto, quando o teor de umidade diminui ocorre uma pequena variação no ângulo dos vasos, conseqüentemente, resultando no aumento destas propriedades (BERNDSSEN, 2008).

2.1.4 Características mecânicas

O bambu é um compósito natural com propriedades mecânicas que distinguem-se verticalmente da base até o topo e lateralmente por toda a extensão da parede do colmo.

HIDALGO-LÓPEZ (2003) descreveu os atributos mecânicos de cada parte:

(a) *Colmo inteiro*: as propriedades mecânicas variam da base ao topo do colmo. Dividindo o colmo em três partes, geralmente a parte superior é mais resistente em compressão e flexão do que as partes mediana e inferior. A parte intermediária possui os internós mais longos, é mais resistente em tração, enquanto a parte inferior apresenta geralmente menores valores de resistência mecânica.

(b) *Internó*: as fibras são mais curtas quando se situam próximas ao nó e são mais longas no centro do internó. Conseqüentemente, a parte mais resistente corresponde à região central do colmo.

(c) *Parede do colmo*: as resistências em tração e compressão aumentam da parte interna para a parte externa. Logo, a região mais resistente é o terço externo da parede, e a mais fraca, o terço interno.

Segundo Moreira (2018), no Brasil o bambu vem sendo utilizado na construção civil a cerca de 20 anos, porém os construtores se respaldam em normas estrangeiras e pesquisas divulgadas em congressos e revistas.

Para determinar as principais características dos colmos de bambu a principal dificuldade é a execução dos ensaios, o que tem levado os pesquisadores a adotarem suas próprias metodologias.

Para ensaios em colmos inteiros tem sido utilizado a ISO N 313 – *Bamboo Structural Design*, ISO 314 – *Physical and Mechanical Properties* e ISO 315- *Testing Material*, instituídas pelo INBAR. Considerando o processamento do bambu em outras formas como ripas e laminados ainda não existem recomendações de ensaios, portanto o que tem sido feito são adaptações em normas existentes para a madeira ou de matrizes poliméricas.

As fibras do bambu na forma estrutural de feixes favorecem os esforços de tração axial, porém, quando há solicitação axial pelo fato das fibras estarem imersas em uma matriz de lignina ocorre uma ruptura por cisalhamento. As tortuosidades dos feixes e nas mudanças de seções nos nós, onde as fibras se interrompem, há uma redução nas áreas resistentes e se originam na peça solicitações secundárias de compressão normal, cisalhamento ou fendilhamento, às quais o material oferece menor resistência (GHAVAMI & MARINHO, 2005; CULZONI, 1986).

Além dos fatores estruturais a idade do colmo é uma variável importante que interfere nos ensaios mecânicos. De acordo com Agarwal *et al.* (2014), o bambu atinge sua força ótima em apenas três a quatro anos e atinge a maturidade em cinco anos. Desse modo é importante a utilização de colmos maduros para que não ocorra uma grande variabilidade nos resultados.

Li (2004) analisou amostras de bambu com um, três e cinco anos em diferentes posições dos colmos e detectou um aumento significativo da densidade aparente com o aumento da idade do bambu, para colmos de um ano de idade para base e topo as médias foram de 0,49 e 0,54 g/cm³, enquanto aos cinco anos os valores encontrados foram de 0,75 e 0,76 g/cm³. Na flexão, o módulo de elasticidade para colmos de um ano foi de 7,7 e 8,9 MPa para base e topo, respectivamente, enquanto que aos cinco anos as médias foram de 13,16 e 13,30 MPa para base e topo, representando um aumento de até 69% no MOE com o aumento da idade.

Krause (2015) em seu estudo realizou ensaios de tração e compressão em corpos-de-prova de bambu da espécie *Dendrocalamus Giganteus*, para avaliar a qualidade do material baseado em normas ASTM para materiais compósitos. Para os ensaios de tração utilizou a norma ASTM D3039, e para o de compressão, ASTM D3410, com algumas adaptações. Analisou regiões com nó e sem nó, obtendo os resultados descritos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3-Tensão máxima e módulo de elasticidade das ripas de *Dendrocalamus Giganteus*. Krause (2015)

| Parte do Colmo | Região Internodal | | Região Nodal | |
|----------------|---------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|
| | Tensão Máxima (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) | Tensão Máxima (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) |
| Base | 130,02 | 11,49 | 53,90 | 11,38 |
| Meio | 202,44 | 15,13 | 79,38 | 12,74 |
| Topo | 182,39 | 14,38 | 116,46 | 14,05 |

Krause (2015) observou nos ensaios de tração que as regiões internodais apresentam as maiores tensões, sendo a maior delas na região do meio. Na compressão as tensões são inferiores e de acordo com Liese (1998) em virtude da orientação das fibras ser paralela ao eixo do colmo, o bambu resiste mais à tração do que à compressão.

A resistência à tração do bambu com nó e sem nó pode variar de 40 a 215 MPa e o seu módulo de elasticidade varia entre 5,5 e 18 GPa. Na compressão este valor varia de 20 MPa a 120 MPa com o módulo de elasticidade de 2,60 a 20 GPa. Diferentes espécies têm sido caracterizadas mecanicamente por diversos pesquisadores. A Tabela 2.4

apresenta alguns autores e os resultados encontrados para ensaios de tração e compressão.

Tabela 2.4- Revisão da literatura das características mecânicas de espécies de bambu mais utilizadas para fins estruturais.

| Espécie | Referência | σ_t (MPa) | E_t (GPa) | σ_c (MPa) | E_c (GPa) |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|
| <i>Bambusa vulgaris</i> | PRAWIROHATMO DJO (1988) | 287,5 | - | 24,4 | - |
| <i>Dendrocalamus Giganteus</i> | GHAVAMI & MARINHO (2001) | 157,10 | 18,95 | 77,96 | 21,04 |
| <i>Dendrocalamus Asper</i> | CARBONARI <i>et al.</i> (2016) | - | - | 50,49 | 24,05 |
| <i>Guadua Angustifolia</i> | GHAVAMI & MARINHO (2005) | 86,96 | 14,59 | 29,48 | 12,58 |
| <i>Phyllostachys Pubescens</i> | CHUN (2003) GOMES (2019) | 163,5 154,6 | 11,65 7,93 | 63,8 81,41 | 8,207 25,32 |
| <i>Phyllostachys Aurea</i> | CRUZ (2002) | 210 | 18,9 | 70,9 | 24,8 |

Na flexão três pontos Souza *et al.*(2017) encontrou para ripas de bambu valores médios de resistência à flexão e módulo de elasticidade de 170,43MPa e 15,61 GPa respectivamente para espécies de *Bambusa Tuldoides* . Gomes (2019) realizou ensaios de flexão em colmos de bambu de 75 cm em estado natural da espécie *Phyllostachys pubescens* e obteve módulo de ruptura e elasticidade de 61,30 MPa e 9,30 GPa respectivamente. Os estudos de flexão em bambu são escassos na literatura, principalmente no formato de ripas.

2.1.5 Aplicações do bambu

A utilização do bambu é ampla, abrangendo áreas como construção civil, agricultura, artesanato, utensílios domésticos, artes e cultura. Hildalgo-lópez (2003) ilustrou os usos do bambu de acordo com a idade dos colmos (Figura 2.8).

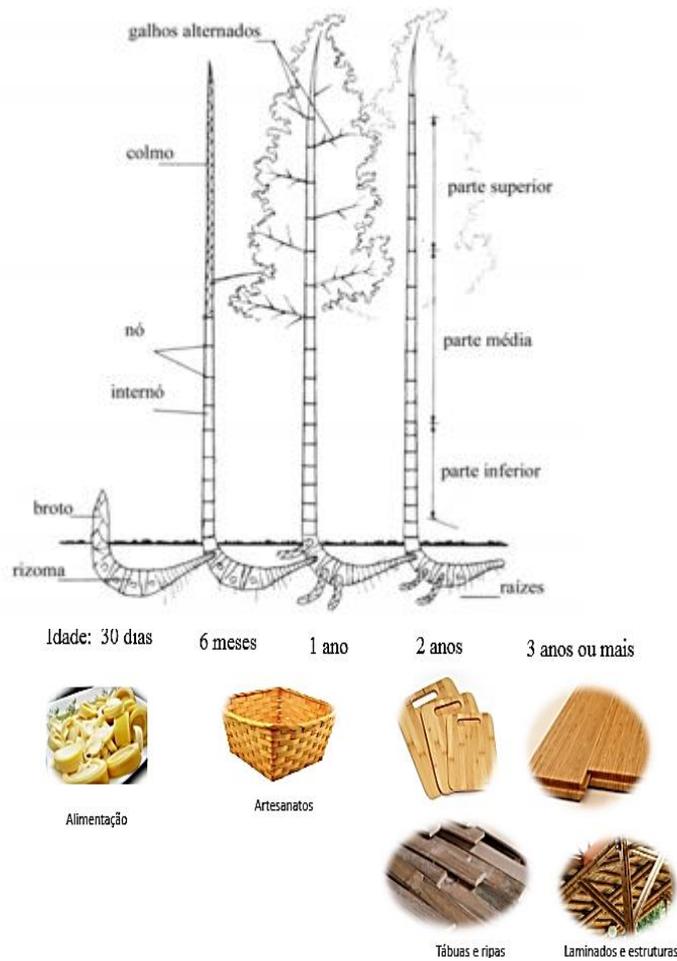


Figura 2.8- Usos do bambu de acordo com as idades de maturação. Adaptado: Hidalgo-López (2003)

Várias construções no mundo têm utilizado o bambu como elemento estrutural. Obras estruturais como as do arquiteto Simon Velez na Espanha (Figura 2.9), obras sociais como o abrigo para crianças refugiadas projetado por arquitetos noruegueses (Figura 2.10) e construções em bambu no Brasil (Figura 2.11).



Figura 2.9-Estação Terminal Cabecera Aguablanca, Cali.

Fonte: El país, Espanha.



Figura 2.10-Orfanato para crianças refugiadas, Tailândia.

Fonte: Tyin architects



(A)



(B)

Figura 2.11-Construções de bambu no Brasil. (A) Pergolado-Angra dos Reis. Ebiobambu, Brasil. (B) Albergue- Bahia. IR Arquitectura, Argentina.

O bambu pode ser processado de diversas formas como ilustra a Figura 2.12: lâminas (A), lascas (B), ripas (C) partículas (D) e fibras (E).



Figura 2.12-Produtos gerados pelo processamento do bambu. Adaptada de Moizés (2007)

A partir do bambu processado é possível aplicá-lo em diversos usos como: laminados (pisos, painéis e mobiliário), compósitos (a base de cimento e bambu particulado), OSB (*Oriented Strand Board of Bamboo*), esteiras, chapas e palitos.

2.2 Compósitos de matriz cimentícia e bambu

Ao longo das últimas décadas, muitos trabalhos de pesquisa têm se voltado à produção de materiais compósitos, normalmente aplicados a uma matriz de cimento, materiais de origem natural e sintética ou até mesmo resíduos podem ser utilizados na sua produção (GARCEZ et al.,2016).

Andreola (2017) utilizou em sua pesquisa resíduos de bambu provenientes do processamento dos colmos da espécie *Dendrocalamus asper* para produção do bioconcreto de bambu. As taliscas (resíduos) foram trituradas em um moinho de facas até serem reduzidas a forma de agregado miúdo, consecutivamente sendo passadas por um peneirador mecânico, obtendo-se partículas conforme a Figura 2.13.



Figura 2.13-Partículas obtidas após o processo de obtenção dos bioagregados.
Fonte: Andreola (2017)

Após o peneiramento homogeneizou-se os bioagregados e foram realizados ensaios físicos como massa específica, massa específica aparente, absorção de água e teor de umidade. Os valores obtidos foram 1,43 g/cm³, 0,58 g/cm³, 109,14 % e 11,01 %, respectivamente. Para a produção do bioconcreto, além das partículas de bambu foram utilizados o Cimento Portland CP V-ARI, o agente modificar de viscosidade e água. O volume de partículas variou de 45 a 50%, e a relação água/cimento, de 0,40 a 0,50. Os resultados obtidos mostraram que o volume de partículas tem maior influência sobre a resistência do que a relação água/cimento.

Aprimorando este estudo, Andreola *et al.* (2019), revelam que estes resultados apresentam um alto consumo de cimento para uma baixa resistência. Com o intuito de reduzir o teor de cimento foram incorporados à matriz a metacaulinita e a cinza volante e os resultados mostraram que é possível reduzir a quantidade de cimento em até 60% e ter uma boa resposta mecânica. A autora concluiu que em geral é possível obter concretos de baixa emissão de carbono com adequadas propriedades físicas e mecânicas para uso na construção civil.

De Lima (2011) em seu trabalho onde produziu um compósito cimento-madeira, substituiu de 5 a 40% do cimento por cinza volante e concluiu que o teor ótimo de substituição seria de 5%. No mesmo ano, mas em outra pesquisa onde utilizou metacaulinita, os resultados demonstraram que é possível substituir em até 30% do cimento Portland por este material. Baseados nestes estudos, pesquisados do NUMATS/COPPE/UFRJ tem empregado em suas misturas de bioconcreto a substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos.

Park (2019), utilizou lascas de bambu com dimensões de 10 x 10 x 5 mm no concreto, substituindo uma parte do agregado graúdo. Os teores de substituição foram de 10, 20 e 30% e as lascas de bambu sofreram três tratamentos antes de serem misturadas ao concreto: seco, revestido e molhado. Os tratamentos foram aplicados com o objetivo de analisar o efeito da absorção de água. Foram realizados ensaios de resistência a compressão em 7 e 28 dias e a cura realizada em banho-maria de 20°C. Analisando os resultados, independente do tratamento aplicado nas partículas, conforme o volume de lascas de bambu aumenta a resistência à compressão diminui (Figura 2.14).

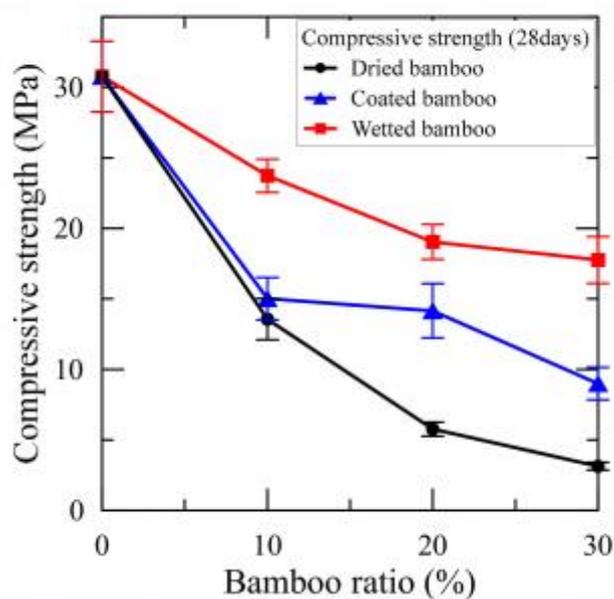


Figura 2.14- Comparação da resistência a compressão x teor de agregado de bambu.
Fonte: Park (2019).

Dos Anjos *et al.* (2003) utilizaram polpa de bambu como reforço de matrizes cimentícias, para produção do compósito. Utilizou-se uma pasta de cimento com polpas celulósicas de bambu antes e após o refino, provenientes de uma fábrica de papel. As polpas foram utilizadas nas proporções de 4% e 16% em relação à massa de cimento.

A inclusão de fibras nos compósitos proporcionou tendência de crescimento na resistência à flexão, até um teor ótimo com posterior queda nesta propriedade. Isto ocorre porque, após certa taxa de polpa, a concentração volumétrica de fibras acarreta dificuldade de mistura e dispersão. A capacidade de absorver energia (tenacidade) foi a propriedade mais sensível ao acréscimo de polpa. Quando o teor de polpa passou de 4% para 14%, esta propriedade apresentou um aumento de 6 vezes para a polpa refinada e de aproximadamente 2,5 vezes para a polpa sem refino. O acréscimo de 14% no teor de polpa, em relação à matriz sem reforço, aumentou a deflexão na ruptura em aproximadamente 7 vezes para ambos os tipos de polpa. Esses resultados demonstram o potencial da polpa celulósica de bambu para utilização em painéis submetidos à flexão (ANJOS *et al.*, 2003).

2.3 Uso do bambu como reforço estrutural

De acordo com Teixeira (2013), os painéis de matriz vegetal são aqueles que, na sua composição, utiliza-se de matérias primas naturais. Podem ser utilizadas matrizes vegetais, como é o caso dos bambus e das fibras vegetais, e também matrizes minerais, como a terra crua. Devido à grande preocupação que se tem hoje com as questões ligadas ao desequilíbrio ambiental, é cada vez maior a busca por materiais de baixo impacto ambiental e energético, capazes de reduzir o uso de materiais e tecnologias que agridam o meio ambiente.

A China começou a produzir painéis de bambu no início do século XIX. Os painéis são amplamente utilizados na construção moderna como elementos estruturais, pavimentos, telhados, divisórias e portas (FAO, 2007).

Na América Latina os painéis de malha de bambu com cimento são os mais utilizados, onde tiras de bambu são presas em colmos e preenchidas por cimento (WEIFENG, 2012).

Sobrinho Jr *et al.* (2015), apresentam um painel pré-fabricado em que os colmos de bambu da espécie *Bambusa vulgaris* são os elementos básicos. Testou-se três painéis de dimensões 10 x 40 x 220 cm (espessura x largura x comprimento), compostos por quatro colmos de bambu de 6 cm de diâmetro, paralelos e preenchidos por uma matriz cimentícia incorporada com resíduos industriais. Para confecção dos painéis os colmos foram perfurados com broca e taliscas, também de bambu, foram postas atravessando todos eles, prendendo-os entre si, em pelo menos seis pontos ao longo do comprimento (Figura 2.15).



Figura 2.15-Estrutura do painel.
Fonte: Sobrinho Jr. *et al.* (2015)

Foram obtidas as cargas de ruptura dos painéis variando de 429 a 533kN e segundo Sobrinho Jr *et al.* (2015), os resultados mostraram o excelente desempenho dos painéis como elemento estrutural, apresentando grande capacidade de carga, superior até mesmo à de paredes de alvenaria estrutural de 14 cm de espessura.

Neto & Perazzo (2016) estão desenvolvendo painéis modulares de bambu em conjunto com uma matriz cimentícia composta de cimento, cal hidratada, areia, EVA, fibra de coco e água. Junto com essa matriz são utilizados colmos de bambu com 250 cm de comprimento e diâmetro variando entre 5 e 6 cm. As dimensões dos painéis são 240 x 40 x 10 cm (altura x largura x espessura) e nas laterais tem-se um sistema de encaixe macho-fêmea. A Figura 2.16 ilustra o protótipo do painel e sua aplicação.

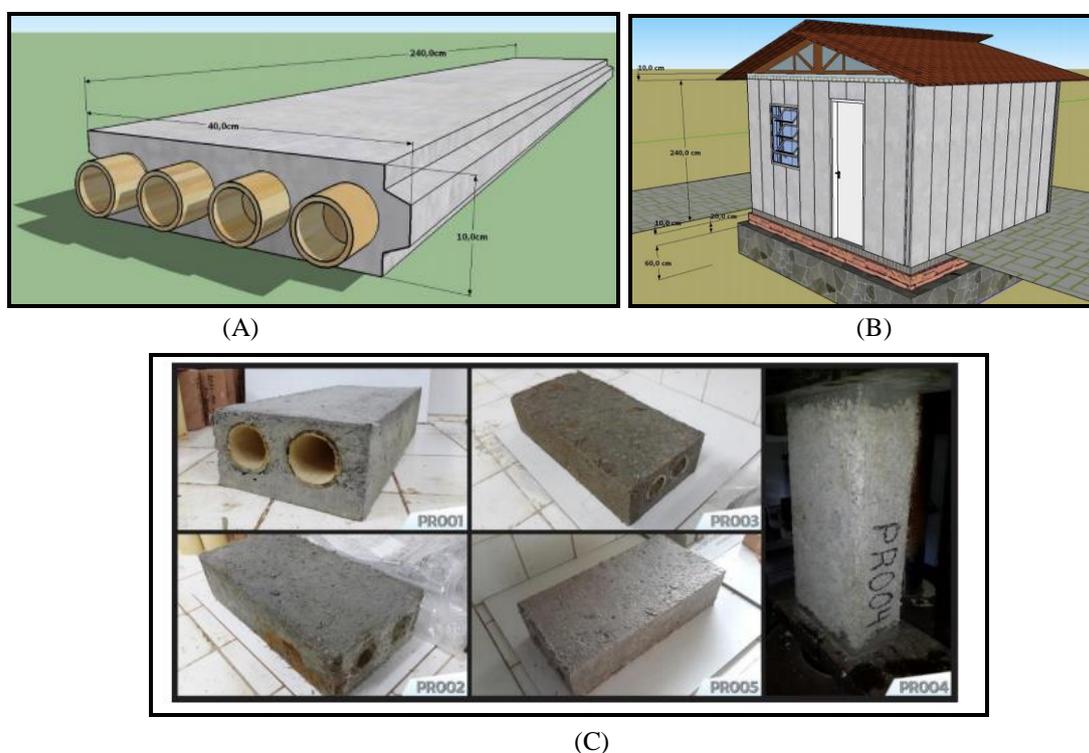


Figura 2.16- A) Representação do painel; B) Aplicação do painel para habitação popular e C) Painel na forma reduzida.

Fonte:Neto & Perazzo (2016)

Com a exemplificação dos estudos citados acima pode-se dizer que os painéis pré-fabricados de bambu surgem como uma importante opção na construção civil. A Figura 2.17 apresenta residências onde foram utilizados painéis de bambu revestidos com argamassa nas faces externas e internas.



Figura 2.17- Edificações construídas com painéis de bambu revestidos com argamassa.
Fonte: ACFA (2005); Teixeira (2006)

Outros elementos estruturais também reforçados com bambu estão sendo produzidos no mundo. Varma (2017) produziu uma viga reforçada com ripas de bambu em uma seção prismática de concreto. O reforço foi preparado conforme a Figura 2.18 em duas direções. O autor comparou vigas somente com concreto, vigas reforçadas com aço e vigas com 1, 2 e 3 malhas de bambu. Os resultados apontaram que quando comparada as vigas com o concreto, carga na flexão aumenta em até 52,5%, quando utilizadas três malhas de bambu. Comparando com a viga reforçada com aço, ocorreu uma diminuição na carga em até 60%, o autor afirma que as malhas de bambu não podem ser totalmente substituídas pelo aço, mas podem reforçar o concreto.



Figura 2.18- Vigas de concreto reforçadas com ripas de bambu.
Fonte: Varma (2017)

2.4 Aderência

Em uma estrutura de concreto armado compreende-se que o concreto resiste aos esforços de compressão e o reforço aos esforços de tração. Deve ocorrer uma transferência de forças entre o concreto e a armadura para que o sistema seja eficiente e responda adequadamente às solicitações da estrutura.

Como o bambu possui características mecânicas que o confere como um bom material para reforço em estruturas é de suma importância que a aderência bambu-concreto seja cada vez mais estudada e aperfeiçoada.

2.4.1 Tipos de aderência

A aderência pode ser dividida em parcelas: adesão (estágio 1), atrito (estágio 2) e aderência mecânica (estágio 3). A Figura 2.19 apresenta as curvas tensão de aderência x deslocamento relativo para os aços de construção e o concreto, podendo-se observar os três estágios de aderência para barras lisas e nervuradas.

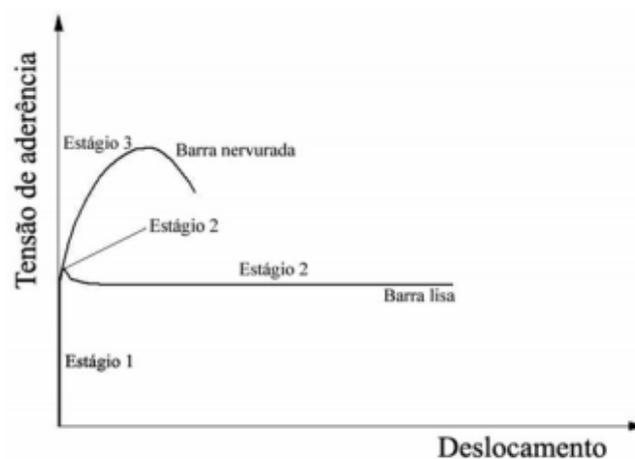


Figura 2.19- Curvas esquemáticas tensão de aderência x deslocamento e estágios da aderência aço-concreto. Adaptada de FIB (1999)

As características de cada estágio são:

a) Aderência por Adesão

Caracteriza-se por uma resistência à separação dos dois materiais, quando a estrutura de concreto armada é solicitada por forças de pequena magnitude. Ocorre em função de ligações físico-químicas, na interface das barras com a pasta, geradas durante as reações

de pega do cimento. Para pequenos deslocamentos relativos entre a barra e a massa de concreto que a envolve, essa ligação é destruída, tornando sua contribuição praticamente nula (FIB, 1999; PINHEIRO & MUZARDO, 2003).

b) Aderência por Atrito

O atrito manifesta-se quando há tendência ao deslocamento relativo entre os materiais. Depende da rugosidade superficial da barra e da pressão transversal, exercida pelo concreto sobre a barra, em virtude da retração (PINHEIRO & MUZARDO, 2003).

c) Aderência Mecânica

A aderência mecânica é devida à conformação superficial das barras. Nas barras de alta aderência, as saliências mobilizam forças localizadas, aumentando significativamente a aderência (PINHEIRO & MUZARDO, 2003).

2.4.2 Ensaios de aderência

Existem alguns tipos de ensaios para determinação da tensão de aderência e do deslocamento relativo entre barras de aço e concreto. São eles: ensaio de arrancamento direto, ensaio de arrancamento com duas barras, ensaio de arrancamento com quatro barras, ensaio de arrancamento com anel circunferencial, ensaio de flexão, ensaio de extremo de viga e ensaio de tirante de concreto (RANGEL, 2015).

