



CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA E AMBIENTAL DE BIO-CONCRETOS DE BAMBU

Vanessa Maria Andreola

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

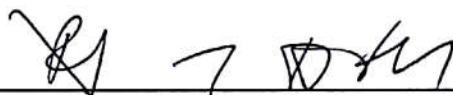
Rio de Janeiro
Março de 2017

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA E AMBIENTAL DE BIO -
CONCRETOS DE BAMBU

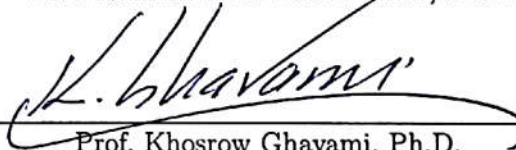
Vanessa Maria Andreola

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
CIVIL.

Examinada por:



Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D.Sc.



Prof. Khosrow Ghavami, Ph.D.



Prof. Camila Aparecida Abelha Rocha, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
MARÇO DE 2017

Andreola, Vanessa Maria

Caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos de bambu/Vanessa Maria Andreola. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XVIII, 100 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 94 – 100.

1. Bio-concreto de bambu. 2. Dosagem. 3. Caracterização mecânica. 4. Caracterização física. 5. Impacto ambiental. 6. Pegada de carbono. I. Toledo Filho, Romildo Dias. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

“Quem deseja aprender a voar,
deve primeiro aprender a caminhar,
a correr, a escalar e a dançar. Não
se aprende a voar voando”.

Friedrich Nietzsche

Agradecimentos

É com um amor imensurável que eu agradeço à Deus por tudo. Graças a Ele eu consegui vencer e encarar todos os desafios, aproveitando as oportunidades que surgiram em minha vida.

Agradeço imensamente e profundamente a minha linda família. Aos meus pais Valdemar Adelar Andreola, Terezinha Colussi Andreola e a minha amada irmã Tânia Luisa Andreola. Todos os esforços financeiros, o amor inigualável e as intensas orações não foram em vão. Vocês são os presentes mais encantadores e admiráveis que Deus poderia ter me dado. Obrigada pelo amor incondicional e por todos os pertinentes ensinamentos.

Agradeço ao meu namorado e amigo Marcelo Scherer Perlin, pelo amor, compreensão, inspiração e companheirismo. Por estar ao meu lado sempre, auxiliando no meu trabalho, impulsionando e mostrando que mesmo árduo o caminho traz as suas aprazíveis recompensas. A nossa distância física é apenas um detalhe, pois para mim você significa tudo.

Agradeço ao meu orientador e professor Romildo Dias Toledo Filho, pelos ensinamentos, pela confiança e por acreditar nas minhas ideias. Obrigada pela inspiração diária e por me ensinar que os problemas são apenas as coisas que não tem soluções. As tuas palavras e exemplos são para mim as ferramentas necessárias para a construção do meu espírito de liderança.

Agradeço aos professores Khosrow Ghavami e Camila Aparecida Abelha Rocha, pelas relevantes e profundas colaborações. Obrigada pelas ideias que transformaram esta pesquisa em uma proposta de trabalho robusta e admirável, reflexo das intensas contribuições científicas de vocês.

Agradeço ao excelente profissional Jacson Hübner, que surgiu no meu caminho para facilitar a minha vida. Você foi a inspiração e auxílio para o meu crescimento pessoal e profissional. Obrigada pelas colaborações e transformações que despertaste em mim.

Agradeço a todos os colegas, funcionários, técnicos e amigos que tive o prazer de conhecer no NUMATS e LABEST. Aos companheiros de sala, laboratório e sextas do concreto: Jéssica, Carol's, Mayara, Tamara, Liuski, Karyne, Nathalia's, Gabriela's, Amanda, Yasmim, Anile, Renata, Anne, Mostafa, Alfredo, Lucas, Fabrício, Iolanda, Vivian, Nina, Aline, Oscar, Kathelyn, Edson. De estímulos diários à conselhos profundos, cada um de vocês me deu forças para encerrar e finalizar com êxito este trabalho.

Ao grupo da biomassa que tenho orgulho de fazer parte por ser competente, eficiente e divertido: Daniele e Yassin, obrigada por não medirem esforços para o mix design concretizar-se com tanto aprendizado e evolução, refletindo nas nossas pesquisas. O brilho que buscamos nas moldagens será o reflexo das nossas conquistas.

Agradeço de forma especial o presente que a vida me deu: meu irmão Yassin da Gloria, que incansavelmente me ensinou de moldagem à tratamento e paciência com os dados. O meu eterno agradecimento por facilitar a minha vida e a integração no laboratório. Reconheço que és uma luz pulsante e me ensina a ser melhor todos os dias.

Agradeço aos técnicos e funcionários do NUMATS e LABEST pelo incansável apoio e empenho diário, não medindo esforços para a concretização do meu trabalho: Alessandro, Anderson, Alexandre, Marcelo, Adailton, Hidekel, Márcio, Wesley, Adriana, Bruna, Ítalo, Luzidelle, Rosângela, Carmen, Jorge, Sandra, Claudinha e Jô. Vocês contribuíram de forma significativa para o desenvolvimento desta pesquisa, obrigada pelo auxílio e experiência de cada um de vocês.

Agradeço as amigas mineiras do coração: Isabela e Priscilla, que generosamente e com muito amor o Rio de Janeiro me presenteou. Aos amigos e arquitetos catarinenses que permaneceram comigo nessa caminhada e não mediram esforços para que nossa amizade progredisse: Karine, Raquel, Fernanda, Joana e Diego. Aos amigos e arquitetos gaúchos que contribuíram e incentivaram o início e a finalização desta pesquisa: Tatiana, Géssica, Bruno, Rafaela, Sabine e Raquel. Obrigada pela amizade, aprendizagem e incentivos.

Aos amigos dos diversos estados que conheci: cariocas, mineiros, alagoenses, capixabas, catarinenses, goianos, brasilienses e amazonenses. E das várias partes do mundo: beninenses, italianos, cubanos, franceses, colombianos e bolivianos. Obrigada pela oportunidade de desbravar um pouco da cultura de cada um de vocês.

Ao CNPq, através do PEC/COPPE/UFRJ pelo apoio financeiro.

Esta gigantesca conquista leva o meu nome, mas a construção dela tem um pedaço de cada um de vocês. A todos, muito obrigada.

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

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA E AMBIENTAL DE BIO-CONCRETOS DE BAMBU

Vanessa Maria Andreola

Março/2017

Orientador: Romildo Dias Toledo Filho

Programa: Engenharia Civil

Esta pesquisa apresenta o desenvolvimento e a caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos de elevada trabalhabilidade produzidos utilizando-se partículas de bambu e cimento Portland. Utilizou-se uma forma diferenciada de produzir os bio-concretos onde dispensou-se o uso da técnica da compactação à frio, normalmente utilizada na indústria de painéis de madeira. Para a obtenção de misturas de alta trabalhabilidade, compensou-se a água de absorção da biomassa e adicionou-se as partículas de bambu secas. Um desenho experimental 2^2 foi utilizado para avaliar a influência do volume de biomassa que variou de 45 à 50% e da relação água/cimento que variou de 0,40 à 0,50 na resistência à compressão, cisalhamento, flexão, tração e na absorção de água dos bio-concretos. Adotando os modelos de regressões múltiplas, foi possível obter as superfícies de respostas para as propriedades estudadas. Dois pontos intermediários foram utilizados para a validação dos modelos obtidos para a resistência à compressão e módulo de elasticidade, além da retração por secagem dos bio-concretos. Os resultados obtidos mostram que o volume de partículas tem maior influência sobre a resistência do que a relação água/cimento. O bio-concreto com menor volume de partículas e menor relação água/cimento apresentou a melhor performance mecânica. A avaliação do impacto ambiental do bio-concreto foi calculada determinada seguindo as recomendações da ISO 14067: 2014. Para o bio-concreto com maior volume de partículas a emissão de carbono é de $133,20 \text{ kgCO}_{2e}/\text{m}^3$.