Dos ensaios citados destacam-se abaixo as características do ensaio de arrancamento direto (*pull-out-test*) e o ensaio de tração em tirantes de concreto.

2.4.2.1 Ensaio de Arrancamento Direto

O ensaio de arrancamento direto, também conhecido como *pull-out-test*, é o mais empregado em concreto armado e para concreto reforçado com bambu. Segundo Reis (2009) ele fornece resultados qualitativos e quantitativos satisfatórios que permitem uma boa compreensão dos parâmetros que influenciam na aderência. Rangel (2015) relata que este ensaio visa a análise da aderência de um concreto armado, através da aplicação de força de tração em um dos extremos de uma barra de aço posicionada no centro de um bloco de concreto. No ensaio, são realizadas as medições da força de

arrancamento aplicada em um dos extremos da barra de aço e dos escorregamentos no outro extremo da barra.

2.4.2.2 Ensaio de Tirante de Concreto

O ensaio de tração em tirantes de concreto é realizado segundo as prescrições da NBR 7477 (1982) onde o objetivo é determinar o coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado. Segundo Reis (2009), este ensaio reproduz de forma adequada as solicitações na região tracionada de vigas fletidas e permite uma caracterização da fissuração no concreto. A Figura 2.20 ilustra o esquema do ensaio.



Figura 2.20-Ensaio de Tirantes de Concreto.
Fonte: França (2004)

Neste ensaio o corpo- de prova de tirante se comporta como um compósito, onde a matriz é o concreto e o reforço a barra de aço. O modelo ACK (AVESTON, COOPER E KELLY, 1971), descreve este tipo de compósito, no qual o comportamento esperado para o ensaio de tração no tirante de concreto está descrito nas curvas abaixo (Figura 2. 21).

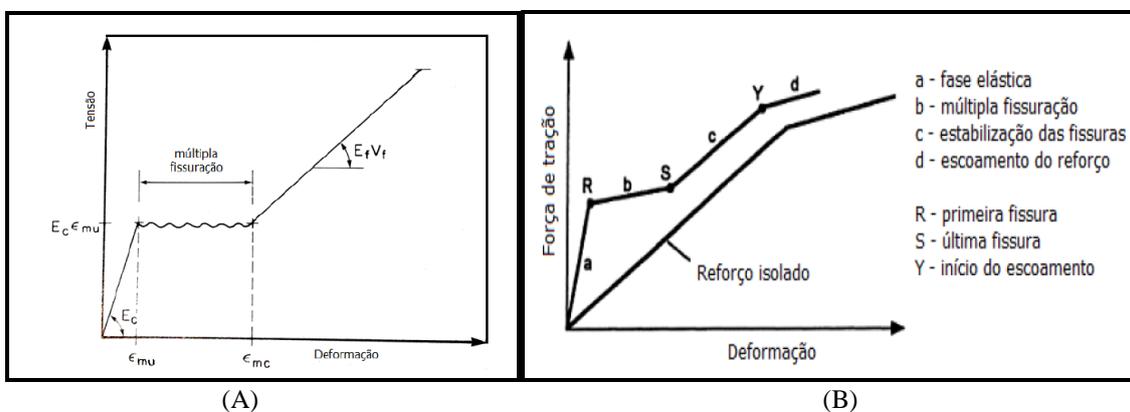


Figura 2.21- A) Curva tensão x deformação-modelo ACK, Bentur (2007); B) Comportamento do tirante de concreto sob esforço de tração.FIB (2000)

De acordo com as curvas, até o surgimento da primeira fissura (fase elástica) a carga é suportada pela matriz e pelo reforço. No surgimento da primeira fissura, começa a fase de múltipla fissuração, logo torna-se possível determinar as deformações (ϵ_{mu} e ϵ_{mc}) e a resistência de primeira fissura σ_{mu} . No processo de fissuração a matriz sofre perdas de resistência e módulo de elasticidade a cada fissura que aparece na matriz, até que, após a etapa de fissuração a matriz deixa de contribuir para a resistência de forma significativa e o aço passa a suportar as cargas de tração e o compósito apresenta um aumento de capacidade de resistência. O acréscimo de resistência ocorre até que se inicia a fase de escoamento do aço e em seguida o aço é tracionado até a sua ruptura total.

Rangel (2015) realizou o ensaio de tirantes com barras de aço CA-50 e concretos de 25 e 65 MPa com diferentes teores de resíduos de construção e demolição (0, 25 e 50%). Como um dos resultados obtidos a Figura 2.22, apresenta uma curva típica de força x deformação axial aos 28 dias do concreto de 25 MPa e 65 MPa com teor de agregado reciclado de 25%. O compósito da classe C65 apresenta uma maior inclinação na fase elástica (maior módulo de elasticidade) e uma força de primeira fissura mais elevada. No patamar de fissuração é onde ocorre a maior diferença, para o concreto C65 tem-se uma fase mais longa, logo a deformação da última fissura entre os concretos C25 e C65 são diferentes. Após a fissuração o comportamento dos compósitos acompanha o comportamento do aço, evidenciando que nesta fase o ensaio é controlado principalmente pelo reforço e que independente da classe (C25 e C65) apresentam o mesmo comportamento, com módulos iguais e o escoamento ocorre para o mesmo valor de força.

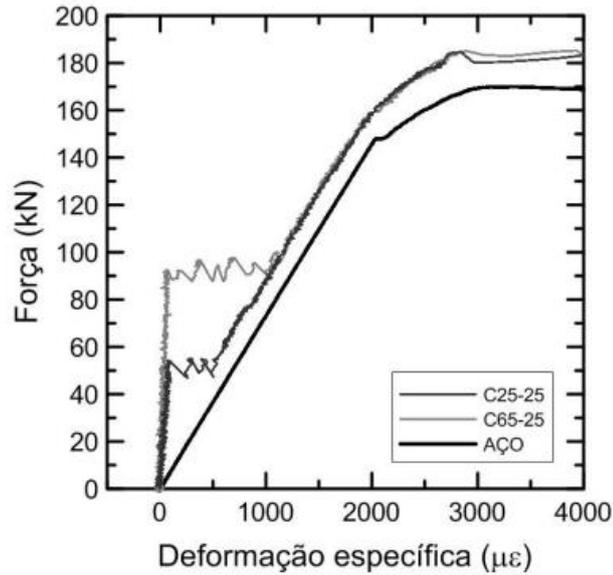


Figura 2.22- Comparação entre as curvas típicas força x deformação axial aos 28 dias de concreto de resistência normal e de concreto de alto desempenho: C25-25 e C65-25. Fonte: Rangel (2015)

Na Figura 2.23-A se encontra o comportamento do compósito, classe C25 com 0% de teor de agregado reciclado, sob os esforços de tração. Com foco no processo de fissuração é possível visualizar as quedas de força que indica abertura de fissura. A Figura 2.23-B apresenta o processo de fissuração no corpo-de-prova de tirantes de concreto C25, marcando a ordem das fissuras.

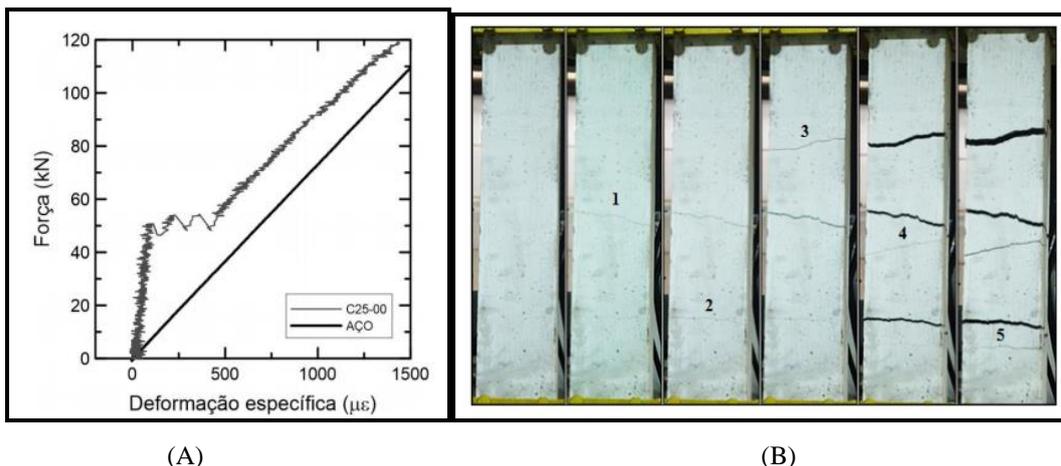


Figura 2.23- A) Curva tensão x deformação dos tirantes de concreto da classe C25; B) Processo de fissuração no corpo-de-prova de tirantes de concreto da classe C25 sob esforços de tração, com marcação da ordem das fissuras. Rangel (2015)

Observando a Figura 2.23-B, a formação de fissuras mostra o quanto o ensaio foi positivo para analisar a aderência concreto-aço.

2.4.3 Aderência bambu-concreto

Um problema relevante a ser considerado na associação “bambu-concreto” e um dos grandes entraves a sua utilização é a sua aderência. Esse processo depende do grau de saturação do colmo depois do endurecimento do concreto, da extensão e proporção de retração e das saliências do colmo, da proporção bambu-concreto e da variação de temperatura (DAROLT, 2016).

Variações dimensionais podem ocorrer no bambu devido à rápida absorção e liberação da água. Por ser um material higroscópico, quando em contato com o meio aquoso, o bambu varia de dimensões, devido ao afastamento das células, resultando em um inchaço que atinge o bambu antes da cura do concreto, a água é absorvida pela microestrutura do bambu induzindo uma expansão e promovendo um estresse local interno no concreto que envolve o bambu, como mostra a Figura 2.24 (FERREIRA, 2007; JAVADIAN, 2016).

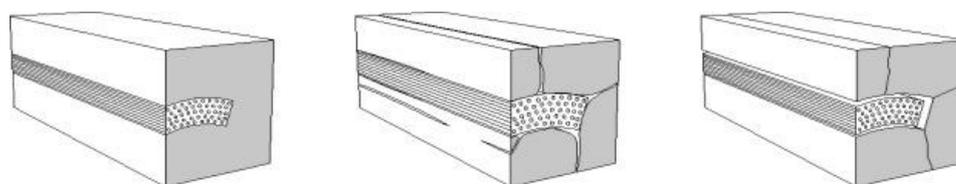


Figura 2.24-Inchamento associado ao uso do bambu cru no concreto.
Fonte: Javadian (2016)

Alguns tratamentos de impermeabilização vêm sendo empregados por pesquisadores para minimizar os problemas referentes à aderência. Ghavami (1995) estudou diversos produtos e métodos de tratamento da superfície do bambu, onde os melhores resultados encontrados foram com tinta asfáltica dispersa em água e adesivo estrutural à base de resina epóxi, as duas substâncias fabricadas pela Sika S.A. Como resultado destaca-se que o bambu Gigante, após ter sido tratado com o adesivo à base de resina epóxi ficou imerso por 96 horas em água, e apresentou uma taxa de absorção de apenas 4%.

Salgado (2000) analisou e comparou vários tipos de tratamentos em taliscas de bambu cravadas em concreto, através de ensaios de arrancamento. Foram usadas taliscas sem tratamento, com alcatrão e areia, envolvida em arame farpado e taliscas com grampo de cerca e com ranhuras na casca. O tratamento que apresentou maior resistência à aderência foi o do alcatrão com areia, e salienta que a camada de alcatrão não deve ser muito espessa, para não prejudicar a aderência ao concreto.

Lopes *et al.* (2002) avaliaram a resistência de aderência e a força de arrancamento do bambu ao solo-cimento, em dois tipos de ensaio (arrancamento e empuxamento), usando taliscas de bambu *Dendrocalamus giganteus*, não tratadas e tratadas com emulsão asfáltica (Neutrol 45) impregnadas com areia grossa. O valor da resistência ao arrancamento foi maior nos corpos-de-prova sem asfalto que naqueles em que foi utilizada a impermeabilização de emulsão asfáltica mais areia, com valores, respectivamente, de 1,19 e 0,77 MPa, concluindo que o tratamento das taliscas de bambu com emulsão asfáltica mais areia apresentou efeito negativo sobre a resistência de aderência do bambu com a matriz de solo-cimento.

Navarro (2002) estudou o comportamento de lajes de concreto reforçadas com bambu e com o objetivo de impermeabilizar o bambu e aumentar a aderência entre os materiais utilizou o Sikadur 32-Gel (Figura 2.25) e afirmou que não ocorreu deslizamento entre o concreto e o bambu após ensaios realizados.



Figura 2.25- Lajes de concreto reforçadas com bambu.
Fonte: Navarro (2002)

Mesquita *et al.* (2006) realizaram ensaios de “pull-out” ou arrancamento em taliscas de *Dendrocalamus giganteus*. As características dos corpos-de-prova ensaiados estão ilustradas na Figura 2.26. As taliscas de bambu de 13,14 x 20,19 mm (cortadas da região internodal dos colmos) foram imersas em blocos cilíndricos de concreto com dimensões de 15 x 30 cm, com resistência à compressão de 25 MPa. Analisaram-se duas variáveis: o tipo de pino (aço e bambu) e número de pinos (um e dois). A aderência entre o concreto e o bambu foi mantida apenas na parte central do cilindro de concreto. O restante foi revestido por graxa e foram colocadas camadas de papel para impedir qualquer tipo de aderência.

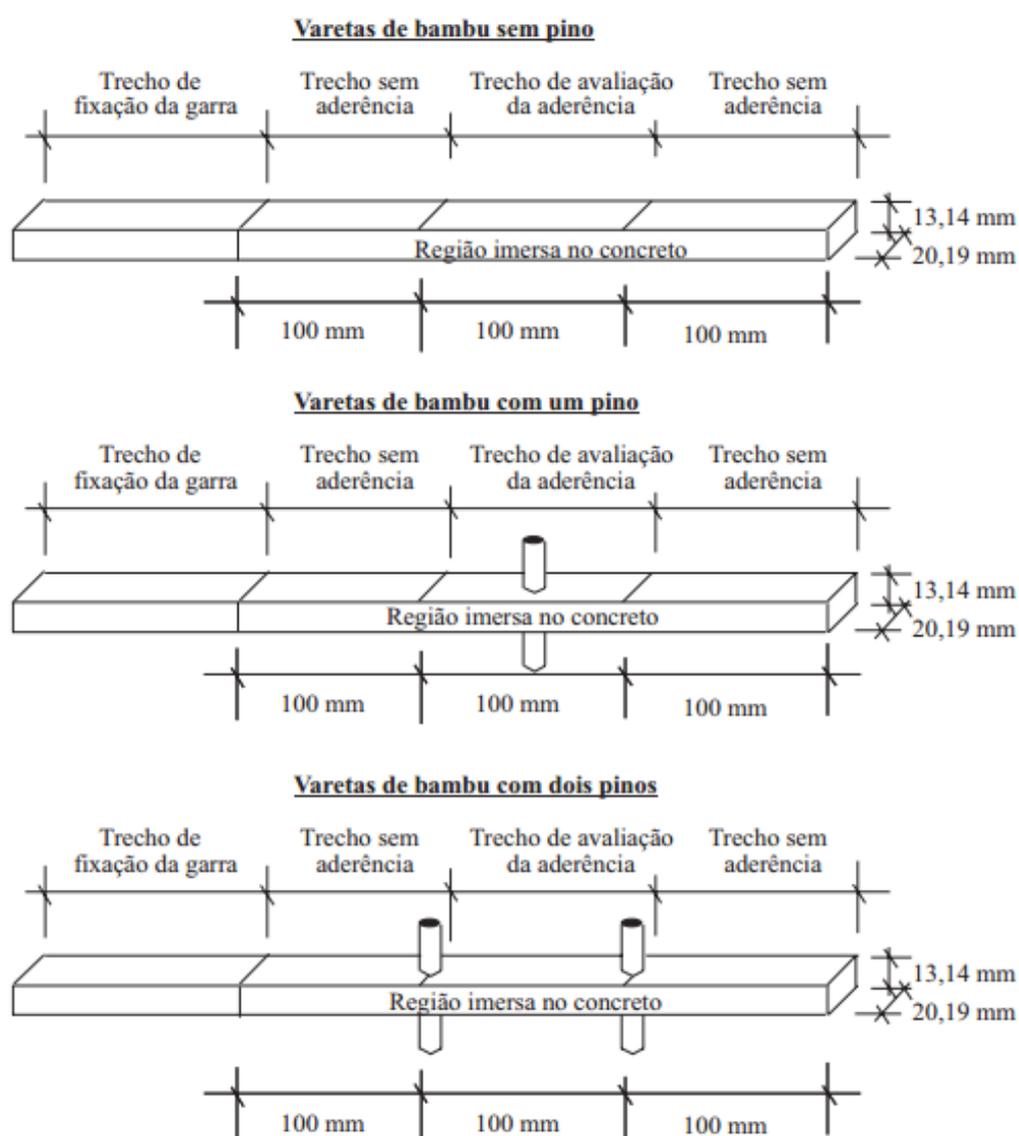


Figura 2.26- Características dos corpos-de-prova para ensaio de arrancamento.
Fonte: Mesquita *et al.* (2006)

Na Tabela 2.5 são apresentadas as médias das tensões de aderência para os tipos de corpos-de-prova ensaiados.

Tabela 2.5- Tensões de aderência (MPa) dos corpos-de-prova. Mesquita *et al.* (2006)

| Corpo-de-Prova | Nº de pinos | Tipo de Pino | Tensão média de aderência (MPa) | Observação |
|-----------------------|--------------------|---------------------|--|---------------------------------|
| 1 | Sem pinos | - | 1,41 | Com aderência na região central |
| 2 | 1 | Aço | 0,96 | Sem aderência |
| 3 | 1 | Bambu | 0,85 | Sem aderência |
| 4 | 1 | Aço | 1,57 | Com aderência na região central |
| 5 | 1 | Bambu | 1,31 | Com aderência na região central |
| 6 | 2 | Aço | 2,43 | Com aderência na região central |
| 7 | 2 | Bambu | 2,03 | Com aderência na região central |

Nos resultados analisados através de curvas de tensão de aderência x deslocamento, identifica-se o estágio 1 (aderência por adesão) e 2 (aderência por atrito). Contudo, Mesquita *et al.* (2006) relatam que a introdução dos pinos reduz a área da seção transversal resistente das taliscas em aproximadamente 40%. Logo, a utilização dos pinos aumenta a resistência de aderência pontual, mas quando utilizado em vigas de concreto, podem provocar regiões de ruptura por cisalhamento ao longo da armadura de bambu.

Agarwal *et al.* (2014), avaliaram a aderência bambu-concreto comparando as ripas com os seguintes tratamentos: bambu sem tratamento, Araldite, Araldite com arame, Tapecrete P-151, Anti Corr RC e Sikadur 32 Gel. Foram realizados ensaios de *pull-out*, as ripas foram inseridas em cilindros de concreto com uma profundidade de 100 mm. Os resultados encontrados estão descritos na Tabela 2.6.

Tabela 2.6- Tensão de aderência de acordo com os tratamentos. Agarwal *et al.* (2014)

| Tratamentos | Tensão de Aderência média (MPa) |
|--------------------|---------------------------------|
| Bambu liso | 0,127 |
| Araldite | 0,232 |
| Araldite com arame | 0,539 |
| Tapcrete P 151 | 0,315 |
| Anti Coor RC | 0,159 |
| Sikadur 32 Gel | 0,588 |

Verifica-se que a resistência média de aderência entre o bambu e o concreto é mais alta para o tratamento Sikadur 32 Gel em comparação com todos os outros tratamentos.

Javadian *et al.* (2016) analisaram a aderência bambu-concreto através de ensaios de *pull-out*, onde as ripas foram tratadas com: revestimento de epóxi a base de água, revestimento Truegrip BT e EP (um sistema de revestimento à base de resina epóxi), revestimento ExaPhen (um sistema de resina epóxi de base biológica) e revestimento de esmalte (Figura 2.27).

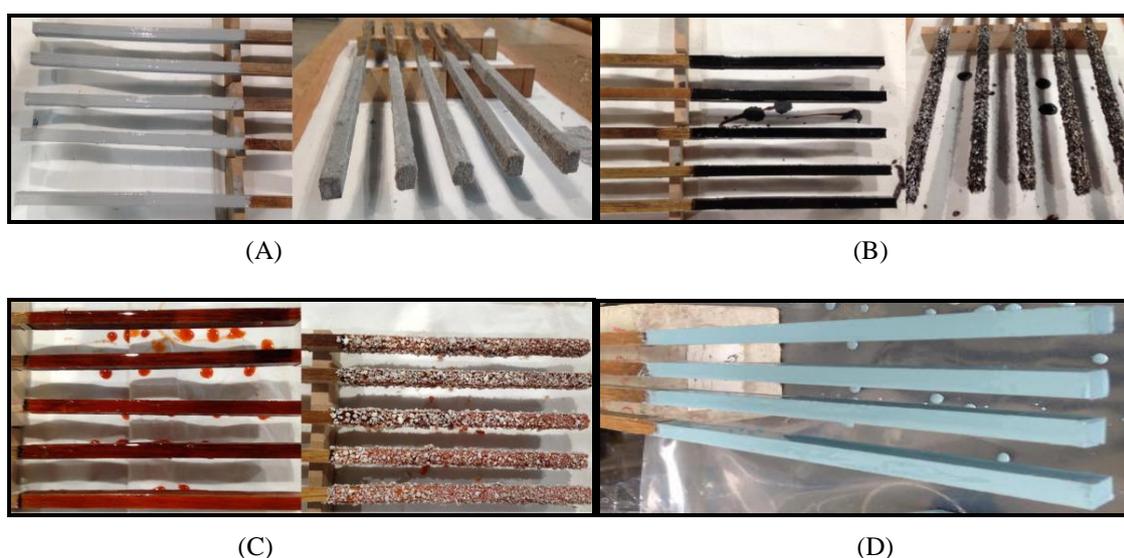


Figura 2.27- Revestimentos utilizados nas ripas: A) Epóxi a base de água; B) Truegrip BT e EP; C) ExaPhe; D) revestimento de esmalte.

Fonte: Javadian *et al.*(2016).

A Figura 2.28 mostra a montagem do ensaio de *pull-out* utilizado por Javadian *et al.* (2016):



Figura 2.28- Ensaio de *pull-out* bambu-concreto.
Fonte: Javadian *et al.* (2016).

Javadian *et al.* (2016), observaram que as amostras revestidas com epóxi à base de água e areia fina, Exaphen e areia grossa e True Grip BP e areia grossa foram as que apresentaram os maiores valores de tensão de aderência, variando de 3,65 a 3,45 MPa. A adição de partículas de areia ao revestimento aumenta a ligação aumentando o intertravamento mecânico entre a matriz de concreto e as barras compostas de bambu.

Mali et al (2018), produziram em seu estudo painéis de laje utilizando ripas de bambu como reforço principal e matriz cimentícia. Para uma análise comparativa, foram produzidos cinco painéis (Figura 2.29): PCC (Concreto sem reforço), RCC (Concreto reforçado com aço), UTBRC (Concreto reforçado com ripas de bambu sem tratamento), PTBRC (Concreto reforçado com ripas de bambu tratado com resina, areia e arame) e GTBRC (Concreto reforçado com ripas de bambu com ranhuras semicirculares).

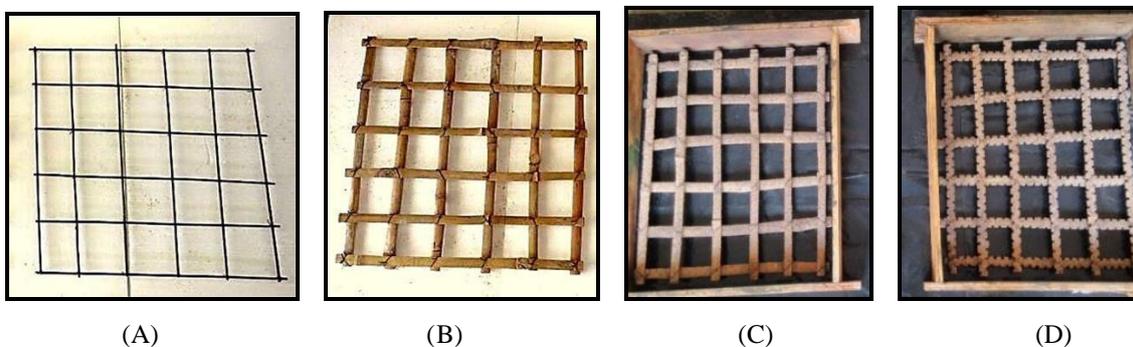


Figura 2.29- Reforços dos painéis: A) RCC; B)UTBRC; C) PTBRC D) GTBRC.
Fonte: Mali *et al.* (2018)

Mali *et al.* (2018) realizaram ensaios de flexão nos painéis conforme Figura 2.30, os painéis de PCC possuíram a menor capacidade de ductilidade e absorção de energia, chegando a uma carga máxima de 37 kN, os painéis CCR apresentaram uma carga máxima média de 70,9 kN e as placas UTBRC sofreram uma carga final de 60,6 kN, Os resultados das lajes PTBRC mostraram um aumento na carga final em 75% e 51% em comparação com as placas PCC e UTBRC, respectivamente. A carga final da placa PTBRC alcançou valores muito próximos das placas RCC, indicando que o tratamento de superfície proposto melhorou a ação do compósito de concreto de bambu, aumentando a resistência de união na interface bambu-concreto. Os ranhurados representaram um aumento na carga máxima de 8,7 % em relação aos painéis reforçados com aço.



Figura 2.30- Painel PCC sendo ensaiado.
Fonte: Mali *et al.* (2018)

Os tratamentos aplicados às ripas de bambu melhoraram significativamente a aderência bambu-concreto. A ação química do tratamento de superfície (resina, areia e arame) e a ação mecânica do intertravamento (sulcos ao longo das ripas) entre o concreto e o sulco foram responsáveis pelo fornecimento da resistência de união adicional (MALI *et al.*,2018).