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

PHYSICAL, MECHANICAL AND ENVIRONMENTAL CHARACTERIZATION
OF BAMBOO BIO-CONCRETES

Vanessa Maria Andreola

March/2017

Advisor: Romildo Dias Toledo Filho

Department: Civil Engineering

This research presents the physical, mechanical and environmental characterization of the developed high workability bio-concretes produced using bamboo particles and Portland cement. A different approach to producing bio-concretes was applied, whereas the cold compaction technique, commonly used in the wood panel industry, was not used. In order to obtain mixtures with high workability, the biomass absorption water was compensated and dried bamboo particles were added. A 2^2 experimental design was used to evaluate the influence of the biomass volume ranging from 45 to 50% and the water/cement ratio ranging from 0,40 to 0,50 in the compressive, shear, flexural, tensile tests and water absorption of bio-concretes. By adopting the multiple regression models, it was possible to obtain the response surfaces for the studied properties. Two intermediary points were used for the validation of the models obtained for the compressive strength and modulus of elasticity, as well for drying shrinkage of the bio-concretes. The results show that the particles volume have a greater influence on the resistance than the water/cement ratio. The bio-concrete with lower particles volume and lower water/cement ratio presented the best mechanical performance. The environmental impact assessment of the bio-concrete was calculated according to the recommendations of ISO 14067: 2014. For the bio-concrete with the highest particles volume the carbon emission was $133,20 \text{ kgCO}_{2e}/\text{m}^3$.

Sumário

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivos gerais	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
1.2 Organização da pesquisa	3
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 O bambu	5
2.1.1 Constituição do bambu	7
2.1.2 As camadas da parede do colmo	8
2.2 Composição química do bambu	11
2.3 Propriedades e aplicações do bambu	13
2.3.1 Propriedades físicas	13
2.3.2 Propriedades mecânicas	14
2.4 Bambu <i>in natura</i> e em compósitos	15
2.4.1 Resíduos de biomassa de bambu	19
2.4.2 Compósito de biomassa vegetal e cimento	20
2.4.3 Compatibilidade entre cimento e biomassa vegetal	20

2.4.4	Tratamentos para melhorar a compatibilidade	21
2.4.5	Durabilidade dos compósitos de biomassa e cimento	22
2.4.6	Compensação de água nos compósitos de biomassa	23
2.4.7	Vantagens dos compósitos cimentícios de biomassa	24
2.4.8	Produção dos compósitos cimentícios de biomassa	26
3	Materiais e métodos experimentais	28
3.1	Procedência da matéria-prima	28
3.2	Produção das partículas de bambu	28
3.3	Caracterização dos materiais	30
3.3.1	Partículas de bio-agregados de bambu	30
3.3.2	Cimento Portland CP V - ARI	41
3.3.3	Agente modificador de viscosidade	43
3.3.4	Água	43
3.4	Programa experimental	43
3.5	Dosagem dos bio-concretos	44
3.5.1	Produção dos bio - concretos	47
3.5.2	Corte, extração e desbaste dos corpos - de - prova	49
3.6	Ensaio mecânicos	52
3.6.1	Resistência à compressão uniaxial	52
3.6.2	Resistência à flexão em 3 pontos	53
3.6.3	Resistência à tração direta	54
3.6.4	Resistência ao cisalhamento	55
3.7	Ensaio físicos	56
3.7.1	Absorção de água por capilaridade	56
3.7.2	Retração por secagem e perda de massa	58
4	Resultados e discussões	61

4.1	Bio-concretos	61
4.2	Propriedades dos bio-concretos	61
4.2.1	Ensaio de espalhamento	61
4.2.2	Densidade dos bio-concretos	62
4.3	Propriedades mecânicas	66
4.3.1	Resistência à compressão uniaxial	66
4.3.2	Resistência à flexão em 3 pontos	75
4.3.3	Resistência à tração direta	79
4.3.4	Resistência ao cisalhamento	82
4.4	Propriedades físicas	85
4.4.1	Absorção de água por capilaridade	85
4.4.2	Retração por secagem e perda de massa	87
4.5	Impacto ambiental do bio-concreto	88
4.5.1	Definição do objetivo e escopo do estudo	89
4.5.2	Análise do inventário	89
4.5.3	Avaliação de Impacto Ambiental	90
4.5.4	Interpretação do impacto ambiental do bio-concreto	90
5	Conclusões	91
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	93
	Referências Bibliográficas	94

Lista de Figuras

2.1	Distribuição dos bambus no mundo. Adaptado de LOPEZ (2003).	5
2.2	Distribuição dos bambus na América (www.guaduabamboo.com/).	6
2.3	Distribuição do bambu no Brasil. Adaptado de (FIALHO <i>et al.</i> , 2005).	6
2.4	Partes constituintes do bambu e colmo (GRECO e CROMBERG, 2011).	7
2.5	Regiões: basal, intermediária e apical. Adaptado de (LOPEZ, 2003).	8
2.6	Camadas: 1) Epiderme, a camada externa. 2) Derme, a camada interna. 3) Tecido base. 4) Feixes vasculares e a parede da cavidade.	8
2.7	(a) parênquima na seção longitudinal, células alongadas e curtas. (b) e (c) células do parênquima com grãos de amido. Adaptado de (LIESE, 1998).	9
2.8	Variação dos feixes na parede do colmo (MARINHO, 2013).	10
2.9	(a) feixes fibrovasculares: 1) floema. 2) metaxilema. 3) protoxilema. 4) esclerênquima. 5) feixes de fibras. 6) tecido parenquimatoso (LIESE, 1985).	10
2.10	(a) Fibras paralelas na região do entrenó. (b) Fibras aleatórias na região do nó. Adaptado de GRECO e CROMBERG (2011) e (LIESE, 1985).	11
2.11	Estrutura da biomassa: 1) Biomassa. 2) Célula vegetal. 3) Parede celular. 4) Microfibrila. 5) Glicose. Adaptado de (SANTOS <i>et al.</i> , 2012).	12
2.12	(a) Autor: Bamboodna, EUA. (b) Autor: Ibuku, Indonésia.	15
2.13	Ilustração do processo de confecção e aplicação do laminado de bambu. (MOIZÉS, 2007) e disponível em: www.edreams.pt/blog/ , respectivamente.	16

2.14	Residência em Bogotá, Colômbia, extraído de https://www.zuarq.co/	16
2.15	Edifício em Guadalajara, México. Extraído de www.archdaily.com	17
2.16	(a) Seção transversal do bambu. (b) Diafragma inteiro, reforçado com tiras de bambu e aço. (c) Protótipo finalizado. Adaptado de (NAVARRO, 2002).	17
2.17	Aspectos dos concretos reforçados com bambu e aço (GHAVAMI, 2005).	18
2.18	Aparência dos bio-concretos produzidos com bambu e as possibilidades de aplicações (PEREIRA e BERALDO, 2007) e MARTINS (2002), respectivamente.	18
2.19	Colmos irregulares e inadequados para utilização em estruturas.	19
2.20	Propriedades desejadas do cimento e biomassas na fabricação de materiais compósitos. Adaptado de (LIPINSKI, 1994) citado por (MATOSKI, 2005).	25
2.21	Sistema de prensagem manual cimento-biomassa.	26
2.22	Sistema de prensagem industrial cimento-biomassa (MATOSKI, 2005).	27
3.1	Resíduos com dimensões variadas.	28
3.2	Triturador industrial utilizado para trituração das taliscas de bambu.	29
3.3	Aparência do material submetido no triturador industrial.	29
3.4	Taliscas e pedaços de bambu após a trituração no moinho de martelos.	29
3.5	Moinho de facas utilizado na trituração do agregado graúdo de bambu.	30
3.6	Peneirador mecânico e os bio-agregados retidos em cada peneira.	31
3.7	Partículas de bio-agregados utilizadas na pesquisa.	31
3.8	Homogeneização do tipo pilha alongada utilizado para os bio-agregados.	32
3.9	Curva granulométrica acumulada das partículas de bambu.	32
3.10	Partículas de bio-agregado saturadas em água e secas ao ar.	33
3.11	Procedimentos realizados para a umidade saturada superfície seca.	33
3.12	Bio-agregado imerso em água e seco até a constância de massa.	34
3.13	Preparação das partículas de bambu para o ensaio de absorção de água.	35

3.14	Sequência de procedimentos realizados no ensaio de absorção de água.	35
3.15	Curva de absorção de água no tempo para as partículas de bambu.	36
3.16	Análise do índice de angularidade e forma 2D dos bio-agregados.	37
3.17	Índice de angularidade dos bio-agregados de bambu.	38
3.18	Índice de forma 2D dos bio-agregados de bambu.	39
3.19	Morfologia das partículas de bambu.	39
3.20	Coloração e extrativos após a evaporação da água.	40
3.21	Extrativos acumulados <i>versus</i> ciclos de lavagens.	41
3.22	Cimento Portland CP V - ARI da Holcim.	41
3.23	Curva granulométrica do cimento CP V - ARI.	42
3.24	Desenho fatorial utilizado no estudo.	44
3.25	Etapas testadas no procedimento 1: (a) mistura dos materiais secos, (b) adição da água no conjunto, (c) teste de espalhamento com presença de segregação.	45
3.26	Etapas testadas no procedimento 2: (a) mistura do cimento com água que forma uma pasta, (b) início do teste com segregação, (c) teste do espalhamento.	45
3.27	Etapas testadas no procedimento 3: (a) início da mistura com pasta, (b) pré saturação das partículas, (c) espalhamento com exsudação e segregação.	45
3.28	Etapas testadas no procedimento 4: (a) partículas misturadas com a água, (b) início do teste com exsudação, (c) teste do espalhamento.	46
3.29	Aperfeiçoamento do procedimento 1: <i>flow table test</i> (a) início do teste (b) espalhamento e aparência da mistura (c) espalhamento obtido.	47
3.30	Betoneira utilizada na moldagem e aparência dos bio - concretos.	48
3.31	(a) distribuições das porções, (b) formação da primeira camada, (c) distribuição da segunda porção, (d) formação da segunda camada, (e) distribuição da terceira porção, (f) finalização da moldagem.	49
3.32	Procedimentos de corte: (a) painel posicionado para o corte, (b) regularização das faces (c) painel cortado em blocos.	50

3.33	Esquema da retirada dos corpos - de - prova do molde.	50
3.34	Procedimento de desbaste e faceamento nos bio - concretos.	51
3.35	Execução dos entalhes nos corpos - de - prova de cisalhamento.	51
3.36	Ensaio de compressão uniaxial dos bio - concretos.	52
3.37	Ensaio de resistência à flexão em 3 pontos dos bio - concretos.	53
3.38	Ensaio de resistência à tração direta dos bio - concretos.	55
3.39	Ensaio de resistência ao cisalhamento dos bio - concretos.	56
3.40	Ensaio absorção de água por capilaridade dos bio - concretos.	57
3.41	Gráfico típico da absorção de água por capilaridade <i>versus</i> a raiz quadrada do tempo. Adaptado de FONTES (2008).	58
3.42	Procedimentos do ensaio de retração por secagem dos bio - concretos.	59
4.1	Influência do volume de partículas V_p (%) e a relação de A/C na densidade saturada (ρ_1) dos bio-concretos.	63
4.2	Influência do volume de partículas V_p (%) e a relação de A/C na densidade seca (ρ_2) dos bio-concretos.	63
4.3	(a) superfície lisa e (b) fraturada, ambas com presença de poros.	64
4.4	Seção horizontal e vertical das amostras dos bio-concretos produzidos.	65
4.5	Curvas típicas da evolução de tensão <i>versus</i> deformação axial.	67
4.6	Evolução da resistência à compressão dos bio-concretos estudados.	68
4.7	Evolução do módulo de elasticidade dos bio-concretos estudados.	69
4.8	Curvas típicas de tensão <i>versus</i> deformação axial na compressão.	71
4.9	Tipos de ruptura dos bio-concretos de bambu.	73
4.10	Influência do volume de partículas V_p (%) e da relação A/C na resistência à compressão aos 28 dias de idade dos bio-concretos.	73
4.11	Influência do volume de partículas V_p (%) e da relação A/C no módulo de elasticidade aos 28 dias dos bio-concretos.	74
4.12	Curvas típicas de carga <i>versus</i> deflexão na flexão em 3 pontos.	76
4.13	Tipo de ruptura dos bio-concretos no ensaio de flexão em 3 pontos.	77

4.14	Influência do volume de partículas V_p (%) e da relação A/C no MOR aos 28 dias de idade dos bio-concretos.	78
4.15	Influência do volume de partículas V_p (%) e da relação A/C no MOE aos 28 dias de idade dos bio-concretos.	78
4.16	Curvas típicas de tensão <i>versus</i> deformação na tração.	80
4.17	Tipo de ruptura dos bio-concretos no ensaio de tração direta.	81
4.18	Influência do volume de partículas V_p (%) e da relação A/C na tração direta aos 28 dias de idade dos bio-concretos.	82
4.19	Curvas típicas de carga <i>versus</i> deslocamento no cisalhamento.	83
4.20	Visualização do ensaio e superfícies fraturadas ao cisalhamento.	84
4.21	Influência do volume de partículas V_p (%) e da relação A/C no cisalhamento aos 28 dias de idade dos bio-concretos.	85
4.22	Absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada.	85
4.23	Curva de retração por secagem e perda de massa dos bio-concretos.	87
4.24	Limites do sistema de produção (CALDAS <i>et al.</i> , 2017).	89