Culzoni (1986) realizou ensaios de arrancamento dos quais em um deles o bambu não foi tratado, e nos demais o tratamento foi com Negrolin e areia e um levava arame à sua volta, enquanto o outro não. A Tabela 2.7 compara os resultados obtidos do ensaio de arrancamento por Culzoni, para bambus sem nó, com os resultados obtidos por Pereira da Silva (2002) para bambus (sem nó) tratados com Sikadur 32- Gel e para o aço.

Tabela 2.7- Tensão de aderência. Pereira (2002); Culzoni (1986)

| Tratamento | Tensão de aderência (MPa) |
|--------------------------|----------------------------------|
| Sem tratamento | 0,52 |
| Negrolin + areia | 0,73 |
| Negrolin + areia + arame | 0,97 |
| Sikadur 32-Gel | 2,75 |
| Aço | 3,25 |

Os resultados mostram que o produto Sikadur 32-Gel aumentou a tensão de adesão dos segmentos de bambu tratados 5,29 vezes, em comparação com os segmentos de bambu não tratados.

CAPÍTULO 3

3. MATERIAL E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 Metodologia

O plano experimental deste trabalho consiste em quatro etapas descritas abaixo:

1. Ripas de bambu: nesta primeira etapa descrevem-se as características dos colmos de bambu selecionados para produção das ripas, o processamento dos colmos e os ensaios físicos e mecânicos realizados somente nas ripas.
2. Agregado de bambu: a segunda etapa detalha as características dos resíduos utilizados para produção do agregado, assim como o processamento e os ensaios efetuados somente nas partículas.
3. Bioconcreto de bambu: na etapa três apresenta-se a caracterização dos materiais utilizados para elaboração do bioconcreto de bambu, os teores das misturas, os procedimentos empregados para a produção do bioconcreto e os ensaios mecânicos executados.
4. Aderência bambu-bioconcreto: a quarta etapa detalha os procedimentos utilizados para análise da aderência bambu-bioconcreto de bambu. Expõem-se os tratamentos superficiais executados e os ensaios de aderência adotados na pesquisa.

3.2 Ripas de Bambu

3.2.1 Características dos colmos

Nesta pesquisa a espécie utilizada é a *Dendrocalamus giganteus*, proveniente da empresa Bambu Carbono Zero, localizada em Campo Belo, São Paulo. Para a confecção das ripas de bambu, utilizaram-se colmos de dois metros de altura, cortados da parte

intermediária do bambu. As idades dos colmos variam entre 5 e 7 anos, eles foram previamente tratados em octoborato, as dimensões do diâmetro interno variam de 10 a 12,9 cm, diâmetro externo de 13,9 a 16,7 cm e uma espessura média das paredes de 2,8 cm. Os colmos foram armazenados no Laboratório de Biomassa do NUMATS/COPPE-UFRJ em prateleiras e espaçados entre eles (Figura 3.1).



Figura 3.1- Colmos de bambu adquiridos para a pesquisa da espécie *Dendrocalamus Giganteus*

3.2.2 Processamento dos colmos

Para obtenção das ripas, os colmos de bambu foram divididos por toda a extensão do diâmetro, de cada divisão retirou-se ripas de seção retangular da região mais próxima da parede do colmo, região mais externa, pois a densidade de fibras é maior (Figura 3.2).

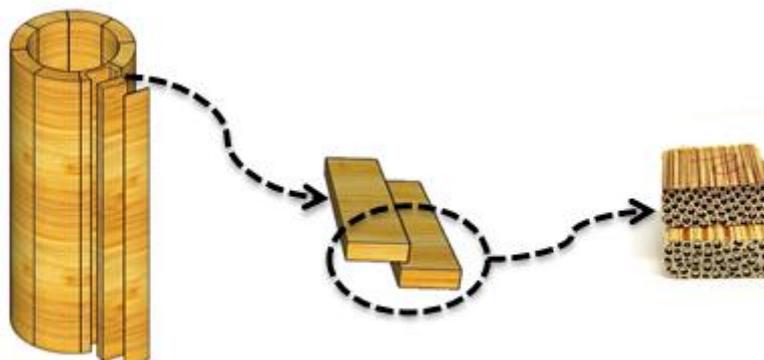


Figura 3.2-Processo utilizado para obtenção das ripas.

Devido às dificuldades em encontrar maquinários especializados no processamento deste tipo de material, os colmos foram processados em uma Marcenaria no Rio de Janeiro. O maquinário utilizado no processamento foi: serra circular plaina desengrossadeira e plaina desempenadeira (Figura 3.3).

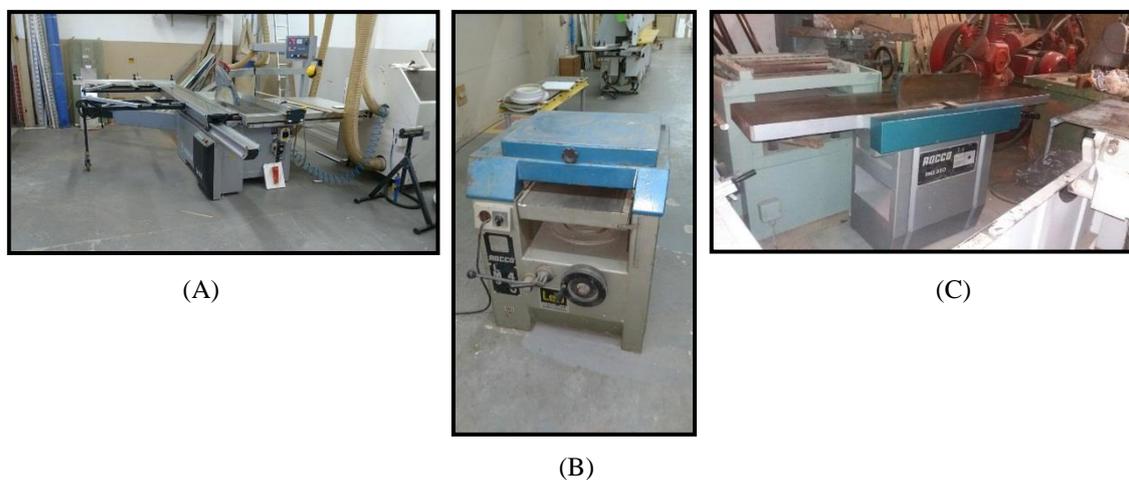


Figura 3.3- Maquinário utilizado para processamento dos colmos: A) Serra circular esquadrejadeira; B) Plaina desengrossadeira; C) Plaina desempenadeira.

Foram processadas ripas (Figura 3.4) com as seguintes dimensões: 6 x 12 x 1000 mm (espessura x largura x comprimento e a partir dessas ripas foram cortadas as amostras utilizadas nesta pesquisa.



Figura 3.4- Ripas de bambu utilizadas na pesquisa.

3.2.3 Ensaio Físicos

Para a determinação das características físicas, as ripas foram submetidas aos ensaios de absorção de água, massa específica e teor de umidade. As referências utilizadas foram: a ISO N 314 e KRAUSE (2015), utilizando os seguintes equipamentos:

- Balança com precisão de 0,01g;
- Estufa;
- Recipiente para imersão dos corpos de prova.

Foram utilizados 5 corpos de prova com cerca de 6 x 12 x 20 mm (Figura 3.5), obtidos dos entrenós das ripas de bambu processadas. As amostras foram pesadas e em seguida secas num forno a uma temperatura de 103 °C. Após 24h a massa foi registrada em intervalos de 2 horas. A amostra foi considerada seca quando a diferença entre as determinações sucessivas do peso não superou 0,01g, caracterizando a massa seca. Para remover as amostras do forno foi utilizado dessecador para evitar alteração no teor de umidade.

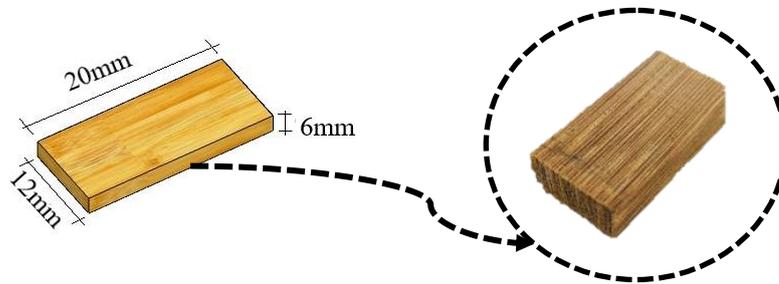


Figura 3.5-Corpo de prova para ensaios físicos.

Para quantificar a água absorvida, as amostras foram imersas em água destilada (Figura 3.6) até a saturação. As amostras eram retiradas do recipiente, expostas em folha de papel para retirar a água superficial nas paredes e pesadas diariamente.



(A)



(B)

Figura 3.6- Ensaio de absorção. A) Corpos de prova submersos em água para o ensaio de absorção; B) Balança utilizada para pesagem dos corpos de prova.

3.2.4 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos realizados nas ripas de bambu, ensaio de tração simples e ensaio de flexão foram conduzidos no Laboratório de Estruturas e Materiais (LABEST) da COPPE/UFRJ, em uma Máquina Universal de Ensaios (MUE) *Shimadzu AG-X* com capacidade de carregamento de 100 kN, com os dados adquiridos através do *software Trapezium X*.

3.2.4.1 Ensaio de tração simples

Para o ensaio de tração simples a taxa de velocidade utilizada foi de 0,3 mm/min e a deformação determinada utilizando-se o *clip-gage Shimadzu SG 50-50* posicionado no terço central das ripas de bambu (Figura 3.7). A norma seguida foi a ASTM D3039 para materiais compósitos com matriz polimérica.

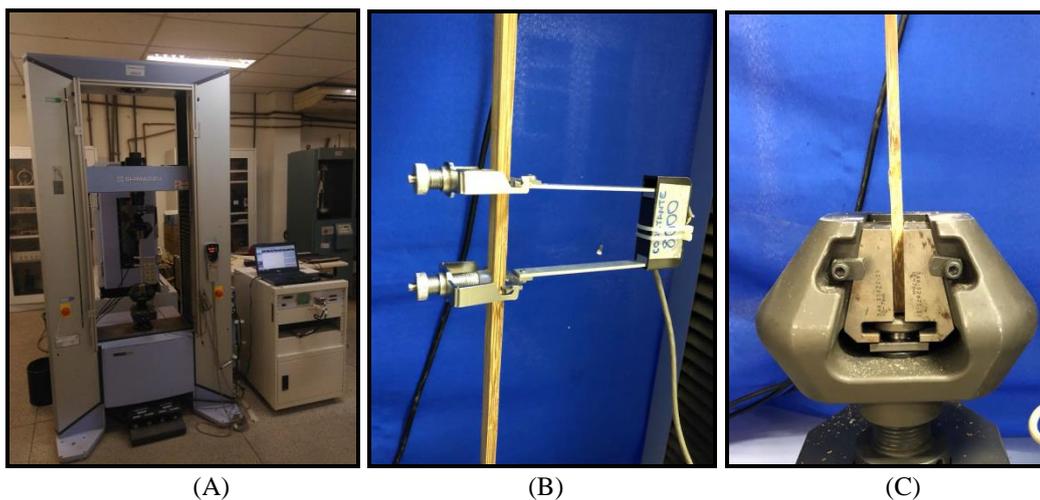


Figura 3.7- Ensaio de tração simples em ripas de bambu: A) MUE-*Shimadzu AG-X* com setup para o ensaio de tração simples; B) *Clip-gage Shimadzu SG 50-50* posicionado na ripa de bambu; C) Detalhe das garras prendendo a ripa de bambu.

Neste ensaio os corpos-de-prova utilizados possuíam um nó no centro da amostra e sem nó (região do internó). Foram ensaiadas 10 amostras com as dimensões de 6 x 12 x 250 mm (espessura x largura x comprimento) (Figura 3.8).

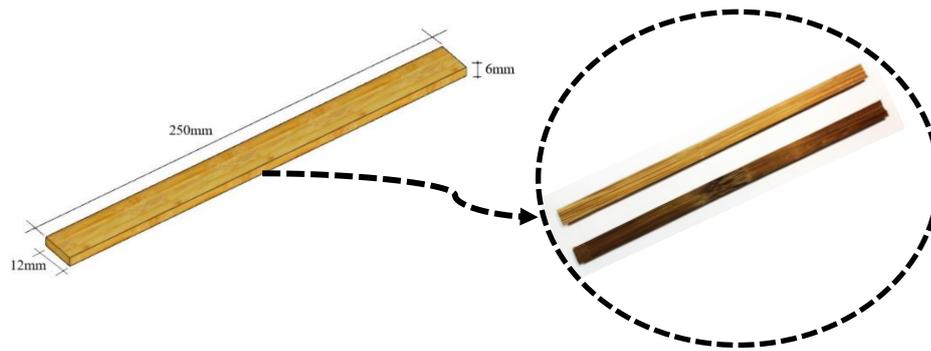


Figura 3.8- Ripas para ensaios mecânicos.

3.2.4.2 Ensaio de flexão 3 pontos

No ensaio de flexão 3 pontos, os corpos-de-prova possuíam as dimensões conforme a Figura 3.9, todas as amostras sem nó, baseado no estudo de Krause (2015). O *setup* utilizado é próprio da máquina, composto por três roletes dos quais dois configuram os apoios e distam 160 mm um do outro e o terceiro aplica o carregamento no centro do vão. A taxa de velocidade de 1 mm/min e um LVDT (*Linear Variable Transformer*) foi acoplado ao *setup* para obter os deslocamentos no centro do vão. Foram ensaiados 5 corpos-de-prova.

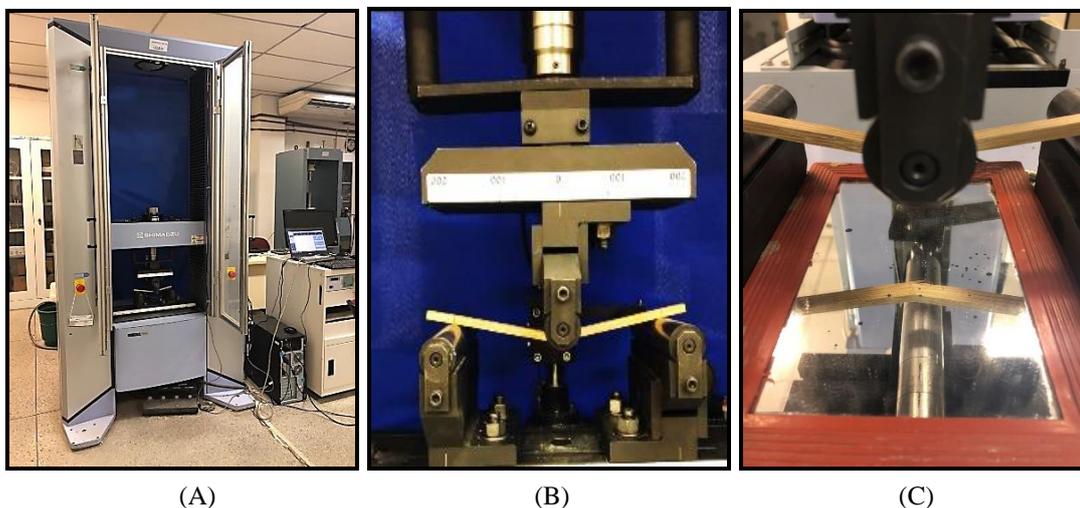


Figura 3.9- Ensaio de flexão 3 pontos em ripas de bambu: A) MUE-Shimadzu AG-X com *setup* para ensaio de flexão 3 pontos; B) Montagem ensaio de flexão; C) Ruptura da ripa de bambu durante ensaio de flexão.

3.3 Agregado de Bambu

3.3.1 Características dos resíduos de bambu

Os resíduos empregados na produção dos agregados de bambu são provenientes da cidade Petrópolis, localizada no estado do Rio de Janeiro. As espécies dos bambus utilizadas foram: *Dendrocalamus asper*, *Phyllostachys aurea* e *Phyllostachys edulis*. O comprimento dos colmos variou de 70 a 140 cm e todos passaram previamente pelo tratamento de cozimento e maçarico (queima) e uma limpeza com querosene. A Figura 3.10 exibe os resíduos utilizados na presente pesquisa.



Figura 3.10- Resíduos de bambu utilizados na presente pesquisa.

3.3.2 Produção do agregado

A produção do agregado obedeceu às seguintes etapas:

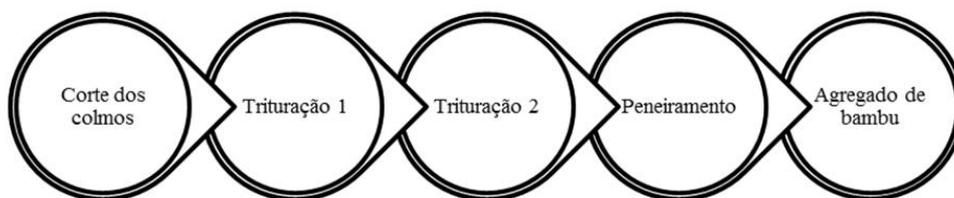


Figura 3.11- Etapas de produção do agregado de bambu.

Corte dos colmos: com o objetivo de tornar os colmos com comprimento variando de 40 a 15 cm, a primeira etapa consistiu em corta-los em uma serra circular no Laboratório de Estruturas e Materiais (LABEST) da COPPE/UFRJ (Figura 3.12).



Figura 3.12- Etapa 1 da produção dos agregados: A) Corte dos resíduos de bambu em serra circular; B) Resíduos após o corte.

Trituração 1: os resíduos sofreram o primeiro processo de trituração no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da COPPE/UFRJ em um moinho industrial de construção civil (Figura 3.13-A,B). Este processo precisou ser realizado por três vezes para todos os resíduos e o produto final foi um agregado classificado como agregado graúdo (Figura 3.13-C), retido em uma peneira com malha de 4,75 mm.

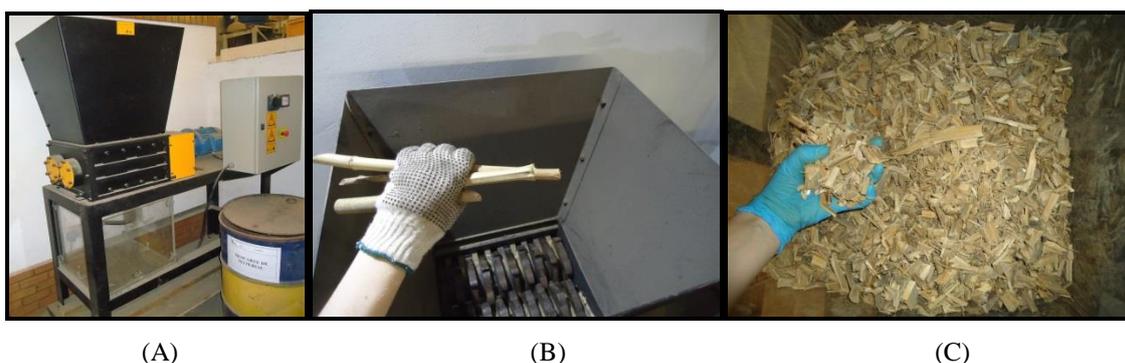


Figura 3.13- Etapa 2 da produção dos agregados: A) Moinho industrial de construção civil (Marca Framaq); B) Inserção dos resíduos no moinho e C) Agregado graúdo de bambu.

Trituração 2: no segundo processo de trituração o equipamento utilizado foi um moinho de facas da Primotécnica modelo LP1003 (Figura 3.14-A,B), disponível no Instituto de Macromoléculas (IMA) da UFRJ. O agregado graúdo resultante da trituração 1, foi todo

processado neste moinho e o material final obtido foi classificado como agregado miúdo (Figura 3.14-C), onde 95% passou na peneira de malha 4,75 mm.



Figura 3.14- Etapa 3 da produção dos agregados: A) Moinho de facas (Marca: Primotécnica); B) Tela do moinho com abertura de 9 mm; C) Agregado miúdo de bambu.

Peneiramento: com a finalidade de utilizar todo o agregado triturado, após o processo de trituração 2, todo o material foi colocado em um peneirador mecânico (Figura 3.15-A) com malha de 4,00 mm e agitado durante 10 minutos, a parcela que ficou retida na peneira foi reprocessada no moinho de facas. Após todas as etapas de produção, todos os resíduos de bambu foram integralmente utilizados e o produto final é o agregado de bambu, classificado como miúdo. Os agregados de bambu utilizados nesta pesquisa podem ser visualizados na Figura 3.15-B.



Figura 3.15- Etapa 4 da produção dos agregados: A) Peneirador mecânico; B) Agregados de bambu utilizado na pesquisa.

3.3.3 Homogeneização dos agregados de bambu

O método utilizado para homogeneização dos agregados é conhecido como pilha alongada. Este procedimento propõe espalhar o material formando uma pilha sempre na mesma quantidade e alterando o sentido do lançamento da direita para esquerda e vice-versa. Após a distribuição do material em várias camadas, separa-se o material disposto nas extremidades da pilha e um novo lançamento é realizado. O processo de montagem da pilha e a finalização estão ilustrados na Figura 3.16.



Figura 3.16- Homogeneização dos agregados de bambu: A) Preparo da pilha alongada de agregado de bambu; B) Pilha de agregado finalizada.

3.3.4 Pré-tratamento do agregado de bambu

É conhecido que os agregados de bambu apresentam em sua composição química extrativos que quando combinados com cimento prejudicam a hidratação e o processo de pega, todo o agregado passou por um pré-tratamento de lavagem em água quente, com o objetivo de remover os extrativos hidrossolúveis presentes no material. De acordo com Da Gloria (2016), para verificar o número de lavagens necessário é importante quantificar os teores de extrativos retirados após cada lavagem.

Este procedimento foi realizado usando uma proporção de bambu/água de 100g/l, a água é pré-aquecida a uma temperatura de 80°C (Figura 3.17-A) e posteriormente o agregado de bambu é adicionado (Figura 3.17-B) e permanece por 1 hora na chapa de aquecimento. Foram realizados 5 ciclos de lavagem, onde de cada lavagem a água residual foi filtrada em uma peneira com malha de 150µm.

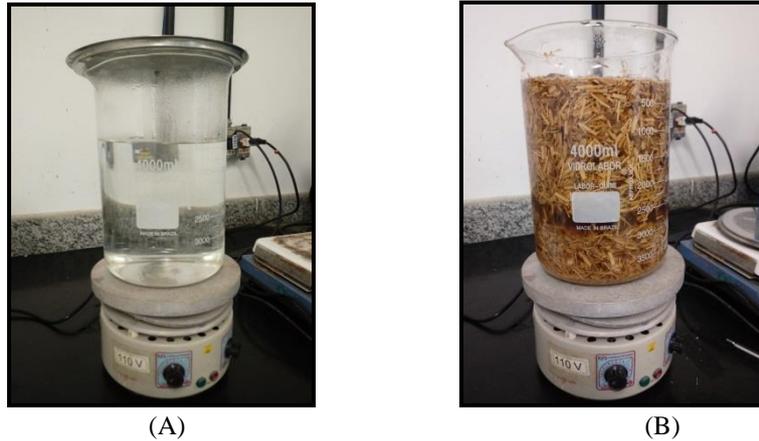


Figura 3.17- Pré-tratamento do bioagregado de bambu: A) Água em processo de aquecimento até atingir 80°C; B) Agregado de bambu em água.

Após cada ciclo de lavagem a água foi depositada em um recipiente plástico sem tampa e armazenada em uma sala com temperatura controlada de 40° C, por um período de 36 horas, para que toda água fosse evaporada e restasse os extrativos para quantificação, através da seguinte equação 1.

$$C_e = \frac{m1}{m2} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

C_e = concentração de extrativos (%)

$m1$ = massas dos extrativos após secagem (g)

$m2$ = massa de água residuais (g)

3.3.5 Morfologia do agregado de bambu-AIMS

O equipamento utilizado para analisar a morfologia do agregado de bambu foi o *Aggregate Imaging System* (AIMS) da marca Pine, disponível no Laboratório de Geotecnia Professor Jaques de Medina (LABGEO) da COPPE/UFRJ. Este equipamento (Figura 3.18-A) realiza a análise do índice de angularidade e a forma 2D dos agregados. O AIMS usa uma configuração simples que consiste em uma câmera e dois tipos diferentes de iluminação para capturar imagens dos agregados em diferentes resoluções.

Como os agregados de bambu utilizados são classificados como agregados miúdos, as malhas das peneiras utilizadas neste ensaio foram de: 2,36; 1,18; 0,60; 0,30; 0,15 e 0,075 mm. O ensaio foi iniciado com a organização dos agregados em uma bandeja (Figura 3.18-B) que possui uma largura proporcional à abertura da peneira, foram distribuídas aproximadamente 200 partículas do agregado por bandeja. As partículas precisam estar dispostas com uma distância mínima entre elas para que não ocorra sobreposição e o dispositivo faça a leitura correta.

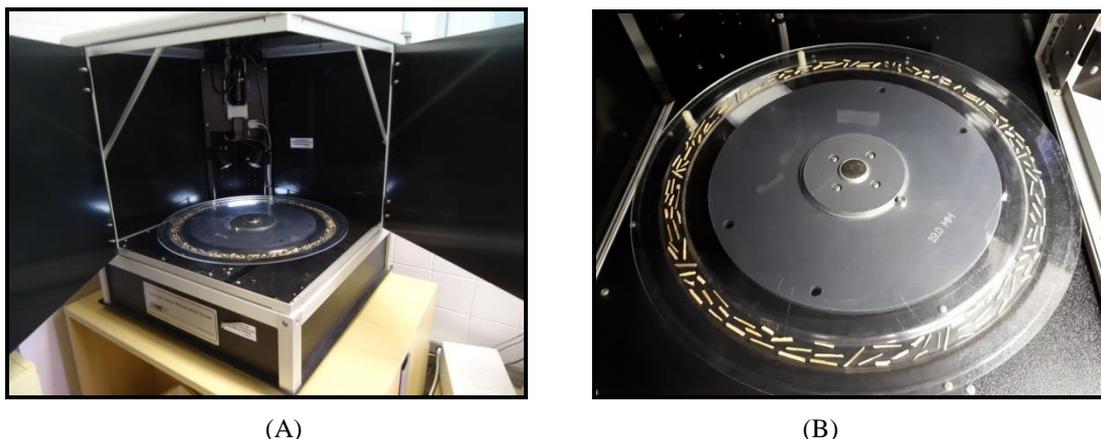


Figura 3.18- Análise da morfologia dos agregados de bambu: A) Equipamento AIMS; B) Disposição das partículas de bambu.

O índice de angularidade varia de 0 a 10000, onde valores próximos a zero são característicos de amostras com forma similar a um círculo. O índice de forma 2D quantifica a forma das imagens bidimensionais do agregado, valores próximos a zero configuram a amostra um formato circular e valores mais próximos de 20 classificam as amostras com formato alongado.

Al Rousan (2005) propõe em seu trabalho os limites para a classificação das partículas, em relação a angularidade e a forma 2D, conforme a Tabela 3.1. As classificações realizadas neste trabalho foram baseadas nestes valores.

Tabela 3.1- Índices de angularidade e limites de classificação. Al Rousan (2005)

| Angularidade | Classificação | Forma 2D | Classificação |
|--------------|-----------------|----------|---------------|
| 2100 | Arredondado | < 6,5 | Circular |
| 2100-4000 | Sub-arredondado | 6,5-8,0 | Semi-circular |
| 4000-5400 | Sub-angular | 8,0-10,5 | Semi-alongado |
| 5400 | Angular | < 10,5 | Alongado |

A análise do comprimento e da largura dos agregados foi realizada através do análise e processamento das imagens obtidas para cada peneira , com a ferramenta *Image J*.

3.3.6 Teor de umidade, massa específica e absorção de água

O teor de umidade do agregado de bambu foi determinado baseado na norma NBR 9939/2011. Foram separadas três amostras de 100g de agregado e distribuídos em bandejas metálicas (Figura 3.19) para pesagem da massa inicial, após a pesagem os agregados foram levados à estufa com temperatura de 105°C até atingir massa constante, registrando assim a massa seca. Com os valores de massa registrados calculou-se o teor de umidade do agregado de bambu.



Figura 3.19- Amostras utilizadas para ensaio de teor de umidade.

Para determinar a massa específica, o ensaio baseou-se na NBR 52/2009. Inicialmente o agregado ficou submerso em água por 24h e posteriormente foi exposto ao ar para secar superficialmente (Figura 3.20).

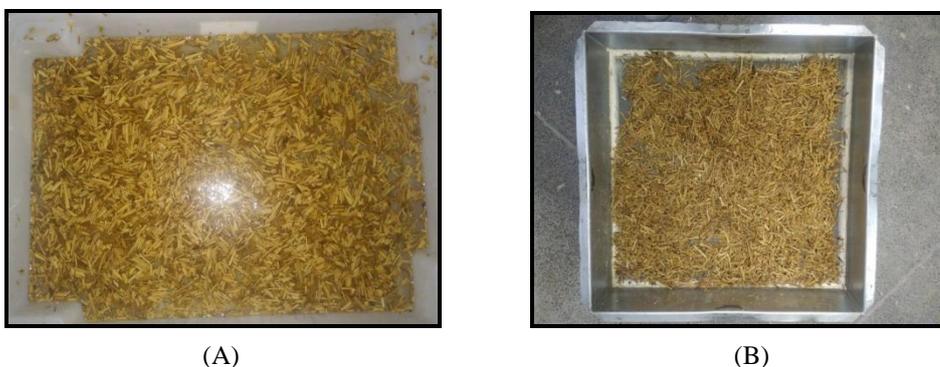


Figura 3.20- Etapa inicial do ensaio de massa específica do agregado de bambu: A) Agregado imerso em água por 24h; B) Agregado seco ao ar.

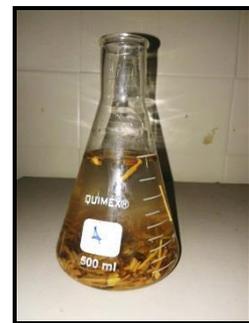
A etapa seguinte foi a utilização do tronco de cone onde o agregado foi inserido e compactado com 25 golpes (Figura 3.21-A) seguidamente o molde é levantado verticalmente. Conforme constatado por Andreola (2017), o agregado de bambu não desmorona (Figura 3.21-B), pois há uma quantidade importante de vazios entre as partículas. A amostra foi disposta em um frasco com água até a marca de 500 ml (Figura 3.21-C) e mantida em um banho com temperatura de 21°C, após 1 hora completou-se de água o frasco e o conjunto foi pesado para o registro da massa total. Por fim a amostra foi retirada e posta para secar a 105°C em estufa até constância de massa.



(A)



(B)



(C)

Figura 3.21- Ensaio de massa específica: A) Tronco de cone; B) Agregado de bambu após a compactação; C) Frasco com amostra do agregado.

A absorção de água do agregado foi definida em condição de mistura, ou seja, 500g agregado de bambu seco foi inserido em uma argamassadeira (Figura 3.22) juntamente com 1 litro de água sendo misturados durante 8 minutos.



Figura 3.22- Agregado de bambu em água para ensaio de absorção.

Após 8 minutos de mistura, o agregado passou por uma peneira de abertura de 150 μ m para escorrer a água e disposto em uma bandeja metálica. Quando o agregado alcançou a condição de superfície seca foi pesado e definida a absorção de água do material.

3.4 Bioconcreto de Bambu (BCB)

O agregado de bambu foi produzido e caracterizado nesta pesquisa, pois juntamente com os materiais cimentícios compõe o bioconcreto de bambu. Os próximos tópicos apresentam todos os detalhes dos materiais, produção e misturas do bioconcreto de bambu utilizados na presente pesquisa.

3.4.1 Materiais

3.4.1.1 Cimento Portland, metacaulinita e cinza volante

O cimento utilizado para o desenvolvimento do bioconcreto foi o CP V ARI da empresa Holcim, a metacaulinita fabricada pela Metacaulim do Brasil e a cinza volante pela Pozo Fly.

A composição química dos materiais cimentícios foi determinada no espectrômetro de fluorescência de raios X modelo EDX-720 da *Shimadzu* e a densidade definida por meio do picnômetro à gás hélio da marca Micromeritics modelo AccuPyc 1340.

A granulometria dos materiais cimentícios foi realizada por meio do equipamento a laser Malvern MasterSizer 2000, que utiliza uma técnica de espalhamento de luz, onde ocorre uma medição dos ângulos de difração do raio laser fazendo uma relação com os diâmetros das partículas.

3.4.1.2 Água

A água utilizada na pesquisa foi proveniente da Rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

3.4.1.3 Cloreto de cálcio

Para acelerar a pega do cimento foi utilizado cloreto de cálcio puríssimo anidro fornecido pela Proquímicos em um teor de 3% em relação a massa de materiais cimentícios.

3.4.2 Produção do bioconcreto de bambu

De acordo com Andreola (2017), o agregado de bambu possui uma capacidade elevada de absorção de água, o que gera influência na trabalhabilidade e no endurecimento do cimento. Frente a esta questão é necessário garantir que a quantidade de água utilizada na produção do bioconcreto seja suficiente e não exceda a demanda do agregado. A autora sugere que a quantidade de água total utilizada seja a soma da água de hidratação (água efetiva) com a água de compensação que está relacionada à capacidade de absorção do agregado de bambu.

Para a produção do bioconcreto de bambu, foram selecionados três volumes distintos de agregados de bambu: 25%, 35% e 45%. A relação água/cimento foi fixada em 0,40 para todas as misturas realizadas nesta pesquisa. O cimento corresponde a 60%, a metacaulinita 30%, cinza volante 10%, o cloreto de cálcio 3% em relação aos materiais cimentícios e a água total corresponde a soma da água de compensação e a água efetiva. Estes teores foram definidos por pesquisadores do NUMATS/COPPE/UFRJ com o objetivo de reduzir o consumo de cimento e melhorar a resistência mecânica dos bioconcretos. A Tabela 3.2 detalha a dosagem das misturas de bioconcreto utilizadas.

Tabela 3.2-Dosagem do bioconcreto de bambu (kg/m³).

| Materiais | BCB 25% | BCB 35% | BCB 45% |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|
| Cimento | 579,59 | 502,31 | 425,03 |
| Bambu | 132,50 | 185,50 | 238,50 |
| Cinza Volante | 96,59 | 83,71 | 70,83 |
| Metacaulinita | 289,79 | 251,15 | 212,51 |
| Cloreto de Cálcio | 31,44 | 27,25 | 23,06 |
| Água Total | 527,96 | 515,51 | 503,06 |

Os procedimentos desempenhados para a produção do bioconcreto foram baseados na pesquisa de Andreola (2017), toda a mistura foi preparada em uma argamassadeira de 20 litros. São eles:

1. Mistura dos materiais cimentícios e agregado de bambu seco, por 1 minuto;
2. Adição progressiva da água total misturada previamente com cloreto, durante 1 minuto;
3. Mistura até a homogeneização, até que o tempo total seja de 8 minutos.

Com a mistura pronta, o processo de moldagem foi realizado. O bioconcreto fresco foi adicionado aos moldes previamente preparados com óleo mineral, distribuídos em três camadas e adensados em mesa vibratória (68Hz) por 10 segundos. Os moldes foram mantidos em uma sala com temperatura ambiente de 21°C por 24 horas, após o processo de desmoldagem com a finalidade de proteger o bioconcreto em relação a perda de umidade e os corpos-de-prova foram levados para a cura.

3.4.3 Ensaios no Bioconcreto de bambu

No bioconcreto de bambu foram realizados os ensaios de espalhamento, densidade e os ensaios mecânicos de tração direta, tração por compressão diametral e compressão uniaxial com idade de 28 dias. Os ensaios estão descritos nos tópicos abaixo.

Espalhamento e densidade

O ensaio de espalhamento foi realizado com o bioconcreto em estado fresco de acordo com a NBR 13276 (2016). Para a densidade os corpos-de-prova de diferentes teores foram aferidos após cura de 28 dias e mantidos a uma temperatura de 21°C e umidade relativa de 55%.

Estudo do tipo de cura

Com o objetivo de melhorar a resposta mecânica do bioconcreto e garantir uma boa aderência, avaliou-se o efeito da cura úmida e da cura ao ar com ênfase na cura interna promovida pela estrutura porosa da biomassa.

Foram confeccionados 24 corpos-de-prova cilíndricos, sendo 8 amostras para cada teor de agregado (25%, 35% e 45%) e após o processo de desmoldagem quatro amostras de cada mistura foram expostas a cura úmida em um ambiente com umidade relativa do ar de 100% e temperatura de 21°C e a cura ao ar (denominada de cura seca) realizada em um ambiente com umidade relativa do ar de 55% e temperatura de 21°C.

Ensaio de compressão uniaxial

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados na Máquina de Ensaio Universal (MUE) modelo *Shimadzu-1000kN* com uma taxa de velocidade de 0,3 mm/min. Para cada mistura foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos de diâmetro 50 mm e altura 100 mm, que foram ensaiados com idades de 7 e 28 dias. Os parâmetros analisados neste ensaio foram a resistência à compressão e o módulo de elasticidade segundo a NBR 5739 (2018) e a NBR 8522 (2017). Foi utilizado um *setup* acoplado no centro dos corpos de prova para medição da deformação axial com dois LVDTs acoplados (Figura 3.23).



Figura 3.23- Ensaio de compressão uniaxial do bioconcreto de bambu.

Ensaio de tração direta

Os ensaios de tração direta do bioconcreto de bambu foram realizados na máquina de ensaios modelo *Shimadzu* AG-X, com célula de carga de 100 kN, e velocidade de deslocamento de 0,1 mm/min. Foram utilizados 15 corpos de prova prismáticos de 400 x 50 x 15 (comprimento x largura x espessura), (Figura 3.24) sendo cinco para cada tratamento.



Figura 3.24- Corpo-de-prova de bioconcreto para ensaio de tração direta.

Os deslocamentos axiais foram obtidos a partir da leitura média de dois LVDT's posicionados nas laterais do terço central do corpo de prova, conforme Figura 3.25.

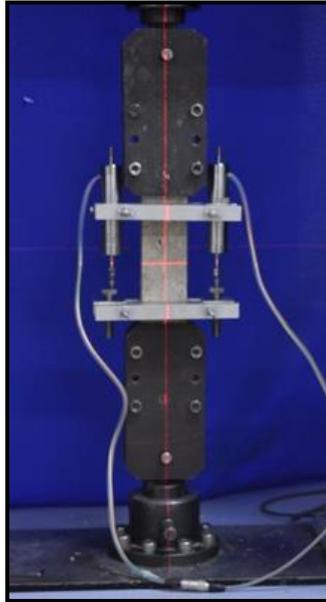


Figura 3.25- Ensaio de tração direta do bioconcreto de bambu.

Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado de acordo com a NBR 7222 (2011). Para cada traço, foram utilizados três corpos-de-prova 50 mm de diâmetro e 50 mm de altura. A máquina utilizada foi a modelo *Shimadzu-1000kN*, com velocidade de 0,3 mm/min.

Durante o ensaio o corpo-de-prova foi submetido a um carregamento de compressão ao longo de duas diretrizes situadas em um mesmo plano diametral. A montagem do ensaio está ilustrada na Figura 3.26.

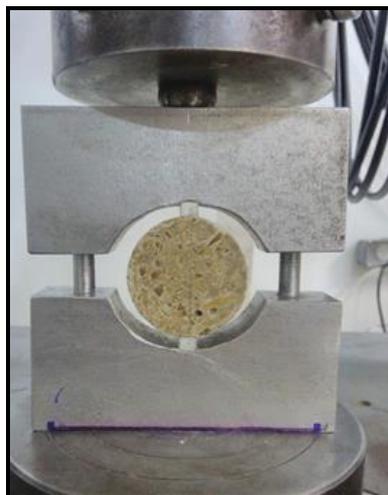


Figura 3.26- Ensaio de resistência a tração por compressão diametral do bioconcreto de bambu.

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada através da Equação (2):

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot F_r}{D \cdot L \cdot \pi} \quad (2)$$

Onde:

σ_t = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F_r = Força de ruptura (N);

D = diâmetro do corpo-de-prova (mm);

L = comprimento do corpo-de-prova (mm).

3.5 Aderência bambu- bioconcreto

Com a finalidade de estudar a aderência entre o bambu e o bioconcreto com diferentes frações volumétricas de agregados de bambu, foram analisados nesta pesquisa os tratamentos superficiais aplicados diretamente nas ripas e a influência que esses tratamentos trouxeram quando combinados ao bioconcreto com ensaios de arrancamento e de tirante.

3.5.1 Tratamento das ripas de bambu

Com base nos estudos já elaborados sobre a aderência do bambu com o concreto, foram selecionados e analisados quatro tipos de tratamento:

- Ripas *in natura*: as ripas que receberam tratamento, classificadas como as ripas de referência.
- Ripas com resina epóxi Sikadur 32: as ripas receberam uma camada de Sikadur 32 variando de 0,5 mm a 1 mm de espessura. A resina foi aplicada diretamente sobre as ripas com uma espátula e colocadas para secar durante 24 horas. Este tratamento foi selecionado com objetivo de analisar que se além da função de impermeabilizar a ripa, a textura do material também colaboraria na aderência.
- Ripas com resina epóxi Sikadur 32 e areia fina ou grossa: as ripas receberam uma camada de Sikadur 32 e após 5 minutos com a resina ainda em estado fresco uma camada de areia até que visivelmente toda a região demarcada estivesse totalmente coberta. As areias utilizadas para o recobrimento foram as

passantes nas peneiras com malha de abertura de 1,18 mm e 600 μm . As etapas do processo de revestimento com Sikadur 32 e areia estão ilustradas na Figura 3.27.



Figura 3.27- Etapas dos tratamentos das ripas de bambu.

Os tratamentos descritos acima foram realizados para os ensaios de arrancamento, o que obteve a melhor resposta foi aplicado ao ensaio de tirante.

3.5.2 Ensaios de Aderência

Arrancamento

O ensaio de arrancamento direto, também conhecido como *pull-out-test*, é o mais empregado para análise de aderência em concreto reforçado com bambu. O ensaio foi realizado em uma máquina Shimadzu AG-X de 100 kN, a taxa de velocidade utilizada foi 1 mm/min e foram ensaiados três corpos-de-prova para cada tratamento de ripas empregado. Os tratamentos utilizados e suas respectivas siglas são: REF (Referência), são ripas sem tratamento algum, deixadas em seu estado natural, SIK (Sikadur) ripas revestidas com resina epóxi com Sikadur 32®, AS1 (Areia passante na peneira com malha de abertura de 1,18 e Sikadur) que são as ripas revestidas com resina epóxi e areia fina e AS2 (Areia passante na peneira com malha de abertura de 600 e Sikadur) são as ripas revestidas com resina epóxi e areia grossa. As ripas possuíam as seguintes dimensões 6 x 12 x 150 mm (espessura x largura x comprimento) (Figura 3.28).



Figura 3.28- Ripas tratadas utilizados no ensaio de arrancamento.

Os revestimentos foram aplicados de 1 a 3 dias antes das moldagens dos corpos de prova para que a cura da resina epóxi fosse concluída. No processo de moldagem, as ripas de bambu já tratadas foram coladas no fundo do molde para garantir que o comprimento de embebimento (50 mm) fosse obedecido (Figura 3.29). Para este ensaio o bioconcreto de bambu utilizado foi o de 25% de volume de agregado de bambu (BCB 25%), devido ser a mistura com maior teor de cimento.



(A)



(B)

Figura 3.29- A) Ripas fixadas no fundo do molde; B) Finalização da moldagem.

Os corpos de prova foram cúbicos de 50 x 50 x 50 mm³ (Figura 3.30-A). As amostras foram fixadas entre duas chapas de aço, conforme a Figura 3.30-B, com a finalidade de deixa-lo totalmente imóvel durante a realização do ensaio. A garra localizada na parte

superior da máquina prende a ripa de bambu, exercendo uma força de arrancamento, com o objetivo de se garantir que o bambu se desprenda do bioconcreto.



(A)



(B)

Figura 3.30- A) Corpos-de-prova utilizados nos ensaios de arrancamento; B) Setup do ensaio de arrancamento.

A tensão adesional (τ) foi calculada conforme a equação abaixo:

$$\tau = \frac{F}{(2e + 2l) \cdot l_b} \quad (3)$$

Onde:

F = força (kN);

e = espessura (mm);

l = largura (mm);

l_b = comprimento de embebedimento (mm).

Ensaio de tirante

Para determinação da tensão de aderência os procedimentos foram conduzidos de acordo com a NBR 7477 (1982), adaptada para a utilização do bambu.

O ensaio consiste em um corpo-de-prova prismático de bioconcreto com uma ripa de bambu de um extremo ao outro. As forças de tração são aplicadas nos dois extremos da ripa e determinados os deslocamentos relativos entre os materiais. As dimensões dos corpos-de-prova foram de 50 x 50 x 600 mm (largura x altura x comprimento) reforçados longitudinalmente com uma ripa de 6 x 12 x 720 mm (espessura x largura x comprimento), como ilustrado nas Figura 3.31 e 3.32.

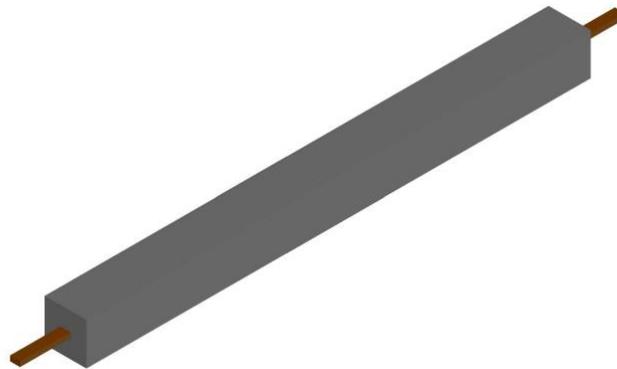


Figura 3.31- Vista 3D do tirante de bioconcreto reforçado com bambu.

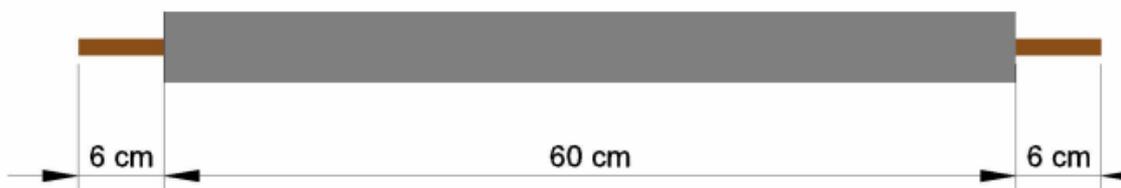


Figura 3.32- Vista frontal com as dimensões do tirante e as extremidades das ripas.

As ripas selecionadas para este ensaio apresentavam dois nós, com uma média de distância entre um nó e outro (região de entrenó) de 31 cm e o comprimento total de 72

cm (Figura 3.33). Garantindo assim que os nós estão inseridos nos 60 cm do comprimento do tirante.

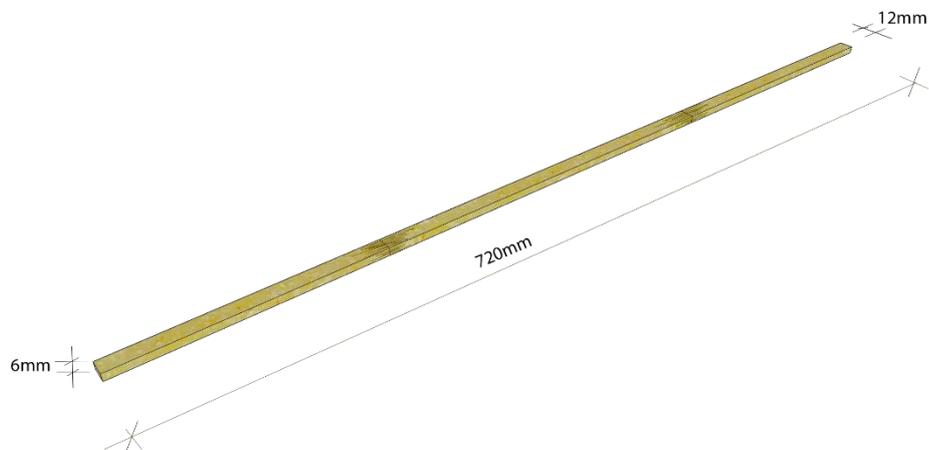


Figura 3.33- Dimensões da ripa de bambu utilizada no ensaio de tirante.

Foram realizados ensaios de tração direta em cinco ripas tratadas que atendiam as características acima. A máquina utilizada foi a *Shimadzu AG-X/100 kN* (Figura 3.34-A) com um *clip-gage Shimadzu SG 50-50* posicionado no terço central das ripas de bambu (Figura 3.34-B), com uma taxa de velocidade de 0,3 mm/min.

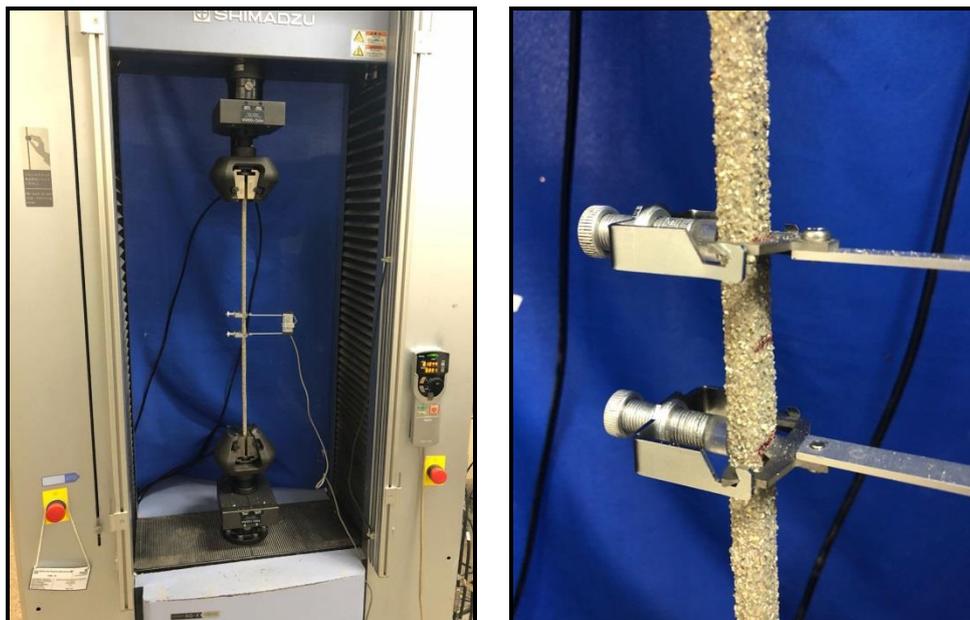


Figura 3.34- Ensaio de tração direta na ripa de bambu tratada e de 72 cm de comprimento.

Para a moldagem nos corpos-de-prova foram confeccionados três moldes de aço, onde nas extremidades foram feitos orifícios para a inserção das ripas de bambu. No processo de moldagem as ripas previamente tratadas foram dispostas no molde (Figura 3.35-A) e a distribuição do bioconcreto fresco (Figura 3.35-B) ocorreu sobre a mesa de vibração em 3 etapas. A cada etapa os moldes eram adensados mecanicamente (68 Hz) durante 10 segundos, até que todo molde estivesse preenchido (Figura 3.35-C) e a mistura homogênea.