Lista de Tabelas

2.1	Composição química do bambu e das coníferas (JANSSEN, 1981).	11
2.2	Valores em %, do teor de umidade das espécies <i>Guadua Spp</i> e <i>D. Giganteus</i> . Adaptado de (MURAD, 2011) e (GHAVAMI e TOLEDO FILHO, 1992).	13
2.3	Massa específica aparente (ρ) em g/cm^3 (PEREIRA, 2006).	14
2.4	Resistência (em MPa) de espécies de bambu (PEREIRA, 2001).	14
2.5	Resistência mecânica à compressão e à tração (MPa) em diferentes regiões do colmo da espécie <i>Guadua Angustifolia</i> (GHAVAMI e MARINHO, 2005).	15
3.1	Valores obtidos para os bio-agregados de bambu referentes a massa específica, massa específica aparente, absorção de água e teor de umidade.	34
3.2	Angularidade e os limites de classificação AL ROUSAN (2005).	37
3.3	Forma 2D e os limites de classificação AL ROUSAN (2005).	38
3.4	Composição química e densidade do cimento CP V - ARI.	42
3.5	Volume de cimento (em Kg/m^3), volume de biomassa (em %) e a relação mássica entre os materiais onde: Cim. = Cimento e Bio. = biomassa de bambu.	47
4.1	Valores de espalhamento obtidos para cada mistura dos bio-concretos.	62
4.2	Valores médios das densidades ρ_1 e ρ_2 dos bio-concretos.	62
4.3	Desvio de linearidade conforme a idade dos bio-concretos.	68

4.4	Valores médios da resistência sob compressão dos bio-concretos aos 7, 14 e 28 dias de idade, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses)	68
4.5	Valores médios do módulo de elasticidade dos bio-concretos aos 7, 14 e 28 dias de idade, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses)	69
4.6	Valores médios da resistência mecânica à compressão aos 28 dias e os valores obtidos pelo modelo fatorial. Exp. = Experimento e Val. = Validação.	74
4.7	Valores médios do módulo de elasticidade aos 28 dias e os valores obtidos pelo modelo fatorial. Exp. = Experimento e Val. = Validação.	75
4.8	Valores médios da resistência sob flexão dos bio-concretos aos 28 dias de idade, com os respectivos coeficientes de variação (em % entre parênteses).	75
4.9	Valores médios da resistência à tração dos bio-concretos aos 28 dias de idade, com os respectivos coeficientes de variação (em % entre parênteses).	79
4.10	Valores médios resistência ao cisalhamento dos bio-concretos aos 28 dias de idade, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses).	82
4.11	Valores dos estágios de absorvidades e pontos de transição.	86
4.12	Valores médios de absorção de água por capilaridade após 72 horas e 672 horas de ensaio, com os respectivos coeficientes de variação (em % entre parênteses).	86
4.13	Concretos normalmente utilizados na produção de blocos de concreto. Onde: * Bio-concreto com $V_p = 50\%$ e A/C 0,45 desta pesquisa. \ominus Bloco de concreto para vedação. \otimes Bloco de concreto estrutural (divisórias internas). \odot Bloco de concreto estrutural (para fachadas). \otus Argamassa de assentamento industrializada.	90

Capítulo 1

Introdução

Na última década tem-se observado uma crescente preocupação da comunidade científica nacional e internacional com o desenvolvimento de concretos de baixa emissão de carbono. Esses materiais podem ser obtidos tanto pela substituição dos materiais cimentícios quanto dos agregados. No caso particular da substituição dos agregados, destaca-se o uso de resíduos de construção e demolição, resíduos industriais e resíduos de biomassa vegetal.

O Brasil, devido às diversidades e características do solo e clima, é um país com grande tendência e potencial à produção agrícola. O que resulta em uma significativa ocorrência de resíduos agroindustriais (MANZATTO *et al.*, 2002). Os volumes cumulativos de resíduos, conflitantes com as questões ambientais, impulsionaram a busca por alternativas visando o aproveitamento e aplicação desses materiais na produção de compósitos para diversos setores do mercado, inclusive para a construção civil. Apesar do grande potencial de aproveitamento existente, sua utilização em escala comercial é ainda reduzida (CASSILHA *et al.*, 2004).

Os resíduos agroindustriais gerados produzem matéria-prima propícia para serem empregados na produção de diversos tipos de componentes construtivos (SAVASTANO JUNIOR, 2000). As fibras de origem vegetal, por exemplo, quando utilizadas como reforço de matrizes frágeis à base de materiais cimentícios têm causado grande interesse devido ao baixo custo, economia de energia, disponibilidade e possibilidade de solucionar problemas ambientais (TOLEDO FILHO, 1997).

Dentre os materiais vegetais o bambu é uma matéria - prima que vem sendo explorada por várias indústrias. Apresentando características mecânicas propícias, o processamento do material pode ser utilizado na construção civil e na confecção de móveis (NOGUEIRA, 2008). No entanto, o processo de laminação do bambu resulta em um volume considerável de resíduos, sobras e fragmentos que correspondem a

cerca de 40% de toda a biomassa vegetal do colmo. Esses resíduos podem originar novos produtos, como painéis aglomerados, particulados, estruturais ou isolantes que apresentam características e propriedades semelhantes aos produtos laminados, normalmente comercializados (KRAVCHENKO *et al.*, 2015).

No cenário internacional vários grupos estão desenvolvendo pesquisas voltadas para o uso de bio - concretos. WOLFE e GJINOLLI (1999) produziram painéis cimentícios com partículas de madeira e observaram que os resíduos combinados com o cimento apresentaram boa resistência mecânica, sendo indicado para uso em painéis externos de construção. Também usando resíduos de madeira, NOH *et al.* (2016) testaram uma técnica convencional e criaram outra forma de executar painéis. Notou-se que a técnica desenvolvida pelos autores apresentou o dobro da resistência nos ensaios realizados. AMZIANE e SONEBI (2016) apresenta algumas possibilidades de aplicação de materiais vegetais com cimento para a construção civil. São abordados questões relativas a economia de energia e análise de ciclo de vida que refletem diretamente no uso desses materiais.

No Brasil, BERALDO (1994) utilizou partículas de bambu como reforço em diferentes matrizes cimentícias. LATORRACA (2000) realizou estudos referentes a painéis cimentícios com biomassa de madeira, e observou que as partículas de tamanho intermediário combinadas com o cimento apresentaram resultados mecânicos satisfatórios. BILCATI (2015) estudou o desempenho da fibra de curauá na produção de painéis cimentícios, analisando suas propriedades físicas e mecânicas. DA GLORIA (2015) produziu painéis sanduíches com núcleos de serragem de madeira e cimento, com faces laminadas com fibras longas de sisal. Foi observado que há potencialidade na utilização dos núcleos, que reuniram leveza e baixa condutividade térmica em conjunto com a resistência mecânica dos laminados estudados.

Os exemplos de estudo apresentados utilizam como método de produção a prensagem. Nesse procedimento há gastos significativos de energia para moldar o material. Uma alternativa de baixo consumo de energia seria a produção dos bio-concretos utilizando-se de técnicas convencionais de produção de concreto. São escassos, no entanto, os estudos sobre os bio-concretos produzidos sem prensagem. Esta pesquisa traz uma proposta de dosagem dos bio-concretos utilizando-se resíduos de partículas de bambu e cimento Portland de elevada trabalhabilidade e moldabilidade. Visa-se assim, desenvolver um método racional onde a execução da moldagem seja rápida e prática.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Esta pesquisa tem por objetivo a dosagem e caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos utilizando partículas de bambu e cimento Portland.