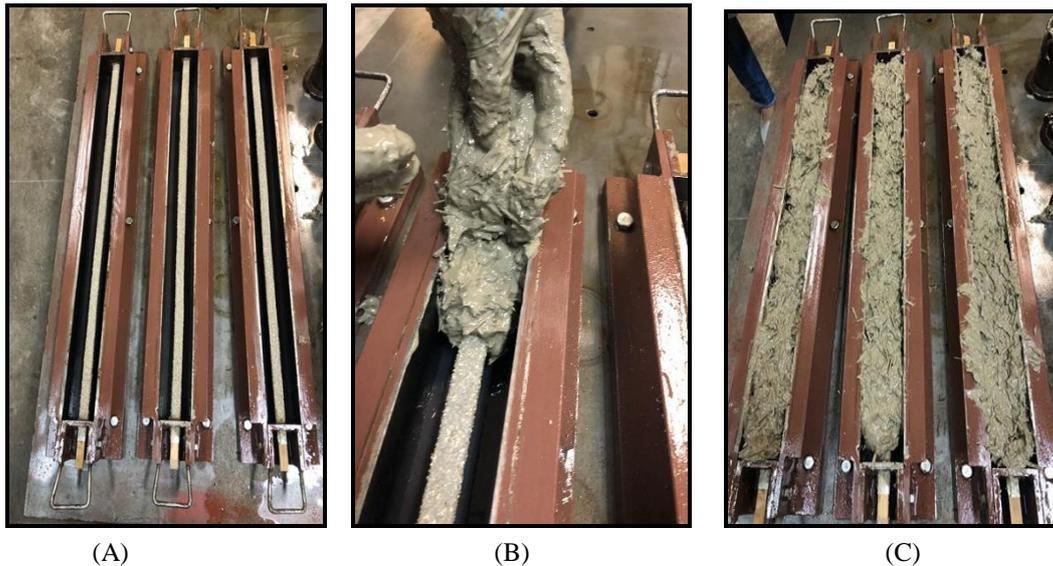


Figura 3.35- Moldagem dos corpos-de-prova do ensaio de tirante: A) Posicionamento das ripas no molde; B) Lançamento do bioconcreto de bambu e C) Após a aplicação da terceira camada de bioconcreto.

Os moldes foram protegidos durante 24 horas contra a perda de umidade com um tecido úmido em um ambiente de 21°C. Após a desmoldagem os tirantes foram levados à cura seca por 28 dias e temperatura de 21°C.

A prensa utilizada para realização do ensaio foi a *Shimadzu* AG-X (100 kN). Foram confeccionados três corpos de prova para cada traço de bioconcreto. A velocidade utilizada durante o ensaio foi de 0,3 mm/min e para a leitura do deslocamento utilizou-se dois LVDTs posicionados conforme a Figura 3.36.

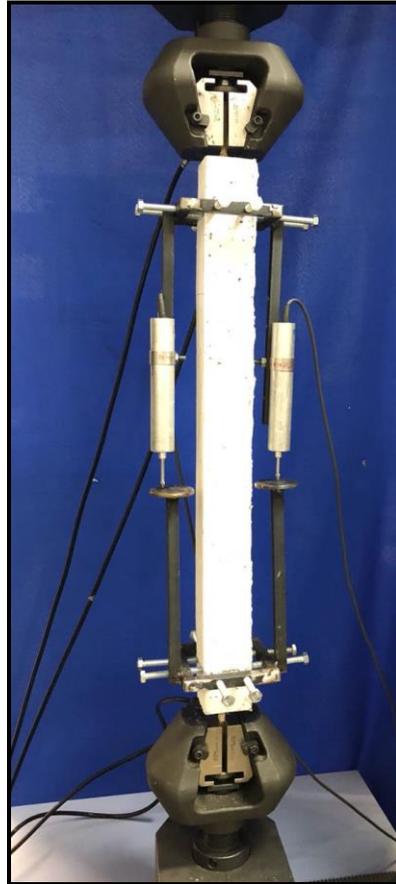


Figura 3.36- Montagem do ensaio de tirante.

Para o cálculo do espaçamento médio entre fissuras, foram realizadas três leituras entre duas fissuras e em seguida com as medições é realizado a média aritmética e calculado o espaçamentos médio nas regiões L1, L2 e L3, a Figura 3.37 ilustra o processo e as equações 4, 5 e 6.

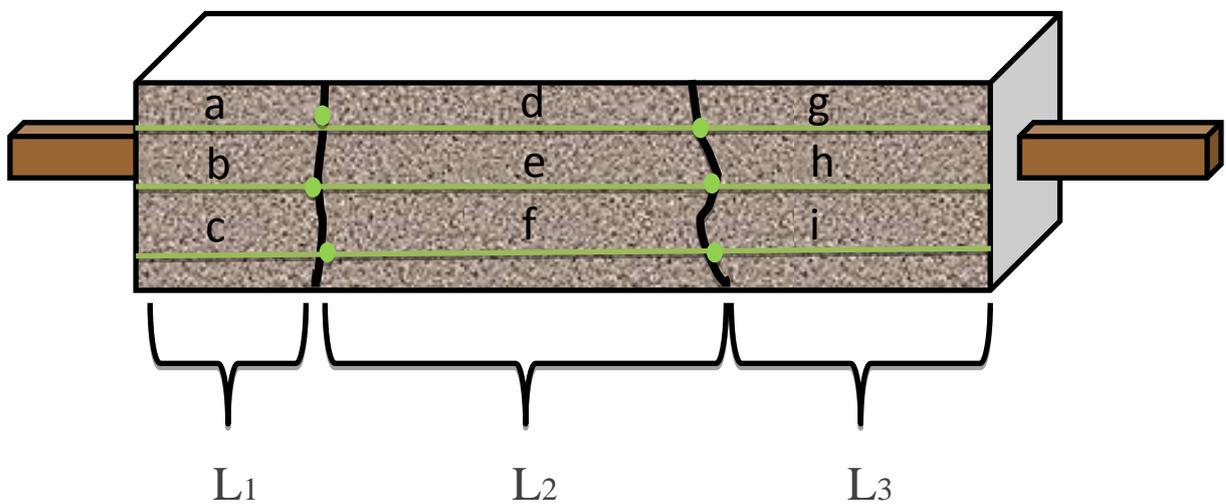


Figura 3.37- Análise do espaçamento entre fissuras no tirante.

$$L_1 = \frac{a+b+c}{3} \quad (4) \quad L_2 = \frac{d+e+f}{3} \quad (5) \quad L_3 = \frac{g+h+i}{3} \quad (6)$$

Para o cálculo do espaçamento médio do tirante foi calculada a média aritmética com os valores de L1, L2 e L3, conforme a equação 7 abaixo:

$$\Delta L_{\text{médio}} = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \quad (7)$$

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresenta-se no presente capítulo os resultados obtidos em cada etapa do plano experimental.

4.1 Ripas de bambu

4.1.1 Ensaios físicos

A Tabela 4.1, apresenta os resultados da caracterização física das ripas de bambu utilizadas nesta pesquisa da espécie *Dendrocalamus Giganteus*.

Tabela 4.1- Características física das ripas de bambu.

| Massa específica (g/cm ³) | Absorção de água % | Teor de umidade % |
|---------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| 0,89 | 46,79 | 12,30 |

O valor de massa específica encontrado foi de 0,89 g/cm³, de acordo com Liese (1998) o valor de massa específica do bambu pode variar de 0,50 a 0,90 g/cm³, inclusive dentro de uma mesma espécie. Para o *Dendrocalamus Giganteus* os pesquisadores Brito *et al.* (2015) e Ciaramello & Azzini (1971) encontraram os valores de 0,66 e 0,74 g/cm³ respectivamente. No bambu o valor de massa específica está diretamente relacionado a concentração de feixes fibrovasculares, como nesta pesquisa analisou-se ripas da região com maior concentração de fibras em relação a parede do colmo, o valor encontrado é maior que os referenciados pela literatura citada, que analisam a parede do colmo por completo.

O valor de absorção de água encontrado após sete dias de imersão em água foi de cerca de 47%. Para a mesma variedade de bambu Azadeh (2018) encontrou uma absorção de 96% menor para vinte e oito dias de imersão em água.

O teor de umidade é uma característica física importante para seu uso como reforço, pois interfere tanto nas propriedades físicas como na durabilidade. O valor de 12,30% encontrado é um valor que, de acordo com Wakchaure & Cute (2012), otimiza a resistência mecânica do bambu e reduz o ataque a fungos, pois segundo os autores o teor de umidade inferior a 15% é considerado um valor ótimo para sua aplicação, já que um bambu com alto teor de umidade atrai fungos e insetos favorecendo a sua degradação.

4.1.2 Ensaios mecânicos

Tração Direta

Na Figura 4.1 apresenta-se as curvas tensão x deformação das ripas de bambu sem nó, que apresentaram um comportamento linear até a ruptura.

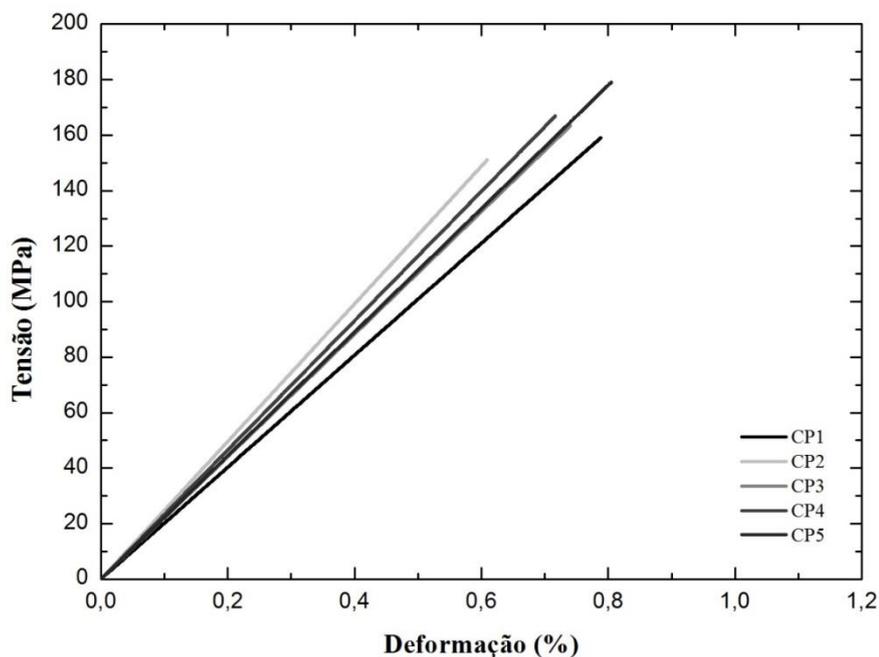


Figura 4.1- Curvas tensão x deformação das ripas de bambu sem nó na tração direta.

Os resultados de resistência à tração e módulo de elasticidade das ripas sem nó estão apresentados na Tabela 4.2. Observa-se que o bambu atinge uma resistência média de 163,95 MPa e um módulo de elasticidade médio de 22,52 GPa, com coeficientes de variação de 6,3% e 7,5%, respectivamente. A deformação de ruptura das ripas foi de 0,73% com um CV de 9,44%.

Tabela 4.2- Valores de resistência à tração para ripas de bambu sem nó.

| CP | Tensão (MPa) | Deformação (%) | E (GPa) |
|-----------------------------|---------------------|-----------------------|----------------|
| 1 | 159,043 | 0,788 | 20,183 |
| 2 | 151,123 | 0,609 | 24,812 |
| 3 | 163,479 | 0,740 | 22,083 |
| 4 | 166,963 | 0,717 | 23,298 |
| 5 | 179,186 | 0,805 | 22,257 |
| Média | 163,959 | 0,732 | 22,527 |
| Coeficiente de Variação (%) | 6,32 | 9,44 | 7,50 |

Um comportamento linear-elástico também pode ser visto nas curvas tensão x deformação das ripas com nó (Figura 4.2).

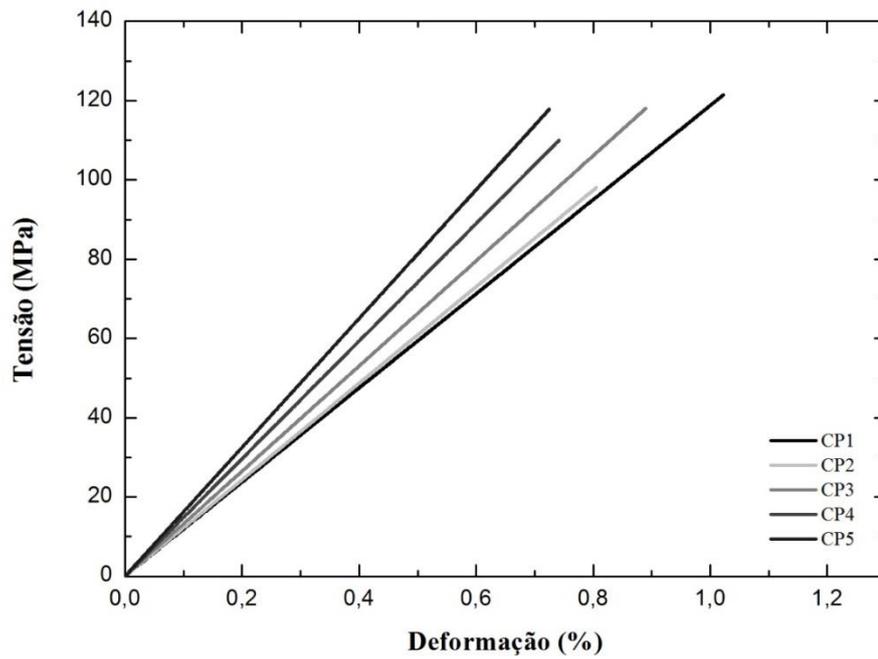


Figura 4.2- Curvas tensão x deformação das ripas de bambu com nó na tração direta.

As ripas de bambu com nó apresentaram uma tensão média de 113,09 MPa, um módulo de elasticidade médio de 13,68 GPa e uma deformação de ruptura de 0,84%, conforme mostrado na Tabela 4.3. Os coeficientes de variação de 8,31%, 14,63% e 13,48% foram superiores aos das ripas sem nó devido à heterogeneidade promovida em cada amostra pela presença dos nós.

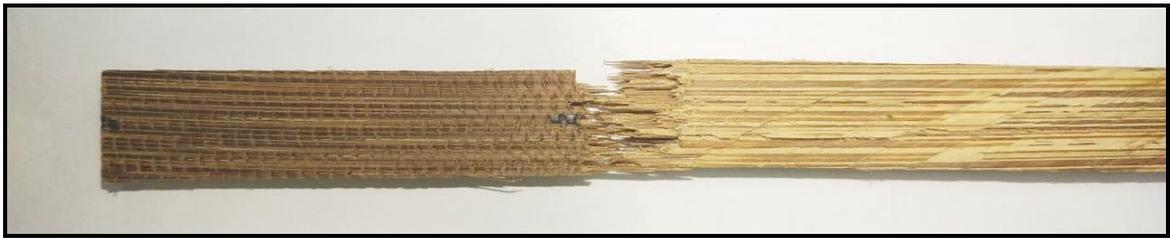
Tabela 4.3- Valores de resistência à tração para as ripas de bambu com nó.

| CP | Tensão (MPa) | Deformação (%) | E (GPa) |
|---------------------------------|---------------------|-----------------------|----------------|
| 1 | 121,482 | 1,023 | 11,879 |
| 2 | 98,040 | 0,805 | 12,179 |
| 3 | 118,087 | 0,890 | 13,268 |
| 4 | 110,047 | 0,742 | 14,838 |
| 5 | 117,805 | 0,725 | 16,253 |
| Média | 113,092 | 0,837 | 13,683 |
| Coefficiente de Variação (%) | 8,31 | 14,63 | 13,48 |

Comparando os resultados para as ripas sem nó e com nó submetidos à tração direta, percebe-se que as ripas com nó apresentaram um valor de resistência 30% menor que as das ripas sem nó e o módulo de elasticidade reduziu em 54%. A deformação de ruptura das amostras com nó foi cerca de 14% maior do que as das amostras sem nó. Villalobos (1993) afirma que os nós são pontos de concentração de tensões e enfraquecimento dos bambus, já que há desvio das fibras.

Os modos de ruptura dos corpos-de-prova de tração sem nó estão ilustrados na Figura 4.3. Krause (2015) e ASTM D 3039 (2008) classificam estes modos de ruptura como tração em bloco no topo e cisalhamento. O modo de ruptura em bloco normalmente ocorre junto à garra.

Nas ripas com nó as rupturas ocorreram nos nós (Figura 4.4), como esperado. Ghavami (2005) justifica que neste ponto a resistência diminui devido à descontinuidade das fibras nesta região.



(A)



(B)

Figura 4.3- Modos de ruptura das ripas de bambu sem nó: A) Tração em bloco; B) Cisalhamento.



Figura 4.4- Modo de ruptura ripas com nó.

Flexão em três pontos

Na Figura 4.5 são apresentadas as curvas de tensão x deslocamento para as ripas de bambu sem nó.

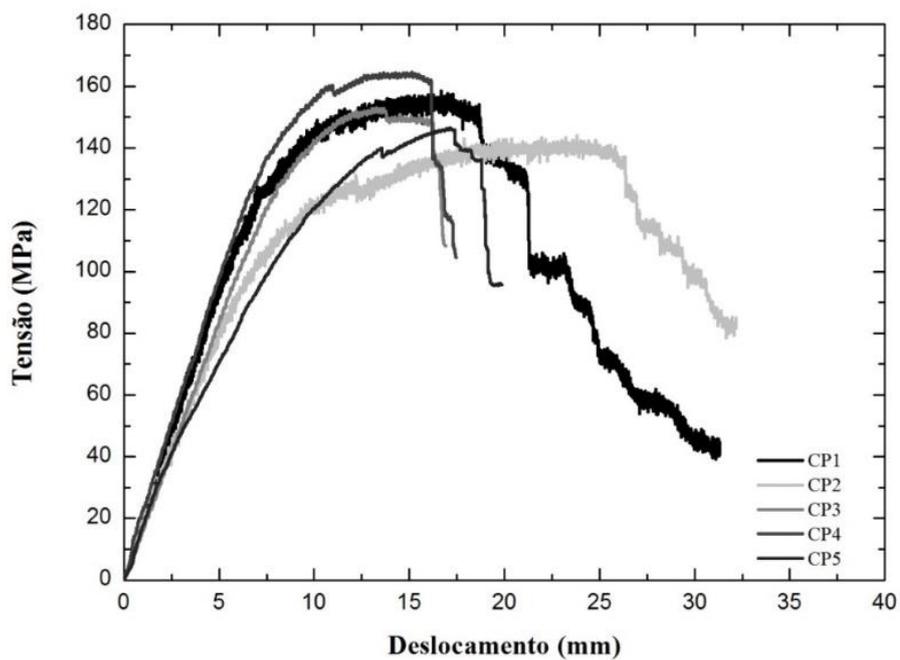


Figura 4.5- Curvas típicas ensaio de flexão das ripas de bambu sem nó

A Tabela 4.4 apresenta o valor de tensão média na flexão de 153,31 MPa e módulo de elasticidade aparente médio de 23,22 GPa para as ripas de bambu sem nó. A deflexão na ruptura atingiu 17,2 mm..

Tabela 4.4- Valores de resistência à flexão para ripas de bambu sem nó.

| CP | Tensão (MPa) | Flecha (mm) | E (GPa) |
|---------------------------------|--------------|-------------|---------|
| 1 | 158,559 | 16,673 | 10,567 |
| 2 | 143,989 | 23,795 | 6,723 |
| 3 | 152,996 | 13,259 | 12,821 |
| 4 | 164,443 | 15,113 | 12,090 |
| 5 | 146,572 | 17,149 | 9,497 |
| Média | 153,312 | 17,198 | 10,340 |
| Coefficiente de Variação (%) | 5,49 | - | 23,22 |

A Figura 4.6 apresenta o modo de ruptura das ripas submetidas a ensaio de flexão de três pontos.

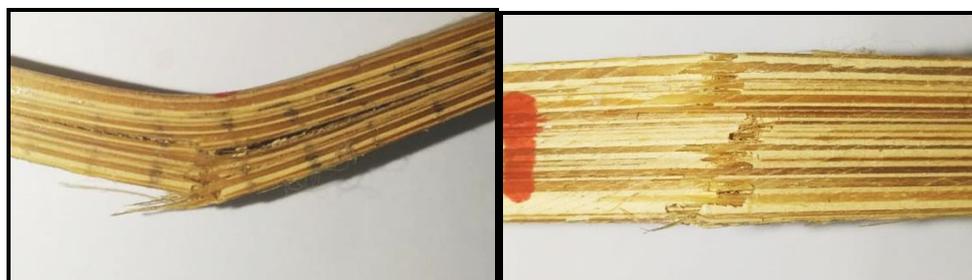


Figura 4.6- Modo de ruptura das ripas sem nó submetidas a cargas de flexão.

Chen (2019), afirma que o comportamento na flexão do bambu é atribuído a distribuição dos feixes de fibras ao longo da altura da peça. Durante o processo de flexão a fissura é iniciada nas fibras mais externas, submetidas ao maior esforço de tração. Para o autor os feixes de fibras desempenham um papel importante já que restringem a propagação da fissura e retardam a fratura como se pode observar nas curvas carga x deflexão mostradas na Figura 4.6 e no modo de ruptura da Figura 4.6.

4.2 Agregado de bambu

4.2.1 Ensaio de extrativos

A Figura 4.7 apresenta a variação da coloração das águas para os ciclos de lavagem aplicados e os extrativos obtidos após a secagem da água. Segundo Da Glória e Toledo Filho (2016), a mudança na tonalidade da cor das águas é justificada pela remoção dos extrativos após cada lavagem.



Figura 4.7- Concentração de extrativos após os ciclos de lavagem.

A curva apresentada na Figura 4.8 aponta que o primeiro ciclo de lavagem remove aproximadamente 80% dos extrativos presentes no agregado de bambu, uma quantidade significativa. Desse modo, os agregados utilizados nesta pesquisa foram lavados uma vez antes de ser utilizado na produção do bioconcreto, reduzindo inclusive a quantidade de água que seria empregada nesta etapa do processo caso fosse necessário realizar os cinco ciclos de lavagem.

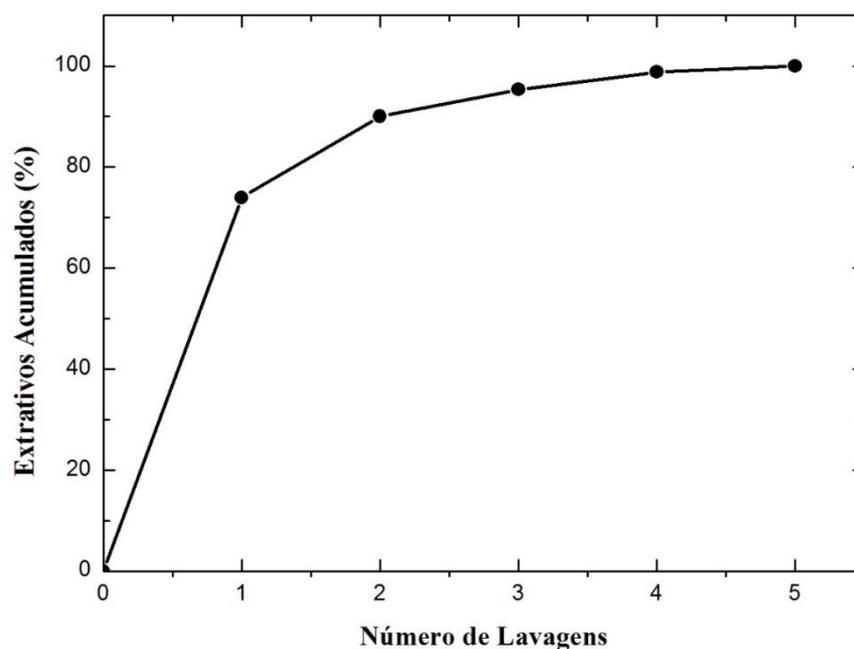


Figura 4.8- Curva de extrativos acumulados x número de lavagens.

4.2.2 Morfologia - AIMS

A Tabela 4.5, apresenta os valores médios de índice de angularidade e forma 2D encontrados para cada peneira analisada e um resultado geral. O resultados médios encontrados de 4016,2 para o índice de angularidade e de 11,71 para a forma 2D, classifica o agregado de bambu utilizado nesta pesquisa como um agregado sub-angular e alongado.

Tabela 4.5- Valores médios das análises de angularidade e forma 2D.

| Peneiras (mm) | Angularidade | Forma 2D |
|----------------------|---------------------|-----------------|
| 2,36 | 3711,0 | 16,5 |
| 1,18 | 3684,3 | 16,5 |
| 0,60 | 4519,3 | 11,3 |
| 0,30 | 4879,4 | 11,6 |
| 0,150 | 3892,4 | 10,3 |
| 0,075 | 2814,4 | 9,2 |
| Média | 4016,2 | 11,71 |

A Figura 4.9 nas curvas de distribuição cumulativas para os índices descritos, o gráfico de índice de angularidade mostra que os agregados retidos nas peneiras de 0,075 e 0,15 mm apresentam índices de angularidade menores e observando a Figura 4.10 para estas frações, esses agregados visivelmente apresentam forma mais arredondada em relação às demais frações. De acordo com Al Rousan (2005) são classificados como sub-arredondado. No gráfico da forma 2D, a curvas das peneiras de 2,36 e 1,18 mm estão mais deslocadas que as demais, apresentando o maior índice de angularidade frente aos demais. A classificação para os agregados de bambu desta fração é a forma alongada que também na Figura 4.10 é perceptível esta classificação.

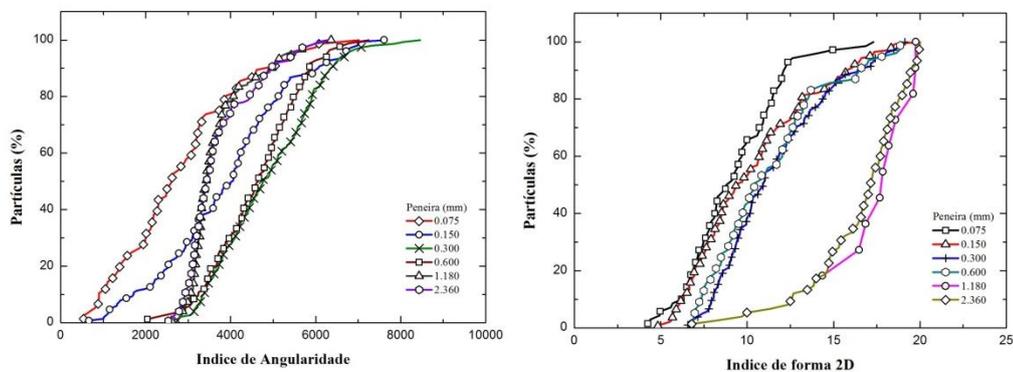


Figura 4.9- Curvas de distribuição para o agregado de bambu.

Na Figura 4.10 estão ilustradas as imagens obtidas através do equipamento. Analisando o comprimento e a largura dos agregados através do *Image J* para cada fração, realizou-se uma relação entre essas dimensões, conforme Tabela 15.

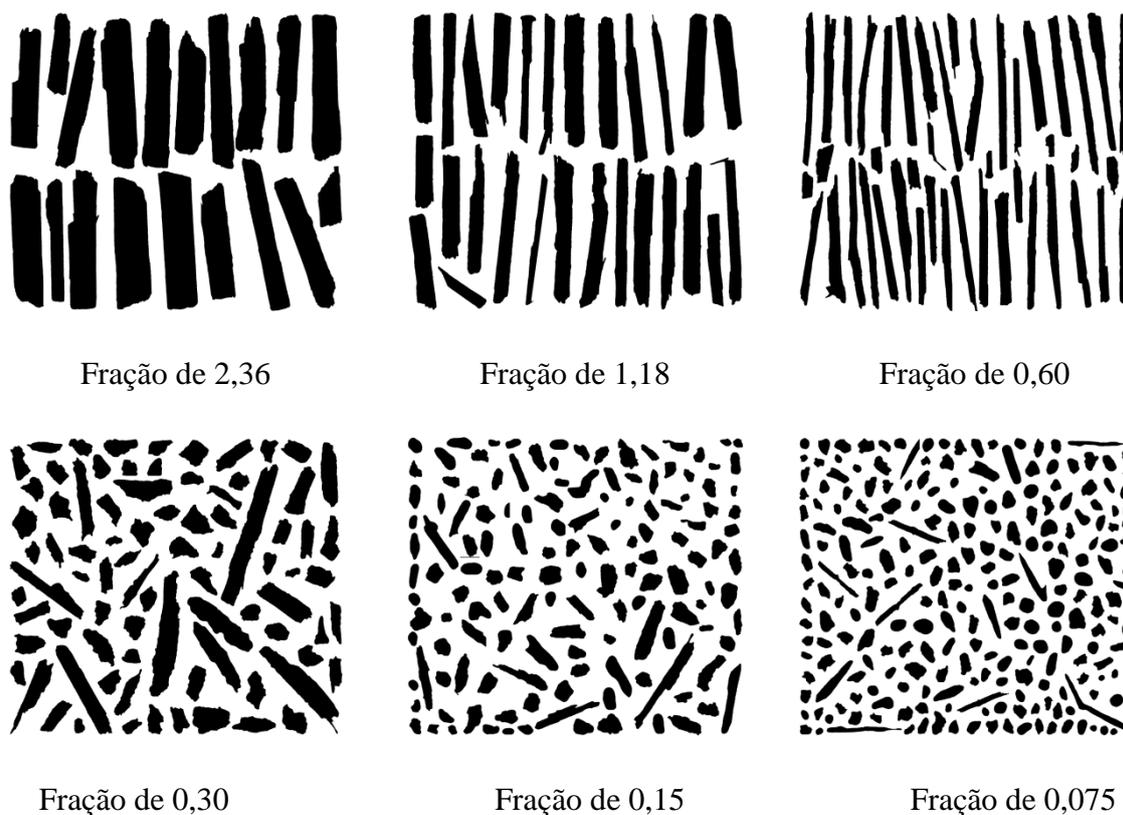


Figura 4.10- Morfologia dos agregados de bambu.

Analisando os resultados obtidos na Tabela 4.6, os agregados variam no comprimento de 9,98 mm a 0,10 mm e na largura de 1,90 mm a 0,05 mm. Na relação comprimento largura os agregados da fração 0,60 apresentam um comprimento 10,96 vezes maior que a largura. Com todas as análises realizadas do agregado de bambu aplicado nesta pesquisa percebemos que há uma variabilidade entre as partículas.

Tabela 4.6- Dimensões dos agregados de bambu.

| Fração | Comprimento (mm) | Largura (mm) | Comprimento/Largura |
|---------------|-----------------------------|---------------------|----------------------------|
| 2,36 | 9,98 | 1,90 | 5,26 |
| 1,18 | 9,52 | 1,11 | 8,5 |
| 0,60 | 8,42 | 0,76 | 10,96 |
| 0,30 | 0,57 | 0,23 | 2,49 |
| 0,15 | 0,18 | 0,08 | 2,07 |
| 0,075 | 0,10 | 0,05 | 1,87 |

4.2.3 Massa específica, absorção de água e teor de umidade

Os valores de massa específica e massa específica aparente apresentados na Tabela 4.7 foram determinados pela NBR 52/2009. Para determinação do teor de umidade utilizou-se a NBR 52/2009 e a absorção de água foi determinada na condição de mistura. Em relação aos resultados obtidos por Andreola (2017), ocorrem mudanças nos valores neste trabalho, porém destaca-se que além das espécies serem diferentes os locais de cultivo são distintos. Esta é uma questão importante quando se emprega bioagregados para produção de bioconcretos, a caracterização física sempre precisa ser realizada para que ocorra a dosagem correta para aquele tipo de biomassa.

Tabela 4.7- Valores de massa específica, absorção de água e teor de umidade obtidos para o agregado de bambu.

| Massa específica (g/cm³) | Massa específica aparente (g/cm³) | Absorção de água % | Teor de umidade % |
|--|---|-------------------------------|------------------------------|
| 0,91 | 0,53 | 82 | 10,18 |

4.3 Bioconcreto de bambu

4.3.1 Cimento, metacaulinita e cinza volante

A composição química e densidade dos materiais cimentícios utilizados nesta pesquisa estão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8- Composição química e densidade dos matérias cimentícios.

| Elementos químicos | Cimento | Metacaulinita | Cinza volante |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| CaO | 72,638 % | - | 2,290 % |
| SiO ₂ | 13,224 % | 41,858 % | 50,963 % |
| Al ₂ O ₃ | 4,904 % | 48,606 % | 34,194 % |
| Fe ₂ O ₃ | 3,876 % | 5,894 % | 5,333 % |
| SO ₃ | 3,355 % | 1,259 % | 1,593 % |
| K ₂ O | 1,075 % | 0,589 % | 3,521 % |
| SrO | 0,484 % | - | 0,024 % |
| TiO ₂ | 0,298 % | 1,021 % | 1,240 % |
| MnO | 0,146 % | 0,114 % | 0,046 % |
| BaO | - | 0,402 % | 0,594 % |
| ZrO ₂ | - | 0,194 % | 0,111 % |
| NbO | - | 0,038 % | 0,006 % |
| ZnO | - | 0,016 % | 0,045 % |
| Ga ₂ O ₃ | - | 0,009 % | - |
| Rb ₂ O | - | - | 0,028 % |
| Y ₂ O ₃ | - | - | 0,012 % |
| Densidade | 3,09 g/cm³ | 2,51 g/cm³ | 1,89 g/cm³ |

A Figura 4.11 exibe a curva granulométrica do cimento, metacaulinita e cinza volante.

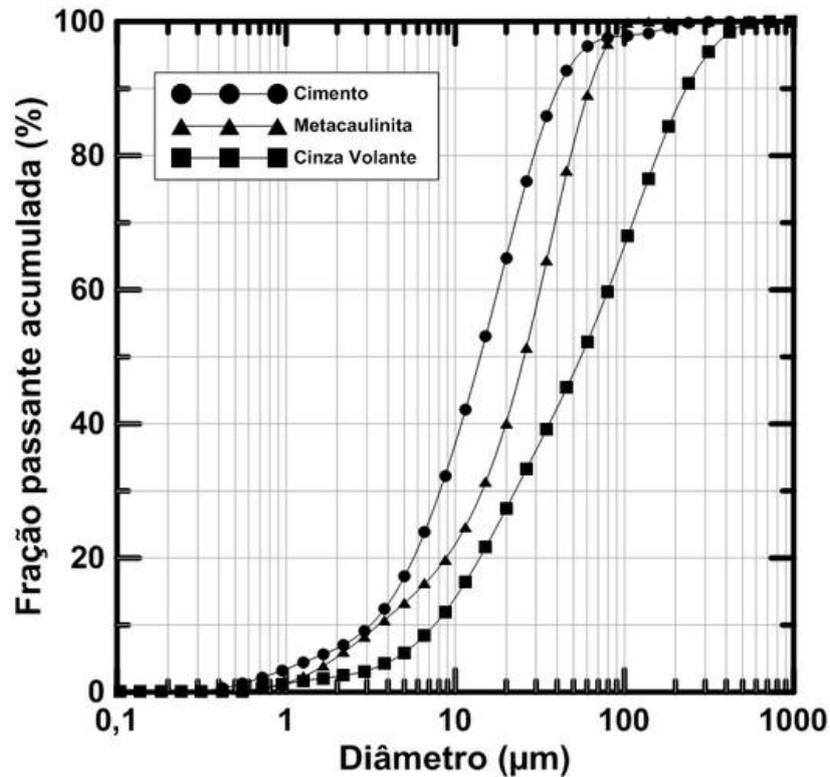


Figura 4.11- Curvas granulométricas dos materiais cimentícios.

4.3.2 Espalhamento e densidade

A Figura 4.12 mostra os espalhamentos obtidos cujos valores foram 250, 240 e 200 mm para os bioconcretos com teores de 25, 35 e 45% de bioagregado respectivamente. A mistura que obteve o menor espalhamento foi a que possui a maior quantidade de bioagregado, pois a quantidade de pasta cimentícia neste caso é menor que nos outros teores. Deve-se ressaltar, no entanto, que a trabalhabilidade das misturas foi suficientemente boa para a moldagem das amostras e dos tirantes.

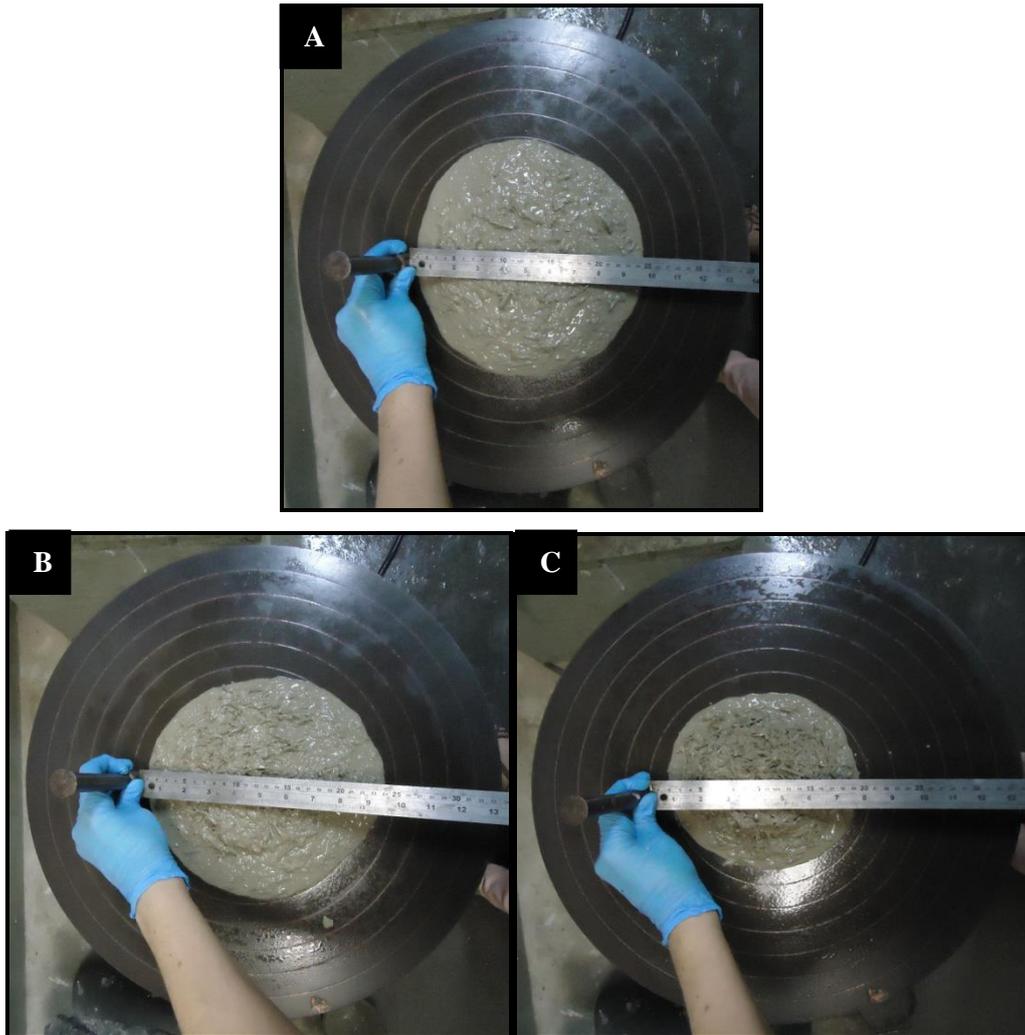


Figura 4.12- Espalhamentos obtidos para as misturas realizadas: A) 25% de bambu; B) 35% de bambu; C) 45% de bambu.

Os valores das densidades dos bioconcretos produzidos estão apresentados na Tabela 4.9. A densidade dos bioconcretos produzidos variaram de 1130 kg/m³ O BCB 25% que possui o maior volume de cimento apresentou uma densidade 18% maior que o BCB 45%, com menor porcentagem de cimento. Segundo a Rilem (1978), todos os bioconcretos podem ser classificados como leves, pois apresentam uma densidade menor que 1800 kg/m³.

Tabela 4.9- Densidade dos bioconcretos.

| BCB | Densidade (kg/m ³) |
|-----|-----------------------------------|
| 25% | 1390,00 |
| 35% | 1300,01 |
| 45% | 1130,00 |

Andreola (2017) obteve, na condição saturada em cura úmida, para um bioconcreto com 45% de partículas e a/c 0,40 sem pozolonas na matriz e resíduos de bambu de espécies diferentes, uma densidade de 1190,15 kg/m³. Para o compósito cimento-madeira com 45% de serragem e a/c de 0,40 entretanto Da Gloria (2015) obteve uma densidade de 1250 kg/m³.

Estudo do tipo de cura

Os bioconcretos contendo 25, 35 e 45% de biomassa foram submetidos à cura seca e úmida, para analisar a influência destes processos de cura na resistência à compressão.

A Figura 4.13 ilustra as curvas obtidas nesta análise, para a idade de 28 dias.

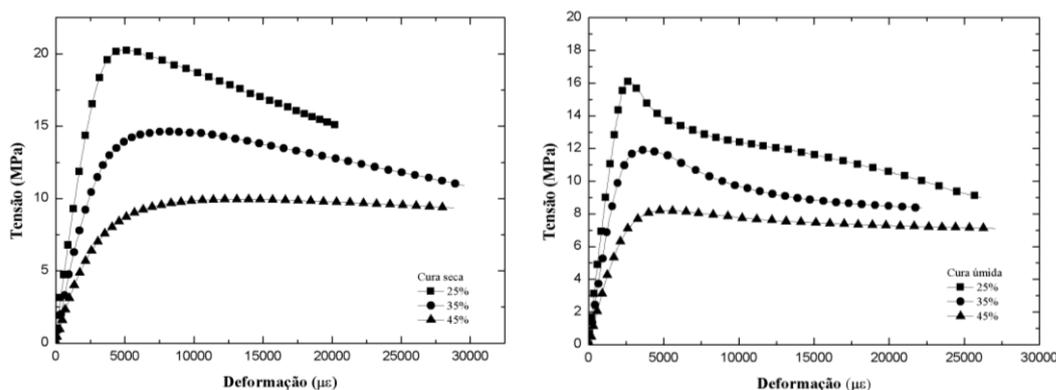


Figura 4.13- Curvas tensão x deformação dos bioconcretos em cura seca e úmida após 28 dias de cura.

Comparando os resultados de resistência a compressão dos bioconcretos em cura seca com os submetidos à cura úmida, nos BCBs de 25, 35 e 45% na condição de cura seca percebe-se um aumento de 15,2%, 20,9 % e 23, 6% respectivamente nos valores de resistência, conforme dados apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10- Valores médios de resistência à compressão de acordo com o tipo de cura aplicado.

| BCB | Tensão (MPa) | Tensão (MPa) |
|-----|--------------|--------------|
| | Cura seca | Cura úmida |
| 25% | 20,06 | 17,01 |
| 35% | 15,48 | 12,24 |
| 45% | 11,55 | 8,82 |

Os valores de aumento de resistência em cura seca podem ser justificados pelo fato de a cura interna promovida pelos bioagredados ser suficiente para promover a hidratação do cimento e pelo fato de, no momento do ensaio, após 28 dias de cura, o teor de umidade das amostras ser menor, resultando numa resistência maior do que a da amostra testada saturada.

Resistência à compressão uniaxial

Os bioconcretos foram avaliados após 7 e 28 dias de cura seca. Observando as curvas tensão x deformação para as duas idades na Figura 4.14, nota-se uma linearidade no comportamento seguido por um trecho não linear até atingir o pico de tensão. Após atingir a resistência máxima ocorre uma redução da tensão e um aumento da deformação (região pós-pico). Esse efeito é mais acentuado com o aumento do teor de biomassa na mistura.

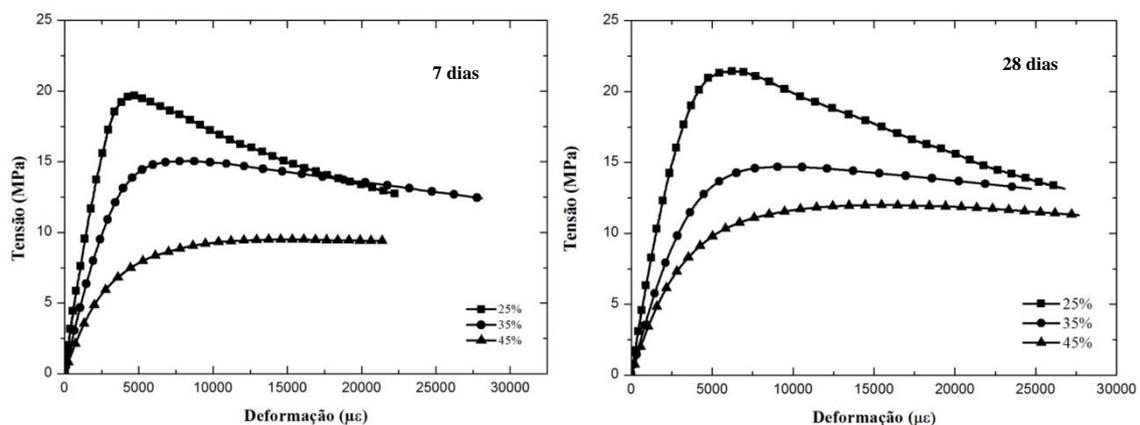


Figura 4.14- Curvas tensão x deformação aos 7 e 28 dias de idade.

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 4.11, nota-se que aos 7 dias os BCBs já apresentam 93% do valor de resistência encontrado para os 28 dias de cura. Quando analisado os valores entre os teores, o BCB de 25% possui resistência à compressão com 28 dias 33% e 55% maior que os BCBs de 35% e 45% respectivamente. Isso também se refletiu no módulo de elasticidade, que apresentaram redução de 35% e 55% para os teores de 35% e 45% em relação ao de 25%. Estes resultados mostram que quanto maior o volume de cimento e menor a quantidade de agregado de bambu, maiores são os valores de resistência a compressão e módulo de elasticidade do bioconcreto.

Andreola (2017) em sua pesquisa produziu um BCB de 45% com a/c de 0,40 sem adição de cloreto de cálcio e pozolonas em sua matriz. Para este BCB foi encontrado em 7 dias uma resistência a compressão de 3,46 MPa e em 28 dias 4,20 MPa. Estes resultados mostram que a utilização de cloreto de cálcio e das pozolonas nos bioconcretos desta pesquisa contribuíram para acelerar a pega e aumentar a resistência à compressão. Por exemplo, o BCB 45% com 28 dias de cura, apresentou um aumento de 65% em relação ao biconcreto de Andreola (2017) com o mesmo volume de agregado de bambu.

Tabela 4.11- Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 7 e 28 dias de idade, com coeficiente de variação em %.

| Bioconcreto | Tensão (MPa) | E (GPa) | Tensão (MPa) | E (GPa) |
|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | 7 dias | 7 dias | 28 dias | 28 dias |
| BCB25% | 20,03(2,32) | 6,61(1,84) | 21,05 (4,58) | 6,75 (4,59) |
| BCB35% | 14,43 (2,92) | 4,33 (9,36) | 14,10 (4,14) | 4,38 (8,72) |
| BCB45% | 9,730 (3,20) | 2,53 (4,14) | 12,30 (3,27) | 3,03 (3,25) |

As Figuras 4.15, 4.16, 4.17 apresentam os modos de ruptura por cisalhamento dos bioconcretos ensaiados. Note que a ruptura é mais dúctil para as misturas com maior teor de bio-agregado de bambu.



Figura 4.15- BCB 25%.



Figura 4.16-BCB 35%.



Figura 4.17- BCB 45%.

Resistência à tração direta

Avaliados sob esforços de tração direta após 28 dias de cura seca, a curva tensão x deformação apresentou o comportamento mostrado na Figura 4.18.

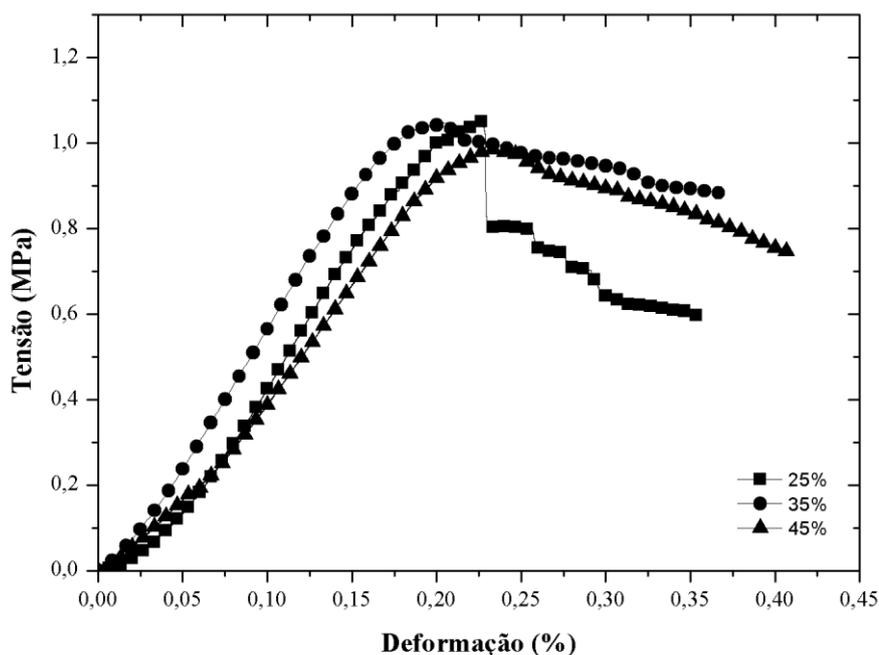


Figura 4.18- Curvas tensão x deformação na tração direta para bioconcreto de bambu.

Nas curvas são observados, para os três BCBs, que após a ruptura o comportamento apresentado é de um material dúctil, onde as partículas de bambu atuaram como reforço prolongando as deformações, principalmente para os teores de 35 e 45% de biomassa.

Analisando a Tabela 4.12 percebe-se que a resistência a tração direta foram praticamente iguais (~ 1 MPa), independente dos teores de agregado de bambu (diferença máxima de 6%). Com relação aos resultados de módulo de elasticidade, nota-se que BCB 25% apresentou o maior valor, quando comparado aos de 35% e 45%. Note que os valores de módulo de elasticidade neste ensaio estão próximos dos módulos encontrados no ensaio de compressão uniaxial.

Resultados de ensaios de tração direta obtidos por Andreola (2017) para o biconcreto de 45% de agregado, indicaram uma resistência à tração de 0,72 MPa, 27% menor que a resistência a tração do BCB 45% da presente pesquisa.

Tabela 4.12- Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade aos 28 dias de idade, com coeficiente de variação em %.

| Bioconcreto | Tensão (MPa) | Módulo de elasticidade (GPa) |
|--------------------|---------------------|-------------------------------------|
| BCB25% | 1,00 (5,4) | 5,00 (9,9) |
| BCB35% | 1,05 (9,9) | 4,00 (3,54) |
| BCB45% | 0,99 (9,4) | 2,45 (2,89) |

Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados do ensaio de tração por compressão diametral estão apresentados na Tabela 4.13. Analisando os valores encontrados, o BCB de 25% apresentou um valor de resistência a tração por compressão diametral 13,6% e 34% maior que os valores encontrados para os BCB 35% e BCB 45% respectivamente.

O modo de ruptura amostras são mostrados na Figura 4.19 e na Figura 4.20. Observando-se essas amostras é possível perceber um esmagamento do bioconcreto e isso foi mais expressivo para as amostras com maior teor de biomassa. Em função da ação da biomassa costurando a fissura os valores de carga foram mais altos devido a contribuição da região comprimida, o que pode ter resultados em maiores valores de resistência à tração indireta comparado com a tração direta para os presentes bioconcretos.