1.1.2 Objetivos específicos

São os objetivos específicos do presente estudo:

- Caracterizar as partículas de bambu quanto à sua granulometria, massa específica, teor de umidade, índice de angularidade e forma 2D;
- Examinar a concentração de extrativos existentes nas partículas de bambu;
- Determinar a quantidade de água a ser compensada na mistura do bio-concreto, devido a elevada capacidade de absorção de água da biomassa de bambu;
- Desenvolver um método de dosagem racional para bio-concretos de elevada trabalhabilidade e moldabilidade;
- Analisar a influência tanto do volume de partículas quanto da relação água/cimento no comportamento físico e mecânico das misturas;
- Através do uso da análise fatorial do experimento, obter as superfícies de respostas para as propriedades estudadas;
- Determinar o impacto ambiental do bio-concreto seguindo as recomendações da ISO 14067: 2014.

1.2 Organização da pesquisa

Esta pesquisa está dividida e será apresentada em cinco capítulos.

Capítulo 1: Introdução ao tema estudado com exposição dos objetivos gerais, específicos, organização e estrutura da pesquisa.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre a composição química, propriedades físicas e mecânicas do bambu. Formas de execução e aplicação do bambu aliados ao cimento.

Capítulo 3: Caracterização dos materiais utilizados e descrição do programa experimental. Detalhamento dos procedimentos empregados na produção juntamente com a avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos bio-concretos produzidos.

Capítulo 4: Resultados e discussões obtidos para os bio-concretos e análise das propriedades físicas e mecânicas alcançadas. Para cada propriedade estudada, através do modelo de regressão múltipla são apresentados as superfícies de respostas dos bio-concretos. A emissão de carbono é apresentada para o bio-concreto com maior volume de partículas.

Capítulo 5: Conclusões sobre os resultados obtidos nesta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 O bambu

Os bambus são plantas da subfamília *Bambusoideae* e pertencem à família *Poaceae*, também conhecida como família das gramíneas (GRECO e CROMBERG, 2011). São encontrados em regiões temperadas, tropicais e subtropicais. Nasceram em todos os continentes, com exceção da Europa. A distribuição geográfica do bambu no mundo antes de 1960 pode ser visualizada na figura 2.1. A distribuição continental é de aproximadamente 67% na Ásia e Oceania, 3% na África e 30% nas Américas, sendo que no mundo existem 111 gêneros e 1.575 espécies de bambus (OHRNBERGER, 1999).

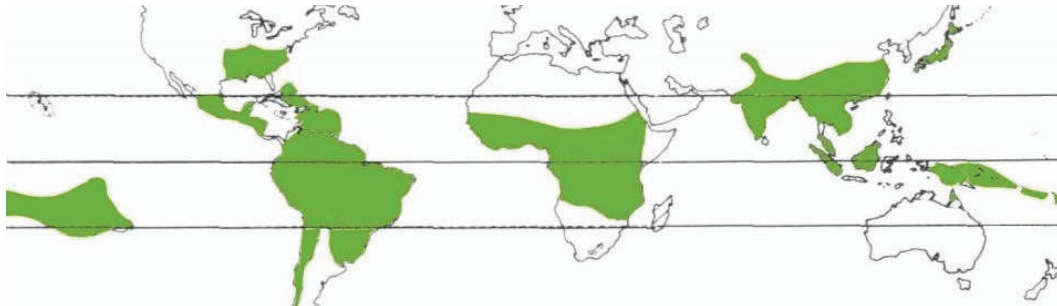


Figura 2.1: Distribuição dos bambus no mundo. Adaptado de LOPEZ (2003).

De acordo com GRECO e CROMBERG (2011) nas Américas existem 41 gêneros e 440 espécies nativas de bambu. De todos os países do continente, o Brasil apresenta a maior diversidade com 137 espécies seguido da Colômbia (70), Venezuela (60), Equador (42), Costa Rica (39) e México (37), conforme ilustração da figura 2.2.

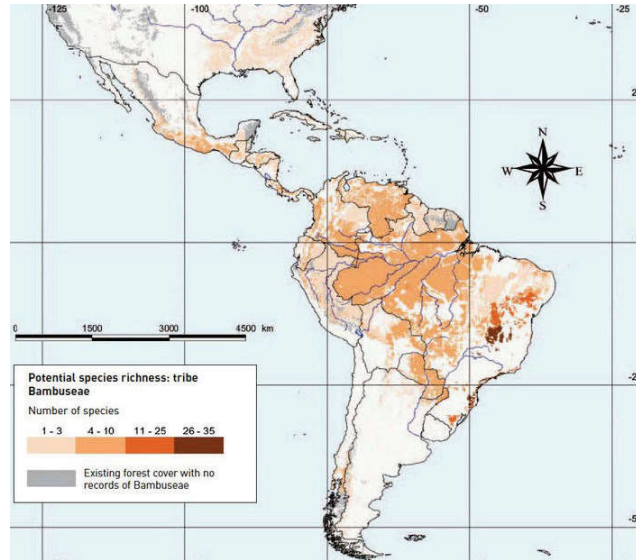


Figura 2.2: Distribuição dos bambus na América (www.guaduabamboo.com/).

VILLEGAS (2005) comenta que a maioria dos países latino-americanos não possuem dados que estimem as áreas cobertas com bambu. As imagens de satélite permitem estimar que existem 11% de cada km² de bosques cobertos com a gramínea, estimando no mínimo 11 milhões de hectares existentes na América Latina. FIALHO *et al.* (2005) desenvolveram um croqui com a distribuição do bambu no Brasil e explicam a potencialidade de cada região, conforme mostrado na figura 2.3.



Figura 2.3: Distribuição do bambu no Brasil. Adaptado de (FIALHO *et al.*, 2005).

A região norte (a) apresenta demanda por biomassa para usinas termoeletricas e a região (b) acomoda as maiores reservas naturais de espécies nativas de bambu. A

região nordeste (c) apresenta tecnologias instaladas e fábricas de papel em funcionamento. A região da zona da mata nordestina (d) possui elevado potencial e interesse na transformação de espaços exercidos pela atividade canavieira para atividades incluindo a cultura do bambu. A região sudeste (e) possui elevada diversidade de espécies e nela estão localizados grandes centros de pesquisas, local com potencial para abertura de novos mercados (FIALHO *et al.*, 2005).

2.1.1 Constituição do bambu

GRECO e CROMBERG (2011) comentam que os bambus apresentam porte arbóreo constituído por uma porção aérea composta de colmo, as folhas, as folhas caulinares e os ramos, conforme mostrado na figura 2.4 (a). O sistema subterrâneo é formado por rizomas e raízes que possuem formas parecidas com os colmos, apresentando sequências de entrenós ocultos, conforme ilustrado na figura 2.4 (b).