Tabela 4.13- Valores médios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade, com coeficiente de variação em %.

| Bioconcreto | Resistência a tração (MPa) |
|-------------|----------------------------|
| BCB25% | 2,20 (1,02) |
| BCB35% | 1,90 (2,43) |
| BCB45% | 1,45 (1,57) |



Figura 4.19- Modo de ruptura do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

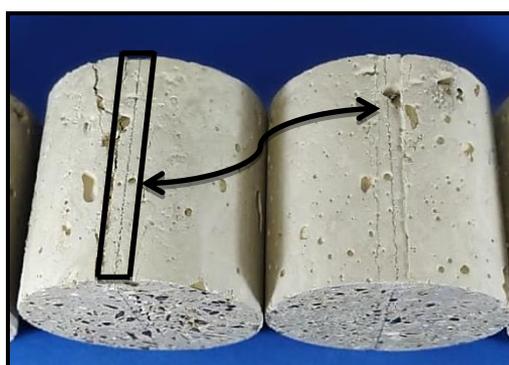


Figura 4.20- Região de esmagamento ocasionada durante a realização do ensaio.

4.4 Aderência bambu-bioconcreto

Arrancamento

Os resultados do ensaio de arrancamento estão apresentados na Tabela 4.14, enquanto as curvas típicas estão ilustradas na Figura 4.21.

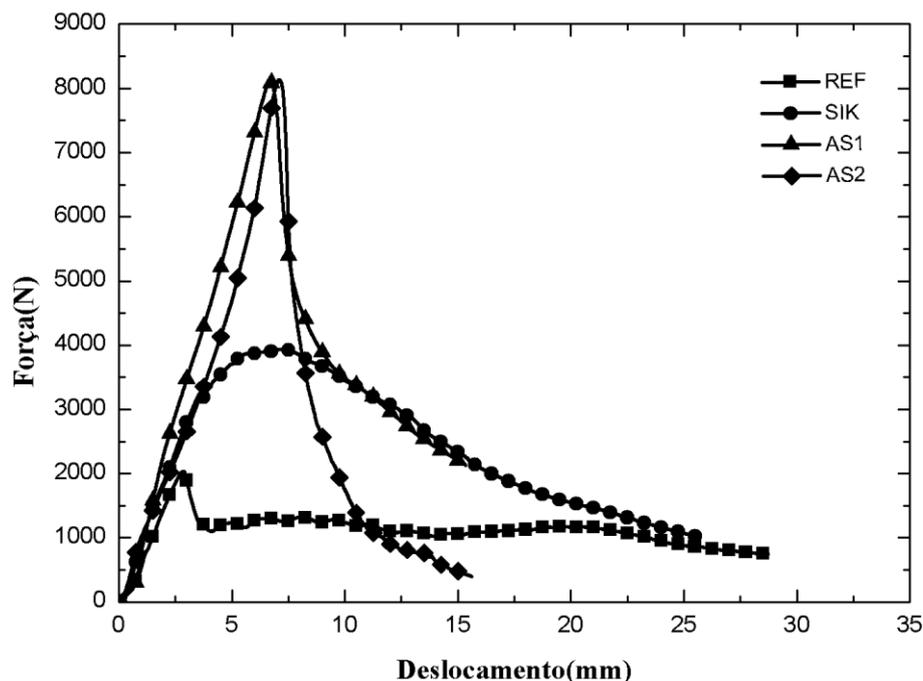


Figura 4.21- Curvas força x deslocamento do ensaio de arrancamento para os diferentes tratamentos estudados.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.14, as maiores forças de arrancamento foram observadas nos tratamentos com areia e Sikadur (AS1, AS2). O tratamento AS2 apresentou resistência de aderência média de 4,23 MPa, enquanto a tensão de aderência média do tratamento AS1 foi de 4,14 MPa, uma diferença de 2,1%.

As ripas não tratadas (REF) apresentaram uma força de arrancamento 77% menores do que as ripas revestidas com Sikadur (SIK). O revestimento com Sikadur criou uma rugosidade ao longo da superfície embebida no bioconcreto, o que explica o aumento da adesão. Quando compara-se os valores de AS1 e AS2 observa-se uma diferença de apenas 2%. A presença da areia aumentou a aderência da ripa apenas com Sikadur em

cerca de 120%, comprovando a eficiência do uso da areia. A adição de areia no Sikadur criou uma rugosidade na superfície da ripa, aumentando significativamente a aderência.

Tabela 4.14- Valores de força de arrancamento e tensão de aderência para diferentes tratamentos, com coeficiente de variação em %.

| Tipo de tratamento | Força de arrancamento (N) | Tensão de Aderência (MPa) |
|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| REF | 2129,27 (4,10) | 1,07(4,10) |
| SIK | 3984,44 (4,5) | 1,90(8,4) |
| AS1 | 8163,34 (8,19) | 4,14 (0,75) |
| AS2 | 8392,11 (5,6) | 4,23 (5,6) |

Após a tensão de pico, observou-se que a curva SIK apresenta um decréscimo gradual da carga máxima, enquanto as curvas AS1 e AS2 apresentam um descolamento abrupto, com um comportamento pós-pico mais frágil.

Após o ensaio de arrancamento, nota-se que as ripas REF e SIK possuem uma pequena quantidade de bioconcreto em suas superfícies (Figura 4.22). Nenhum dano foi observado nos orifícios criados nas amostras de bioconcreto após a retirada da ripa de bambu REF, enquanto algumas fraturas foram observadas na superfície do bioconcreto após o arrancamento das ripas tratadas por Sikadur (SIK). Portanto, o Sikadur promoveu uma fricção na superfície dos corpos-de-prova, mas não tão significativa, como as ripas tratadas com AS1 e AS2 (Figura 89).



(A)



(B)

Figura 4.22- Amostras após a realização do ensaio: A) REF; B) SIK.

Uma vez arrancadas do bioconcreto, nas ripas de bambu AS1 e AS2 foi observado que o sikadur e a areia ficaram empregados nas ripas de bambu como ilustra a Figura 4.23.



(A)



(B)

Figura 4.23- Amostras após a realização do ensaio: A) AS1; B) AS2.

Como o AS2 foi o tratamento que proporcionou maior resistência de aderência, foi o tratamento escolhido para ser utilizado nas ripas moldadas com o BCB35% e o BCB 45%.

As curvas da Figura 4.24 mostram as curvas típicas de arrancamento versus de deslocamento obtidas.

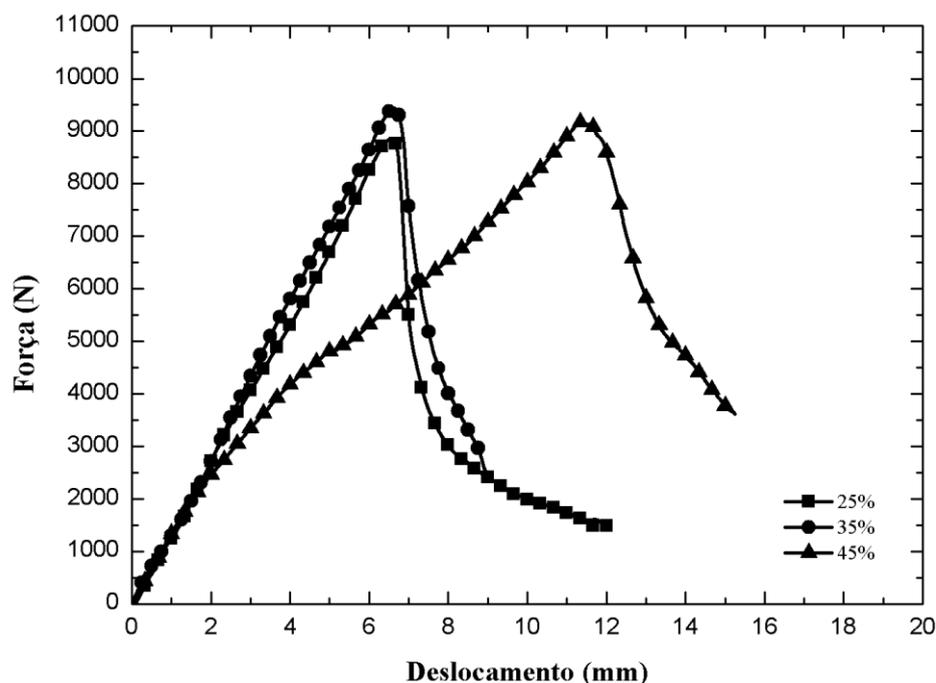


Figura 4.24- Curva força x deslocamento do ensaio de arrancamento com ripas tratadas e bioconcreto de diferentes misturas.

Analisando as ripas de bambu tratadas AS2 nas misturas de 25%, 35% e 45%, percebe-se que não há alteração na tensão de aderência para as diferentes frações volumétricas de agregados de bambu. De acordo com os resultados da Tabela 4.15, os valores de tensão de aderência são bastante próximas, com acréscimo de 7% para a mistura com 35% de biomassa e de 5% para a mistura contendo 45% de biomassa.

Tabela 4.15- Valores de força de arrancamento e tensão de aderência para diferentes bioconcretos e ripas tratadas, com coeficiente de variação em %.

| Bioconcreto | Força de Arrancamento (N) | Tensão de Aderência(MPa) |
|-------------|---------------------------|--------------------------|
| BCB 25% | 8636,11 (3,55) | 4,36 (3,55) |
| BCB 35% | 9433,43 (0,13) | 4,67 (3,99) |
| BCB 45% | 9058,74 (1,77) | 4,57(1,77) |

Ensaio de tirante

Partindo do princípio que o corpo-de-prova de tirante se comporta como um compósito, onde a matriz é o bioconcreto de bambu e o reforço à única ripa de bambu, a primeira etapa foi a caracterização do reforço exatamente da maneira que ele é empregado no corpo-de-prova do tirante.

A Figura 4.25 apresenta a curva típica da ripa de bambu com dois nós, tratadas com Sikadur e areia, que foi o tratamento escolhido baseado nos resultados encontrados nos ensaios de arrancamento. A ripa quando submetida à tração apresentou um comportamento linear, em conformidade com os resultados obtidos na caracterização das ripas de 25 cm apresentadas no item 4.1.2 deste trabalho, apresentando uma tensão média de 157,87 MPa e um módulo de elasticidade médio de 12,71 GPa.

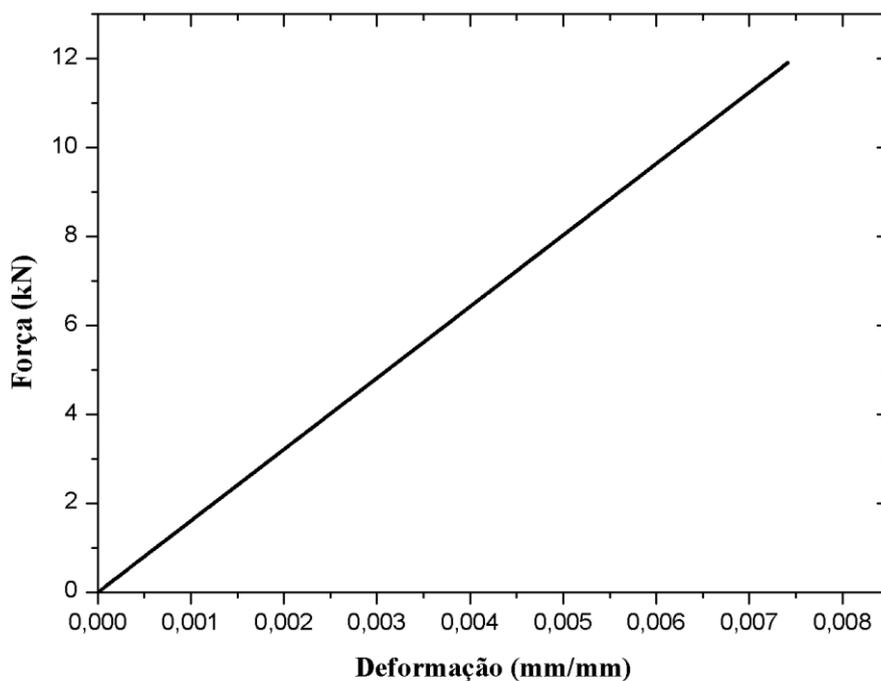


Figura 4.25- Curva típica força x deformação para ripa de bambu tratada.

Para a análise dos resultados encontrados é importante compreender o comportamento do conjunto reforço-matriz quando submetido ao ensaio de tirante. Analisando o comportamento característico de um tirante de concreto quando submetido aos esforços de tração, descrito na Figura 2.21 deste trabalho, nota-se que até o surgimento da primeira fissura o comportamento é definido pela ação conjunta matriz-reforço

(compósito com aderência perfeita). As tensões são constantes ao longo de todo o tirante durante este início e esta fase é classificada como elástica. Quando há o surgimento da primeira fissura da matriz inicia-se a fase de múltipla fissuração até a formação da última fissura. Enquanto o processo de múltipla fissuração o módulo de elasticidade da matriz diminui gradativamente até que a matriz para de contribuir de forma significativa e o reforço passa a suportar as cargas de tração.

Para o compósito bioconcreto-ripa de bambu, a Figura 4.26 ilustra o esquema do comportamento encontrado quando submetido ao ensaio de tirante.

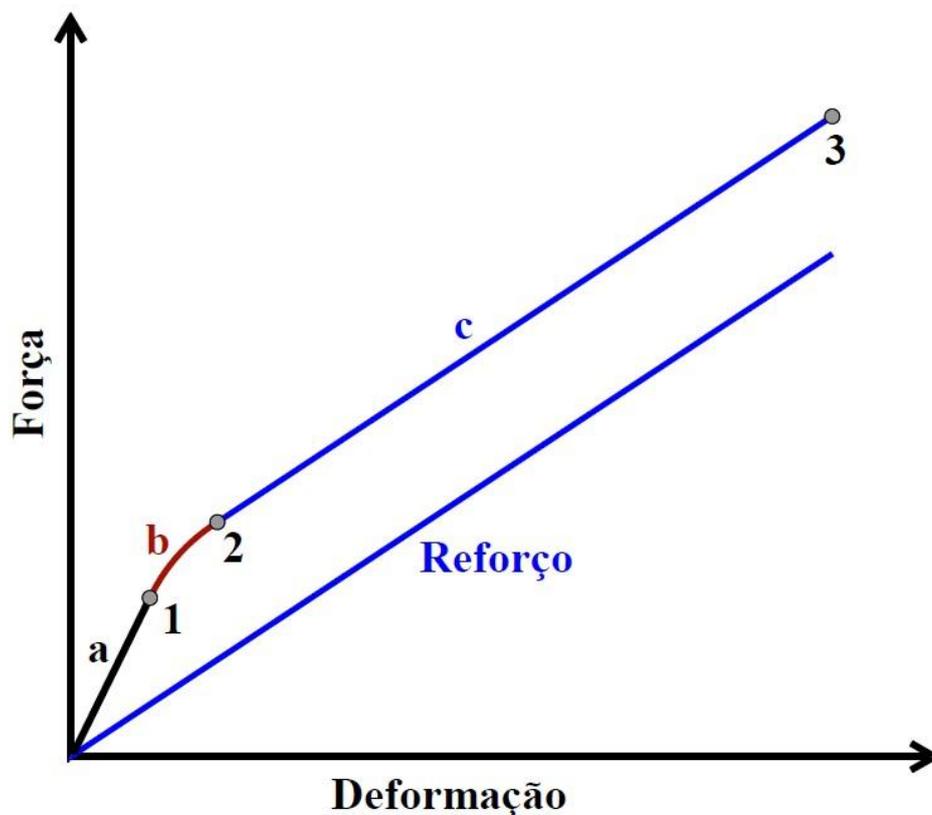


Figura 4.26- Comportamento do tirante de bioconcreto reforçado com bambu.

No esquema da Figura 4.26, na parte (a) temos a fase elástica onde a matriz de bioconcreto e a ripa trabalham em conjunto. De acordo com a regra das misturas o módulo de elasticidade do tirante nesta região é:

$$E_t = E_m V_m + E_r V_r$$

E_t : módulo de elasticidade do tirante;

E_m : módulo de elasticidade da matriz;

V_m : volume da matriz;

E_r : módulo de elasticidade do reforço;

V_r : volume do reforço;

O ponto (1) é o momento onde percebe-se uma mudança na inclinação da curva com o surgimento da primeira fissura. Na fase (b) nota-se um processo de formação de múltiplas fissuras com aumento gradual da tensão. A presença de partículas de bambu no bioconcreto ajuda a controlar a propagação de microfissuras impedindo sua visibilidade tanto no gráfico quanto no corpo-de-prova durante esta fase do ensaio. Se tratando da rigidez, há uma diminuição gradativa até o ponto (2), onde a matriz deixa de contribuir e o reforço rege o comportamento da curva exibindo a mesma inclinação.

Os valores encontrados na fase elástica estão descritos na Tabela 4.16. Os resultados de força de primeira fissura variaram entre 1,06 e 1,59 kN, a resistência de primeira fissura de 0,43 a 0,63MPa e o módulo de elasticidade pré-fissuração de 2,15 a 2,43 GPa.

Como os módulos de elasticidade pré-fissuração foram similares, pode-se deduzir que a contribuição da matriz foi a mesma independente dos teores de bioagregados. Baseado na regra da mistura, o valor experimental da rigidez da matriz solicitada foi de $E_m = 2,12$ GPa, ou seja inferior aos módulos encontrados para os bioconcretos de 25% e 35% e similar ao de 45%.

Tabela 4.16- Resultados do ensaio de tirantes até o surgimento da primeira fissura. Coeficiente de variação entre parênteses em %.

| Tirante | Força de primeira fissura (kN) | Resistência de primeira fissura (MPa) | Módulo de Elasticidade pré fissuração (GPa) | Módulo de Elasticidade teórico esperado (MPa) |
|---------|--------------------------------|---------------------------------------|---|---|
| TIR 25% | 1,06 (8,59) | 0,43 (8,59) | 2,15 (2,12) | 6,78 |
| TIR 35% | 1,59 (9,30) | 0,63 (9,02) | 2,40 (7,21) | 4,57 |
| TIR 45% | 1,30 (4,56) | 0,52 (7,71) | 2,43 (9,49) | 2,82 |

Quando o reforço rege o comportamento do tirante, nota-se na Tabela 4.17 que o módulo de elasticidade pós-fissuração nos três traços se assemelha ao módulo de elasticidade do bambu quando ensaiado isoladamente, evidenciando a não contribuição da matriz nesta fase. Quando a ripa de bambu chega a seu limite de suportar as cargas de tração, há uma ruptura total da ripa em um dos nós presentes nas extremidades do tirante.

Tabela 4.17- Resultados do ensaio de tirantes após a múltipla fissuração. Coeficiente de variação entre parênteses em %.

| BCB | Módulo de Elasticidade pós-fissuração (GPa) | Força de ruptura (kN) |
|------------|--|------------------------------|
| 25% | 13,23 (5,42) | 11,06 (6,14) |
| 35% | 11,20 (7,58) | 12,12 (4,32) |
| 45% | 12,80 (2,88) | 12,29 (5,1) |

Nas curvas apresentadas na Figura 4.27, é possível observar que na fase elástica os comportamentos são semelhantes, assim como no momento de múltipla fissuração e no pós-fissuração.

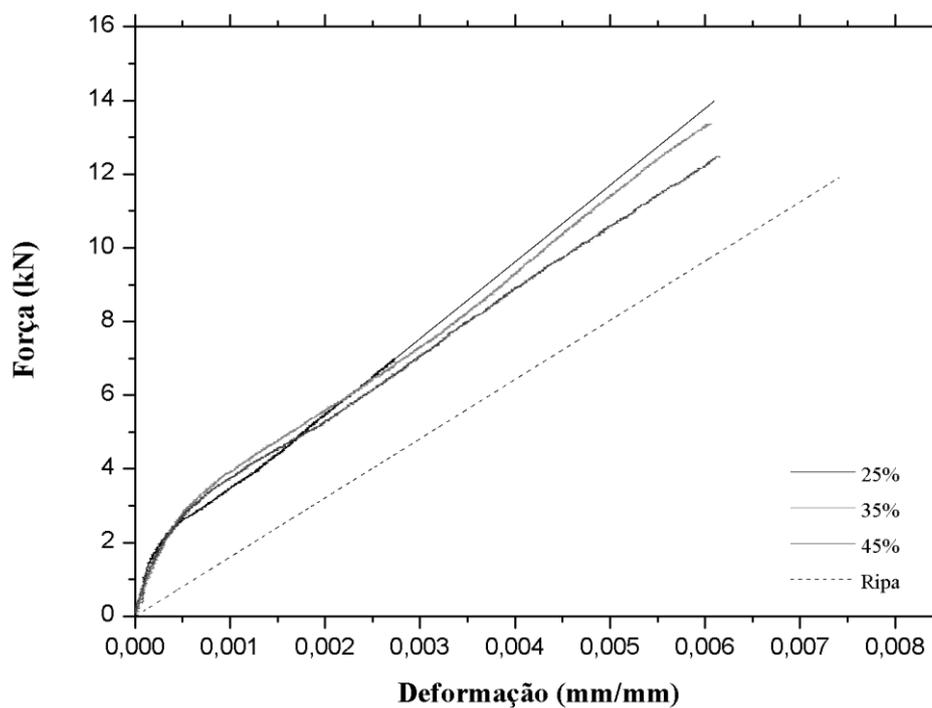
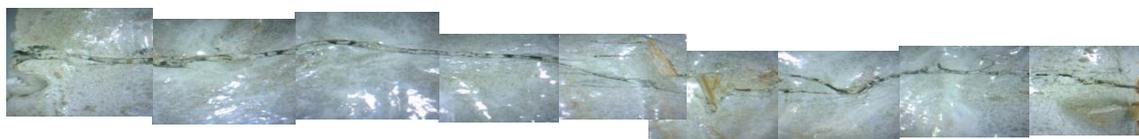


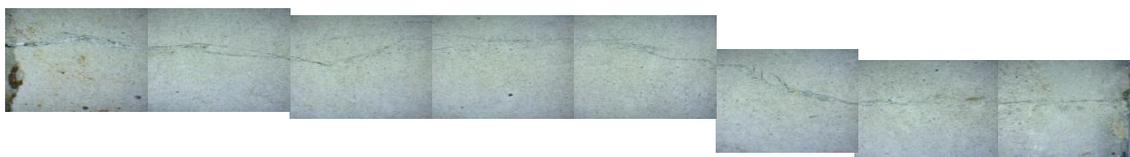
Figura 4.27- Curvas força x deformação resultante do ensaio de tirante.

As fissuras que surgiram nos tirantes estão distribuídas nas quatro faces e em todos os teores foram observadas fissuras semelhantes. A Figura 4.28 apresenta as fissuras típicas encontradas nos tirantes. Visivelmente observou-se que na Face 1 as fissuras eram mais abertas que nas outras faces. Nas Faces 2, 3 e 4 as fissuras formadas apresentaram aberturas pequenas.

Face 1



Face 2



Face 3



Face 4

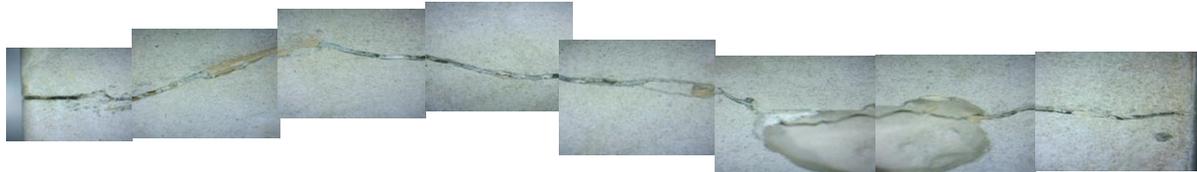


Figura 4.28- Fissuras típicas apresentadas nos tirantes.

A configuração final das fissuras nas quatro faces dos tirantes está apresentada nas imagens abaixo (Figuras 4.29, 4.30 e 4.31), onde a numeração é a identificação da fissura e não a ordem de surgimento. Nestas figuras, observa-se a múltipla fissuração, dos tirantes. A relação entre o espaçamento e o volume de agregado de bambu não variou expressivamente para os volumes de biomassa utilizados.

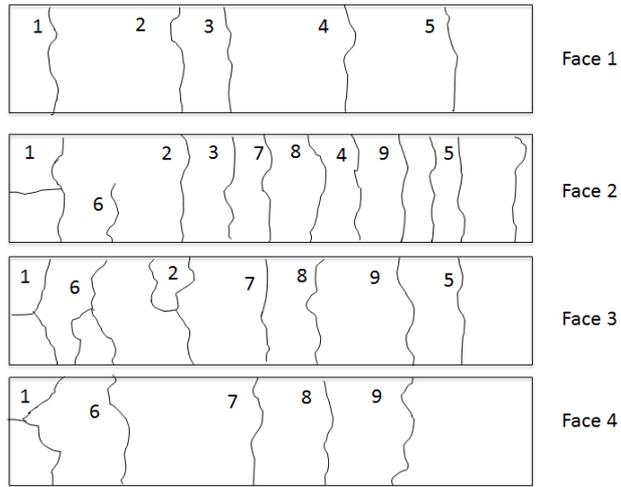


Figura 4.29- Configuração final das fissuras no tirante com 25% de agregado de bambu.

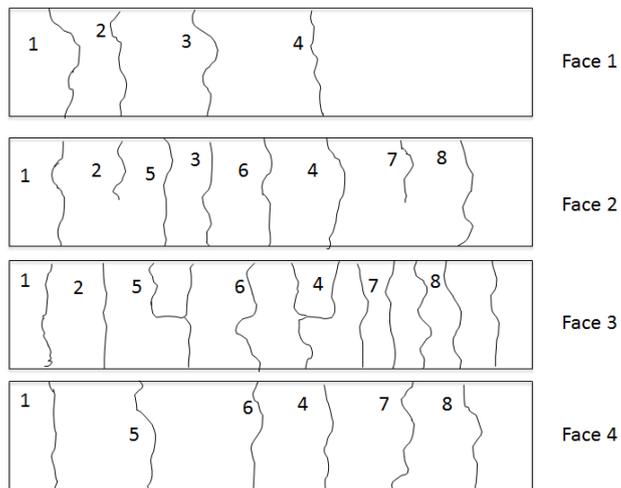


Figura 4.30- Configuração final das fissuras no tirante com 35% de agregado de bambu.

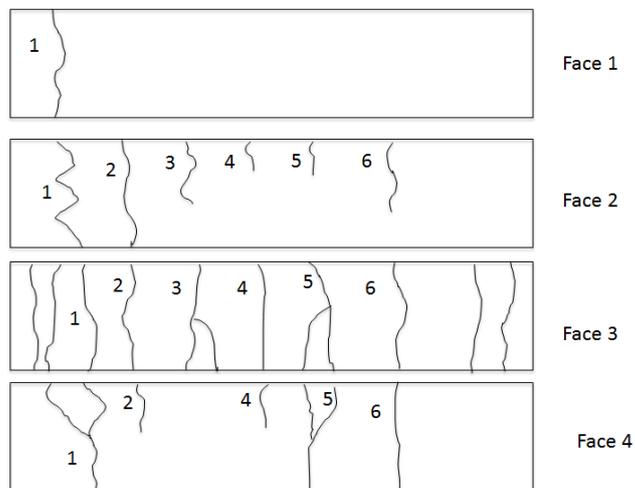


Figura 4.31- Configuração final das fissuras no tirante com 45% de agregado de bambu.

A análise do espaçamento de fissuras foi realizada como detalhado no item 3.5.2- Ensaio de Tirante. Os valores apresentados na Tabela 4.18 apresentam o espaçamento médio encontrado, o coeficiente de conformação superficial adaptado da NBR 7477 e a tensão de aderência adaptada da NBR 6118.

Tabela 4.18- Coeficiente de conformação superficial e tensão de aderência.

| Tirante | Espaçamento médio entre fissuras (mm) | Coeficiente de conformação superficial | Tensão de Aderência (MPa) |
|----------------|--|---|----------------------------------|
| 25% | 37,37 | 3,01 | 3,01 |
| 35% | 37,41 | 3,00 | 3,15 |
| 45% | 39,69 | 2,83 | 2,80 |

Foram obtidos valores de coeficiente de conformação de 3,01 a 2,83 para os tirantes ensaiados. Este coeficiente está relacionado a caracterização da aderência da ripa de bambu com o bioconcreto, indicando que os com 25% e 35% os valores foram semelhantes e para 45% ocorreu uma redução de 5, 6%. Para os valores de tensão de aderência, o tirante 35% apresentou a maior tensão de aderência 11, 11% maior que o tirante de 45%.

As Figuras 4.32, 4.33 e 4.34, apresenta as fissuras na Face 1 dos tirantes referente a cada teor de agregado de bambu.

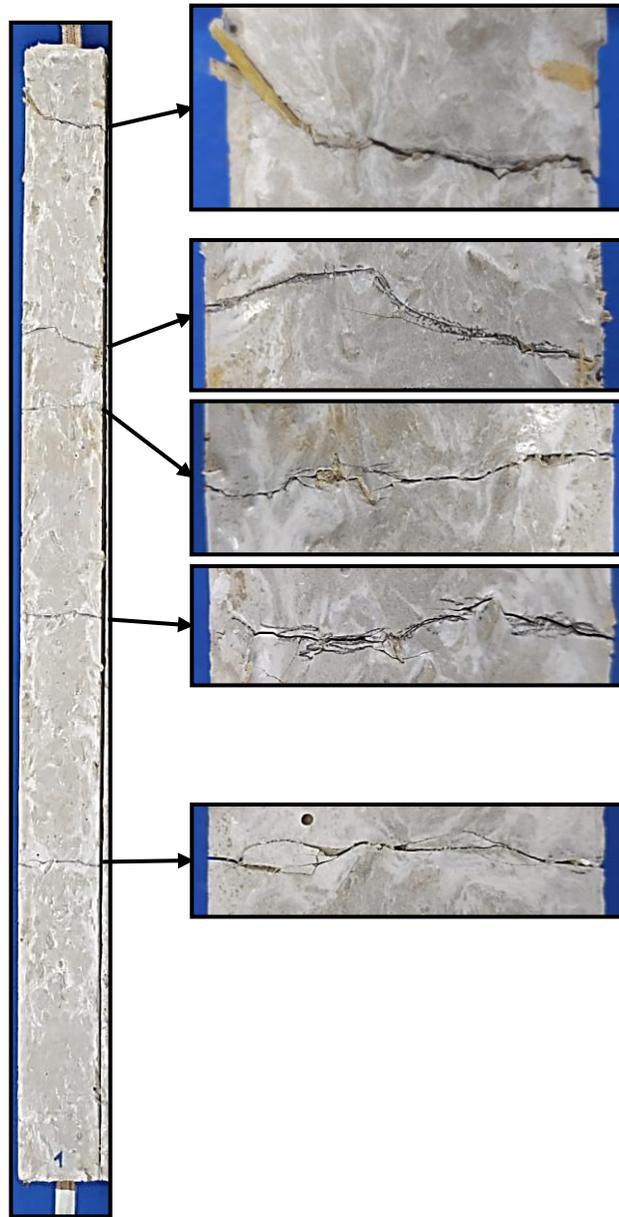


Figura 4.32- Fissuras apresentadas no tirante após ensaio: 25%.

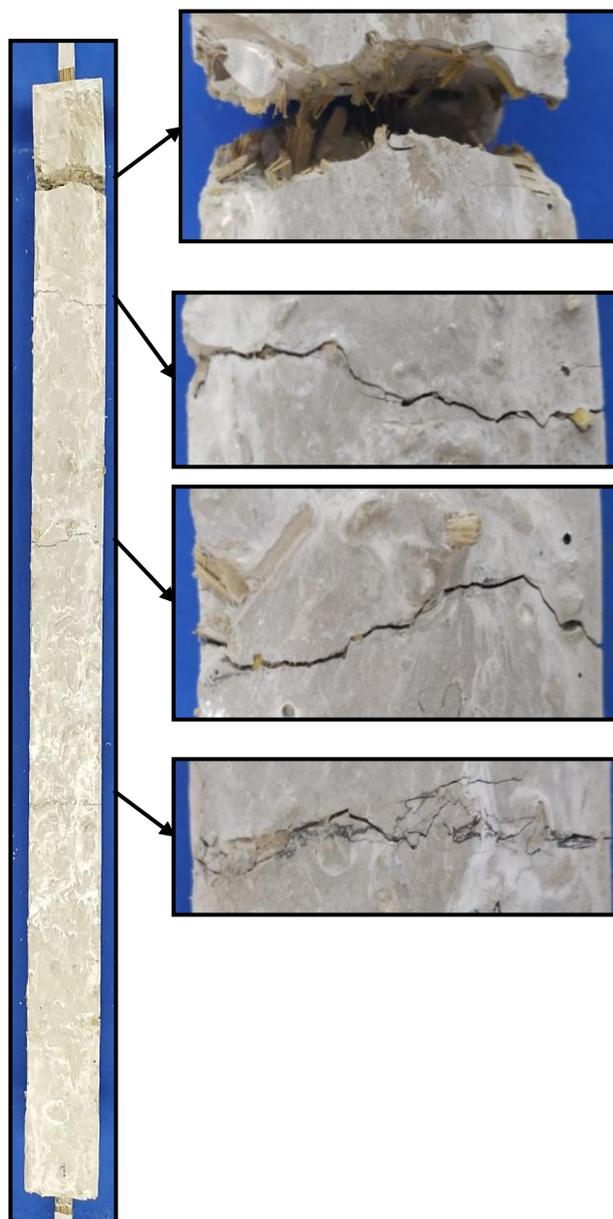


Figura 4.33- Fissuras apresentadas no tirante após ensaio: 35%



Figura 4.34- Fissuras apresentadas nos tirantes após ensaio: 45%.

Analisando os resultados do ensaio de tirante observa-se que na fase elástica a matriz e o reforço trabalham juntos. Na fase de fissuração, as múltiplas fissuras observadas visivelmente ocorreram com aumento gradual da tensão. As partículas de bambu presentes na matriz possuem uma capacidade de transferência de tensões, controlando as aberturas de fissuras e dando a curva um comportamento não linear na fase de múltipla-fissuração. Na fase pós- fissuração as curvas apresentam a mesma inclinação da ripa de bambu, logo apresentando o mesmo módulo que as ripas de bambu com nó.

CAPÍTULO 5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa podemos concluir que:

As ripas de bambu podem ser aplicadas como reforço, porém é importante ressaltar que a presença do nó interfere nas respostas mecânicas diminuindo em até 39% sua rigidez.

Para utilização do bambu como reforço em uma matriz cimentícia para fins estruturais é necessário garantir a aderência entre ambos e os tratamentos de revestimento contribuem neste quesito. As ripas tratadas com Sikadur e areia em relação à matriz de bioconcreto aumentou a tensão de aderência em até quatro vezes em relação aos resultados encontrados para as ripas sem tratamento.

A variação das frações volumétricas de bioagregado de bambu não interferiu na aderência. Para os três bioconcretos produzidos e analisados na pesquisa obteve-se a mesma tensão de aderência no ensaio de arrancamento e o comportamento das curvas do ensaio de tirante foram iguais enquanto a matriz e o reforço trabalhavam juntos.

O tirante bioconcreto de bambu e ripa de bambu se comporta como um compósito, no qual a matriz é o bioconcreto e o reforço a ripa de bambu. Portanto foi possível criar um esquema próprio para este compósito, já que o comportamento da curva não é igual ao do concreto e do aço. Para os três tipos de tirantes foram identificados às três fases (pré-fissuração, múltipla fissuração e pós-fissuração). Antes da fissuração, na fase elástica, a fração volumétrica de bioagregado de bambu não interferiu expressivamente na contribuição da matriz. Na fase de fissuração houve abertura de fissuras para todos os bioconcretos, foi possível perceber que a uma face do tirante apresentou uma maior quantidade de fissuras que nas outras e que o aumento da tensão nesta região é gradual e na fase pós-fissuração a curva acompanha a inclinação do reforço.

O espaçamento médio entre fissuras foram similares assim como o coeficiente de conformação superficial, indicando que para teores diferentes de bioagregado de bambu não ocorrem mudanças expressivas.

De forma geral, conclui-se que pode-se combinar ripa de bambu reforçando bioconcretos de bambu visando uma aplicação de estruturas leves e sustentáveis.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento desta pesquisa surgiram algumas proposições para futuras pesquisas, como:

- Realizar o ensaio de arrancamento com as ripas tratadas com areia e Sikadur em uma matriz de bioconcreto com teores maiores que 45% de agregado de bambu, com o intuito de analisar se haverá variação de tensão de aderência.
- Produzir painéis de bioconcreto de bambu reforçados com as ripas tratadas com areia e Sikadur e caracterizá-los :
 1. Mecanicamente, com o objetivo de compreender a utilização destes painéis em estruturas;
 2. Estudar a intemperização natural e aceleração;
 3. Durabilidade biológica;
 4. Durabilidade a ação do fogo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACFA - ENCUENTRO NACIONAL DE FACULTADES DE ARQUITECTURA SUSTENTABLE. De los bahareques patrimoniales al bahareque encementado contemporáneo: arquitecturas sustentables en el paisaje cultural cafetero de Colombia.– Sede Manizales, Colômbia, 2005.

AHMAD, M. Analysis of calcutta bamboo for structural composite materials. Dissertation, Wood Sci. and Forest Products, VT. pp. 210, 2000.

AL ROUSAN, T.M. Characterization of aggregate shape properties using a computer automed system. Tese de Doutorado, Texas AM University, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-3039. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. [S.l.]. 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-3410. Standard Test Method for Compressive Properties Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading. [S.l.]. 2008.

ANDREOLA, V.M; DA GLORIA, M.Y; SANTOS, D. O; TOLEDO FILHO, R.D.. Partial replacement of cement by combination of fly ash and metakaolin in bamboo bio-concretes. *3 rd International Conference on Bio-Based Building Materials* ,2019.

ANDREOLA, V.M; Caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos de bamboo. Dissertação de Mestrado. UFRJ-COPPE, Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7477: Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados à armadura de concreto armado. São Paulo, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos–Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência padrão. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: Concreto–Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto–Ensaio de compressão de corpos-de-cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Argamassa e concreto: determinação de resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9939: Agregados – Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 52: Agregado miúdo- Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASTM, D. 3039. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, 2008.

ASTM, D. 3410/D 3410M-03. Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials with unsupported gage section by shear loading.

AVESTON, J.; COOPER, G. A.; KELLY, A. The properties of the fiber composites. In Conference Proceedings, Nacional Physical Laboratory, Guildford. IPC Science and Technology Press, Teddington, U.K. 1971. pp. 15-26.

AZADEH, A. Heat influence on Physical and Mechanical Properties of *Dendrocalamus Giganteus* Bamboo. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio de Janeiro, 2018.

BAI, X. "Experimental and Numerical Evaluations of Structural Bamboo-Based Composite Materials". Archived Dissertations. 1996

BAMBOO SOURCEY. Disponível em: <www.bamboosourcery.com>. Acesso em : 13 de março de 2017.

BERALDO, A.L.; ZOULALIAN, A. Bambu: material alternativo para construções rurais. Anais do V EBRAMEM- Minas Gerais, 1995.

BERALDO, A. Bambu-cimento: alternativa para construções rurais. Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, v. 1, pp. 145–50, 1997.

BERALDO, A.L.; AZZINI, A. Bambu: características e aplicações. Livraria Editora Agropecuária. Guaíba, RS, 127p. 2004.

BERNDSEN, R.S. Caracterização anatômica, física e mecânica de lâminas de bambu (*Phyllostachys pubescens*). Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

BRITO, Flávia Maria Silva et al. Caracterização Anatômica e Física do Bambu Gigante (*Dendrocalamus giganteus* Munro). Floresta e Ambiente, v. 22, n. 4, p. 559-566, 2015.

CAEIRO, J. G. B.M. Construção em bambu. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa. Portugal, 2010.

CARBONARI, G.; SILVA JR, N.M; PEDROSA, N.H; HIROMI, C.; SCHOLTZ, M. F.; ACOSTA, C.C.V.; CARBONARI, L.T. Propriedades mecânicas de várias espécies de bambu. XV EBRAMEM-Curitiba, 2016

CHINA SCENIC. Disponível em: <www.chinascenic.com>. Acesso em: 14 de março de 2017.

CHUN, Z. F.; The production and utilization of bamboo forest in China. Hangzhou: China National Research Center of Bamboo –CBRC, 2003.

CHUN, Z. F.; The structure of culm of *Phyllostachys* Hangzhou: China National Research Center of Bamboo - CBRC, 2003.

CIARAMELLO D, Azzini A. Bambu como matéria-prima para papel. V- Estudos sobre o emprego de quatro espécies de *Dendrocalamus*, na produção de celulose sulfato. Bragantia, 1971.

CRUZ, M. L. S. Caracterização física e mecânica de colmos inteiros do bambu da espécie *Phyllostachys áurea*: comportamento a flambagem. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. PUC- Rio de Janeiro, 2002.

CULZONI, R.A.M. Características dos bambus e sua utilização como material alternativo no concreto. Rio de Janeiro, 1986. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. PUC- Rio de Janeiro, 1986.

DA GLÓRIA, M.Y.R. Desenvolvimento e caracterização de painéis sanduíches de concreto com núcleo leve e faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal. Dissertação de Mestrado. UFRJ-COPPE, Rio de Janeiro, 2015.

DAROLT, L.R.H. Análise aderência bambu-concreto. Revista Especialize On-line IPOG, Goiânia, ed.11, v.01, 2016.

DOS ANJOS, M.A.S, GHAVAMI, K., BARBOSA, N.P. Uso de polpa de bambu como reforço de matrizes cimentícias. Inter American Conference on Non-Conventional Materials and Technologies in the Eco-Construction and Infrastructure IAC-NOCMAT João Pessoa, Brazil, 2003.

EBIOBAMBU. Disponível em: <www.ebiobambu.com.br>. Acesso em: 20 de março de 2017.

ECHEVERRI, L.A.S; GARCÍA, M. E.R.. Morphological and structural characterization of bamboo fiber into culm-*Guadua angustifolia* KUNTH. *Ciência Florestal*, v. 28, n. 4, p. 1676-1687, 2018.

EL PAÍS. Disponível em: <www.elpais.com>. Acesso em: 20 de março de 2017.

FAO- *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. World bamboo resources – A thematic study prepared in framework of the Global Forest Resource Assessment 2005. Roma, 2007. Disponível em: <<http://www.fao.org/publications/en/>>. Acesso em: 15 de março de 2017.

FERREIRA, G. C. S. Vigas de concreto com armadura de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*. Tese de Doutorado. UNICAMP- São Paulo, 2007.

FILGUEIRAS, T. S.; VIANA, P. L. Bambus brasileiros: morfologia, taxonomia, distribuição e conservação. Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia. Rio de Janeiro: ICH, p. 10-27, 2017.

FRANÇA, V.H. Aderência Aço-Concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha”. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, 2004.

GARCEZ, R. M; SANTOS, T.; GARCEZ, E.O; GATTO, D.A. Propriedades físicas de compósitos cimento-madeira com serragem de *Pinus elliottii* tratada. Revista Ciência da Madeira. (Brazilian Journal of Wood Science), v.7, n2, p.70-80, 2016.

GHAVAMI, K. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. Cement and concrete composites, v. 27, n. 6, pp. 637–649, 2005.

GHAVAMI, K., TOLEDO FILHO, R. D. Desenvolvimento de materiais de construção de baixo consumo de energia usando fibras naturais, terra e bambu. Revista Engenharia Agrícola, v. 2, pp. 1–19, 1992.

GHAVAMI, K. Ultimate load behaviour of bamboo-reinforced lightweight concrete beams. Cement and Concrete Composites, London, v 17, n. 4, p. 259-351, 1995.

GHAVAMI, K., MARINHO, A.B. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. Revista Engenharia Agrícola, v.9, n.1, 2005.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. Determinação das Propriedades dos Bambus das Espécies: Mosó, Matake, *Guadua angustifolia*, *Guadua tagoara* e *Dendrocalamus giganteus* para Utilização na Engenharia. Rio de Janeiro: PUC-Rio. Publicação RMNC Bambu 01/2001, 53 p., 2001.

GOMES; B.M.C. Caracterização mecânica, estabilidade térmica e reação ao fogo do bambu Mossô (*L. PHYLLOSTACHYS PUBESCENS*). Dissertação de Mestrado. UFRJ-COPPE, Rio de Janeiro, 2019.

GONÇALVES, D.K.C. Construção civil sustentável: A utilização do bambu em Divinópolis Minas Gerais. Revista Especialize On-line, IPOG. ISSN 2179-5568. Nº 007 Vol.01, 2014.

GRECO, T. M.; CROMBERG, M. Bambu: Cultivo e Manejo. 1.ed. Florianópolis: Insular, 2011. 183p.

HIDALGO-LOPEZ, O. Bamboo: The gift of the gods. D,vinni Ltda., Bogotá-Colômbia, 2003.

INHABITAT. Disponível em: <www.inhabitat.com>. Acesso em: 20 de março de 2017.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION-ISSO N 313 (Bamboo Structural Design), ISSO 314 (Physical and Mechanical Properties); ISSO 315 (Testing Material).

JAVADIAN, ALIREZA, et al. "Mechanical properties of bamboo through measurement of culm physical properties for composite fabrication of structural concrete reinforcement." *Frontiers in Materials* 6 (2019): 15.

KRAUSE, J.Q. Micro e macromecânica de lâminas de bambu *Dendrocalamus giganteus* para aplicações estruturais. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil. PUC-Rio de Janeiro, 2015.

LI, X. Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing. Dissertation, The School of Renewable Natural Resources, Louisiana, 2004. 76 p.

LIESE, W. Anatomy of bamboo. In: *Bamboo research in Asia*, Ottawa. Proceedings Ottawa: IDRC, 1980. p. 165-172, 1980.

LIESE, W.; *The Anatomy of bamboo culms*. INBAR – International Network for bamboo and rattan. China: Technical Report, 1998.

LIESE, Walter. Preservation of a bamboo culm in relation to its structure. *World Bamboo and Rattan*, v. 3, n. 2, p. 17-21, 2005.

LIESE,W;KOHL,M. *Bamboo: The Plant and its Uses*. Springer International Publishing,356p.,2015.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S.; LOMELI-RAMIREZ, M. G. Utilização de resíduos de pinus spp., metacaulim de alta reatividade e resíduo de cerâmica calcinada em compósitos cimento-madeira. *Madera y Bosques*, 17(2):47–65, 2011.

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

LUIS, ZGL et al. Caracterização anatômica dos órgãos vegetativos de bambu (Poaceae, Bambusoideae). Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia-Capítulo em livro científico (ALICE), 2017.

MALI, Pankaj R.; DATTA, D. Experimental evaluation of bamboo reinforced concrete slab panels. *Construction and Building Materials*, v. 188, p. 1092-1100, 2018.

MESQUITA, L. P. et al. Determinação da tensão de aderência do bambu-concreto. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V. 10, n. 2, p. 505-516. Campina Grande, PB, 2006.

MOIZÉS, F.A; Painéis de Bambu, uso e aplicações: uma experiência didática nos cursos de Design em Bauru. São Paulo. Dissertação de mestrado. UNESP, 2007.

MOREIRA, L.E. Resistência Mecânica dos Bambus. Departamento de Engenharia de Estruturas. UFMG, 2018. O BAMBU

NAVARRO, E.H.A. Lajes de Concreto com Forma permanente de Bambu. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio de Janeiro, 2002.

NETO, J.A.G; PERAZZO, N.B. Painel modular intertravado com reforço estrutural de bambu e matriz cimentícia. II CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS. Paraíba, UFPB 2016.

PARK, S.; LEE, J.; JEANG, S. Mechanical Properties of Concrete with Bamboo Chips. Applied Sciences, v. 9, n. 16, p. 3367, 2019.

PEREIRA, M.A. R. Projeto Bambu: manejo e produção do bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus*) cultivado na Unesp/Campus de Bauru e determinação de suas características físicas e de resistência mecânica. Relatório Fapesp, 2006.

PEREIRA, M. A. R. Projeto Bambu: Introdução de espécies, manejo, caracterização e aplicações, 2012.

PEREIRA, M.A.R; BERALDO, A.L. Bambu de corpo e alma. Canal 6, 2016.

PEREIRA DA SILVA, S.P.A. Análise Teórica e Experimental de Colunas Armadas com Bambu. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil- PUC-Rio de Janeiro, 2002.

PRAWIROHATMODJO, Soenardi. Comparative Strength of Green and Air-dry Bamboo. In: International Bamboo Workshop held in Cochin, India from 14-18 November 1988. 1990. p. 218.

RADASKIEVICZ, T.; PUPPI, R.F.K. Propriedades axiais físicas e mecânicas do bambu mosô (*phyllostachys pubescens*). XV EBRAMEM-Curitiba, 2016.

RANGEL, C.S. Influência de agregados graúdos reciclados nas propriedades estruturais de concretos de resistência normal e de alto desempenho, 2015. Dissertação de Mestrado. UFRJ-COPPE- Rio de Janeiro, 2015.

REIS, C. N. S. Influência da utilização de agregado miúdo de RCD na aderência aço-concreto reciclado. Bahia, 2009. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Feira de Santana, 2009.

RILEM, L. Functional classification of lightweight concrete. *Materials and Structures*, 5:173–175, 1978.

RUSCH, F.; HILLIG, E. ; CEOLIN, G.B. Anatomia de hastes adultas de bambu: uma revisão. *Brazilian Journal of Forest Research/Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 38, 2018.

SALGADO, A.L. DE B. Resistência a la extracción de astillas de bambu enclavadas en concreto. In: *Sustainable construction into the next millenium environmentally, friendly and innovative cement based materials*. João Pessoa. João Pessoa: Federal University of Paraíba and The University of Sheffield. p.407-412,2000.

SOBRINO JR., A.S; TORRES, S.M; BARBOSA, N.P. Resistência mecânica de painéis de bambu e argamassa com resíduos industriais para construções de interesse social. *InterScientia*, João Pessoa, v.3, n.1, p.194-206, 2015.

SOUZA, K.S.G, ROCHA, A.B.C, MARTINS, A.P.S, TOLEDO FILHO, R.D. Reinterpretation of vernacular constructive process with the use of soil-cement-sisal fiber mortar and a bamboo framework. 17 th International Conference on Non-Conventional Materials ans Technologies. México, 2017.

TEIXEIRA, A. A. Painéis de Bambu para habitações econômicas: Avaliação do desempenho dos painéis revestidos com argamassa. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – UNB, Brasília, 2006.

TEIXEIRA, A.A; Desempenho de Painéis de Bambus Argamassados para Habitações Econômicas: Aplicação na Arquitetura e Ensaios de Durabilidade. Tese de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo- UNB, Brasília, 2013.

TYIN ARCHITECTS. Disponível em: <www.tyinarchitects.com>. Acesso em: 20 de março de 2017.

VARMA, M. B. Properties of Cement Concrete Reinforced With Bamboo-Strip-Mat. *IOSR, Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, eISSN, p. 2278-1684.

WAKCHAURE, M. R.; KUTE, S. Y. Effect of moisture content on physical and mechanical properties of bamboo. 2012.

ZEA ESCAMILLA, Edwin et al. Industrial or traditional bamboo construction? Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of bamboo-based buildings. *Sustainability*, v. 10, n. 9, p. 3096, 2018.

ZHANG QISHENG, JIANG SHENXUE, & TANG YONGYU; Industrial utilization on bamboo. Technical report N.26-INBAR,2001.

ZHAO WEIFENG; ZHOU JING. Application Technology of Bamboo Reinforced Concrete in Building Structure. *Applied Mechanics and Materials Online*, v.195-196, p. 297-302. 2012.