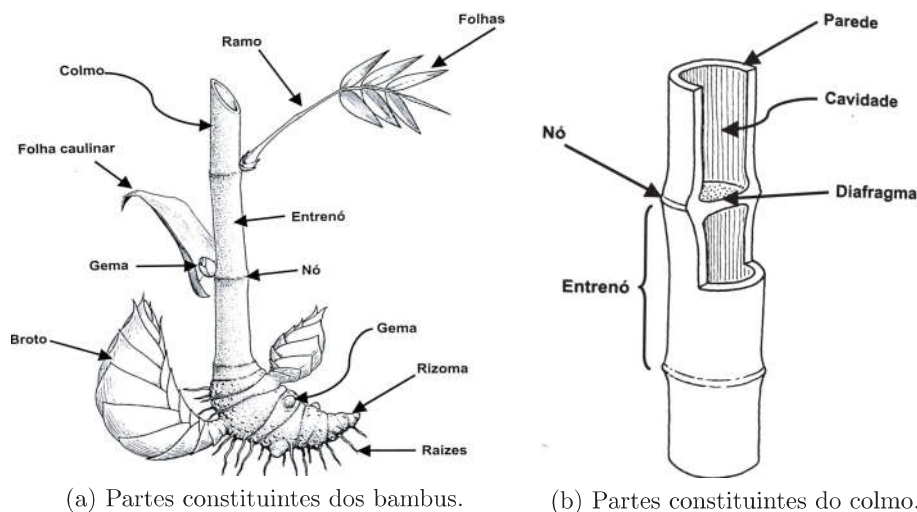


Figura 2.4: Partes constituintes do bambu e colmo (GRECO e CROMBERG, 2011).

Ao brotar a partir do rizoma o colmo já nasce com seu diâmetro definitivo e será igual durante toda a sua vida. Apresenta uma forma cônica com dimensões maiores na região basal, menores na região intermediária e afunilando-se em direção à região do topo, conforme pode ser visualizado na figura 2.5. Além de realizar a função de sustentação da parte aérea da planta, os colmos protegem os vasos condutores que têm por função o transporte da seiva. Em termos de aproveitamento o colmo é a parte mais importante da planta (GRECO e CROMBERG, 2011).

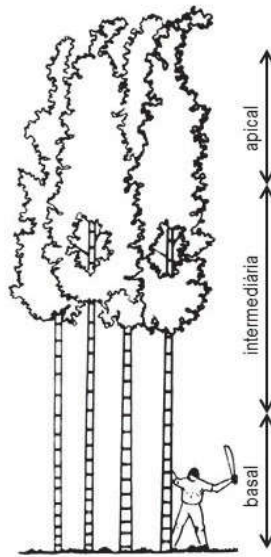
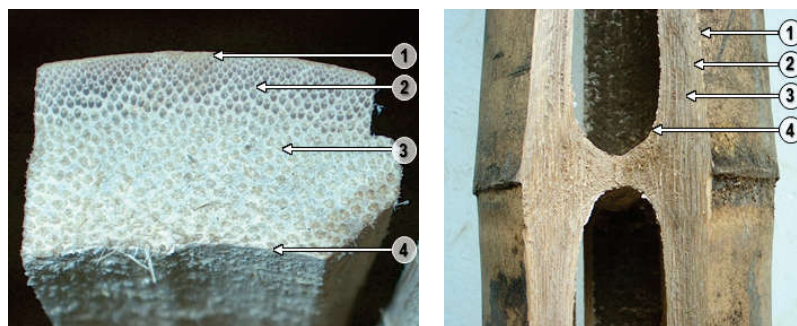


Figura 2.5: Regiões: basal, intermediária e apical. Adaptado de (LOPEZ, 2003).

2.1.2 As camadas da parede do colmo

LOPEZ (2003) explica que a parede do colmo apresenta subdivisões com diferentes características. Cada uma das camadas está ilustrada na figura 2.6.



(a) Parede no sentido transversal. (b) Parede no sentido longitudinal.

Figura 2.6: Camadas: 1) Epiderme, a camada externa. 2) Derme, a camada interna. 3) Tecido base. 4) Feixes vasculares e a parede da cavidade.

A primeira refere-se a uma camada fina localizada na epiderme que é denominada camada externa e a função é a de revestimento. As células epidérmicas caracterizam-se por estarem sobrepostas, sem deixar espaços intercelulares e são responsáveis pelo fortalecimento da camada epidérmica (LIESE, 1998).

A segunda camada refere-se à uma película que está localizada na derme, próximo a epiderme e denominada camada interna. Sua composição baseia-se em células do parênquima que caracterizam-se por serem grossas e lignificadas. As células

que circundam os feixes vasculares tem por função amortecer e contribuir para a elasticidade dos colmos, caso não existissem os bambus seriam inflexíveis e frágeis (LOPEZ, 2003).

A terceira divisão refere-se a uma camada de tecido base localizada entre a camada intermediária e a central. Estende-se em toda porção fibrovascular do bambu e é a região formada pelo material lenhoso do colmo. A quarta refere-se aos feixes vasculares e a parede da cavidade que está localizada na parte central. A constituição desses elementos dividem-se em: 50% de parênquima; 40% de fibras e 10% de tecidos, vasos e tubos perfurados (LIESE, 1985).

2.1.2.1 As células parenquimáticas

Com base em FILHO e AZZINI (1987) e LIESE (1998), existem as células alongadas que apresentam-se com parede mais espessa e tornam-se lignificadas nos primeiros estágios de crescimento dos colmos. Além delas existem as células curtas que caracterizam-se por possuírem paredes delgadas e são isentas de lignificação mesmo nos colmos adultos. As células alongadas e curtas podem ser visualizadas na figura 2.7 (a). As células do parênquima apresentam-se com elevadas quantidades de amido que podem ser visualizadas na figura 2.7 (b) e (c).

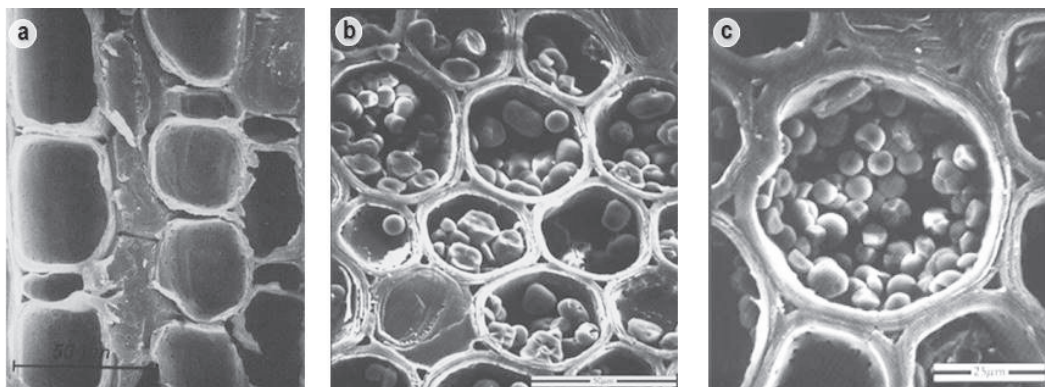


Figura 2.7: (a) parênquima na seção longitudinal, células alongadas e curtas. (b) e (c) células do parênquima com grãos de amido. Adaptado de (LIESE, 1998).

2.1.2.2 Os feixes fibrovasculares

Os feixes fibrovasculares podem ser visualizados macroscopicamente no corte transversal. Pode-se observar que há variação dentro da parede do colmo, conforme ilustrado na figura 2.8. São maiores em diâmetro e em menor número nas camadas internas, tornando-se menores e numerosos nas camadas externas (LIESE, 1998).

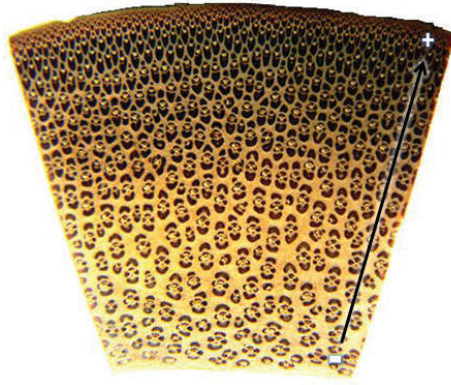


Figura 2.8: Variação dos feixes na parede do colmo (MARINHO, 2013).

Conforme figura 2.9, dentro dos feixes vasculares os vasos (metaxilema) têm a finalidade de transportar água do rizoma para as folhas. Os floemas conduzem nutrientes das folhas para as células do parênquima no rizoma e no colmo. O protoxilema que está situado entre os dois vasos do metaxilema, tem a função de transportar a água ao broto. O topo do colmo tem densidade específica mais elevada por possuir maior número de feixes fibrovasculares e menor de parênquima (NOGUEIRA, 2008).

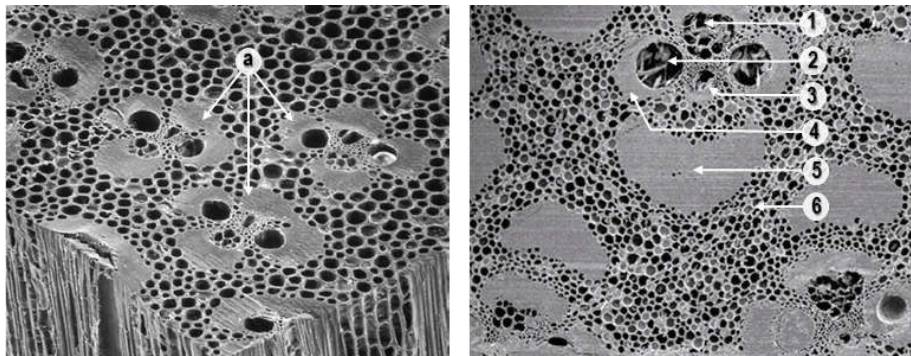


Figura 2.9: (a) feixes fibrovasculares: 1) floema. 2) metaxilema. 3) protoxilema. 4) esclerênquima. 5) feixes de fibras. 6) tecido parenquimatoso (LIESE, 1985).

2.1.2.3 As fibras

De acordo com GRECO e CROMBERG (2011), o comprimento das fibras sofre variações e aumenta da parede externa para o meio, diminuindo na parte central em direção à parte interna. Fibras curtas localizam-se próximas dos nós e as maiores encontram-se nas regiões centrais dos entrenós. Essa diferenciação acontece devido ao posicionamento das fibras que no entrenó estão dispostas na direção longitudinal, conforme indicação da figura 2.10 (a). As fibras paralelas misturam-se deixando o nó com concentração de fibras em sentidos aleatórios, conforme indicação da figura 2.10 (b).

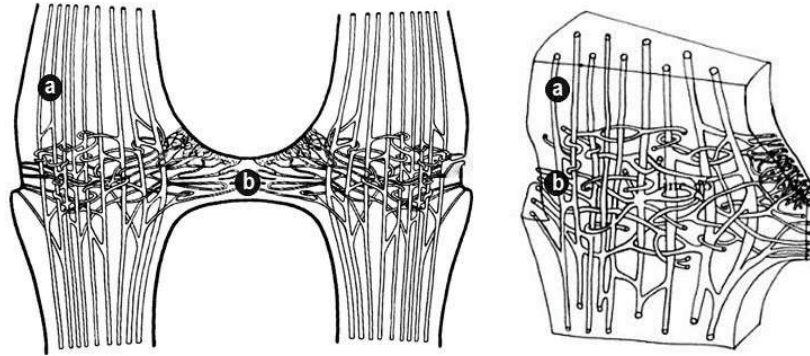


Figura 2.10: (a) Fibras paralelas na região do entrenó. (b) Fibras aleatórias na região do nó. Adaptado de GRECO e CROMBERG (2011) e (LIESE, 1985).

2.2 Composição química do bambu

Diversificando por espécies, idade, posição do colmo e as condições de crescimento há mudanças nos principais constituintes que formam a parede celular do bambu. Comumente dividem-se em: celulose (50 a 70%), hemicelulose (20 a 30%) e lignina (20 a 25%). Os constituintes secundários são os extrativos (5 a 10%) e resumem-se em: resinas, taninos, ceras e sais inorgânicos (LIESE, 1992). Além dessas composições existem também as nutricionais e dividem-se em: açúcares, proteínas, gorduras, aminoácidos e vitaminas (BAI, 1996). Os principais constituintes do bambu apresentam teores similares aos da madeira conífera (não frutífera) e estão apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Composição química do bambu e das coníferas (JANSSEN, 1981).

Componente (%)	Bambu	Conífera
Celulose	55	50
Lignina	25	25
Hemicelulose	15	17
Extrativos	05	08

A celulose apresenta cadeia longa, linear e constituída por elementos de carbono, hidrogênio e oxigênio, unidas por ligações de glicose que formam a celobiose (repetições da celulose) e podem ser reproduzidas n vezes ($n \leq 15.000$). A celulose encontrada no bambu é semelhante a da madeira, fornecendo estrutura à planta. Caracteriza-se como o componente de maior importância na parede celular (KLOCK *et al.*, 2005).

PIMENTA (2005) explica que várias moléculas de celulose unidas e paralelas originam as microfibrilas. As microfibrilas dão origem as fibrilas que formam as fibras de celulose. As cadeias formadas aglomeram-se na forma de fibrilas e resultam em regiões cristalinas, gerando rigidez no sistema. O esquema da estrutura da biomassa lignocelulósica pode ser visualizado na figura 2.11.

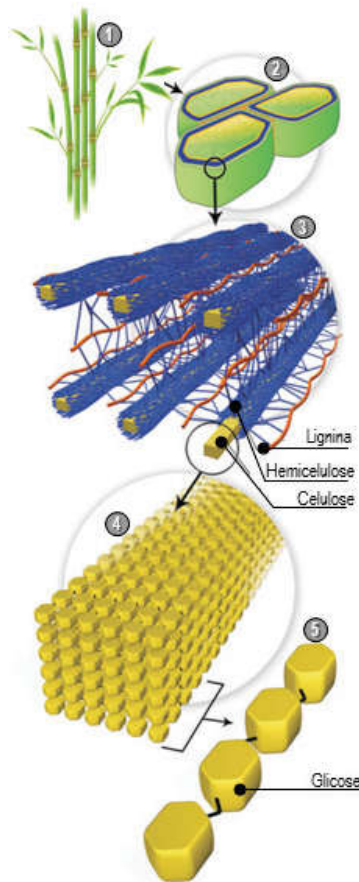


Figura 2.11: Estrutura da biomassa: 1) Biomassa. 2) Célula vegetal. 3) Parede celular. 4) Microfibrila. 5) Glicose. Adaptado de (SANTOS *et al.*, 2012).

De acordo com FENGEL e WEGENER (1983), as hemiceluloses são heteropolissacarídeos ramificados e são formados de cinco açúcares. Apresentam estrutura semelhante à celulose e suas massas moleculares são menores. ROWELL *et al.* (2005) esclarece que elas atuam como conexões entre as moléculas de glicose e lignina, contribuindo para os componentes das plantas.

A lignina é classificada como polímero amorfo, heterogêneo e aromático. É encontrada na lamela média e sua principal função é unir as células dos tecidos vegetais e agir como impermeabilizante, facilitando o transporte de água e nutrientes para as partes da planta (PIMENTA, 2005).

ROWELL *et al.* (2005) afirmam que os extrativos são moléculas com baixo peso e são responsáveis pelo aroma, coloração e durabilidade das biomassas. Estão localizados nos canais resiníferos, no lúmen e na lamela média. Podem ser removidos com água quente ou fria e também com solventes orgânicos. Os principais extrativos são: os taninos, resinas, gorduras ácidas, açúcares e os fenóis (LATORRACA, 2000).

2.3 Propriedades e aplicações do bambu

2.3.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas do colmo de bambu com maior grau de interesse para aplicação na engenharia e arquitetura são: teor de umidade e massa específica. Quando os colmos selecionados e utilizados são maduros e secos, as propriedades melhoram em relação a resistência (PADOVAN, 2010).

2.3.1.1 Teor de umidade

Diversificando por espécies, os colmos imaturos apresentam maior teor de umidade do que os maduros. Quando recém cortados apresentam teores de 40 a 150%. Colmos jovens possuem teor de umidade constante ao longo da altura. Colmos maduros apresentam valores elevados na região basal, que decresce em direção a região apical. Os entrenós apresentam teor de umidade mais elevado que os nós. Ao longo da parede do colmo o teor é maior na parte interna, diminuindo em direção a casca (LOPEZ, 2003). Posterior ao corte é necessário que o bambu passe por secagem ao ar livre. Assim o material irá atingir um teor de umidade de 10 a 15% (BERALDO *et al.*, 2003). Na tabela 2.2 é possível observar os valores do teor de umidade diferenciado por região e espécie analisada.

Tabela 2.2: Valores em %, do teor de umidade das espécies *Guadua Spp* e *D. Giganteus*. Adaptado de (MURAD, 2011) e (GHAVAMI e TOLEDO FILHO, 1992).

Região	<i>Guadua Spp</i>	<i>D. Giganteus</i>
Basal	15,30	19,50
Intermediária	13,30	18,90
Apical	13,90	13,90
Média	14,17	17,43

2.3.1.2 Massa específica aparente

De acordo com PEREIRA (2012) e MARINHO (2013), a massa específica aparente do bambu comumente varia de 0,50 a 0,90 g/cm^3 . Está diretamente relacionada a região do colmo ao qual foi retirada a amostra e quanto mais próximo da parede externa maior será o seu valor. Um solo fértil, clima úmido e quente, são condições que favorecem o crescimento do colmo, porém, os feixes fibrovasculares apresentam-se em menor escala, com menor quantidade de tecidos e conseqüentemente com menor massa específica. Em solos áridos com clima seco e temperaturas baixas,

o bambu desenvolve-se com aparência delgada, com feixes fibrovasculares densos e elevadas taxas de tecidos, resultando em altos valores de massa específica.

PEREIRA (2006) ensaiou ripas laminadas de bambu com e sem a presença de nós, considerando as três diferentes regiões do colmo. Com base na tabela 2.3 os resultados mostram que a massa específica aparente apresenta valores superiores nas ripas com nó. A região basal caracteriza-se por apresentar valores inferiores aos das regiões intermediária e apical.

Tabela 2.3: Massa específica aparente (ρ) em g/cm^3 (PEREIRA, 2006).

Região	ρ sem nó	ρ com nó
Basal	0,76	0,82
Intermediária	0,84	0,91
Apical	0,84	0,90

2.3.2 Propriedades mecânicas

GHAVAMI (1989), LIESE (1998) e JANSSEN (2000) comentam que o colmo do bambu apresenta boas características mecânicas. As propriedades mecânicas são diretamente influenciadas pelo teor de umidade da biomassa, principal responsável pela resistência. Dependem também da espécie, idade do colmo na época de corte, localização da amostra no colmo e ausência ou presença de nós.

Nos estudos de PEREIRA (2001) e conforme exposto na tabela 2.4, nota-se a diferença da resistência mecânica de algumas espécies de bambu. Pode-se perceber que a espécie *Dendrocalamus asper* que foi utilizada nesta pesquisa, apresenta o dobro de resistência à tração quando comparada as espécies *Dendrocalamus giganteus* e *Guadua superba*. A resistência à compressão para qualquer espécie estudada é três vezes menor que a resistência à tração.

Tabela 2.4: Resistência (em MPa) de espécies de bambu (PEREIRA, 2001).

Espécie	Tração	Compressão	Flexão	Cisalhamento
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	135	40	108	46
<i>Dendrocalamus asper</i>	285	28	89	6,6
<i>Bambusa multiplex</i>	103	27	75	56
<i>Bambusa tuldoides</i>	111	34	93	54
<i>Bambusa vulgaris</i>	82	27	78	41
<i>Bambusa schrad</i>	149	46	124	41
<i>Bambusa arundinacea</i>	297	34	76	9,5
<i>Guadua superba</i>	130	42	102	48
<i>Gigantochloa verticillata</i>	237	29	82	8,0

GHAVAMI e MARINHO (2005) realizaram testes com colmos inteiros da espécie *Guadua Angustifolia*. Na tabela 2.5 é apresentado os valores obtidos em resistência à compressão (F_c) e tensão máxima de tração (σ_u). Confirmou-se que o bambu apresenta dimensões graduais no sentido da base para o topo e do diâmetro para a espessura da parede. A resistência à compressão é de modo geral três vezes menor que a resistência à tração. A resistência média à compressão foi de 29,48 MPa, com aumento da região basal para apical. A resistência média à tração foi de 86,96 MPa.

Tabela 2.5: Resistência mecânica à compressão e à tração (MPa) em diferentes regiões do colmo da espécie *Guadua Angustifolia* (GHAVAMI e MARINHO, 2005).

Região	F_c	σ_u
Basal sem nó	28,36	93,38
Basal com nó	25,27	69,88
Intermediária sem nó	31,77	95,80
Intermediária com nó	28,36	82,62
Apical com nó	25,27	115,8
Apical sem nó	31,77	64,26

PEREIRA (2012) comenta que a idade ideal para uso do colmo é com cinco anos, quando ele encontra-se no ápice do seu desenvolvimento. LIESE (1998) explica que em termos de resistência os colmos apresentam aumento até o sexto ano. Colmos com idade de oito anos ou mais apresentam resistência elevada à flexão.

2.4 Bambu *in natura* e em compósitos

O bambu pode ser utilizado em sua forma natural ou processado. As aplicações são diversificadas: construções, painéis, biocompósitos, mobiliários, etc. Na figura 2.12, estão ilustradas duas obras que utilizam os colmos como elemento estrutural.



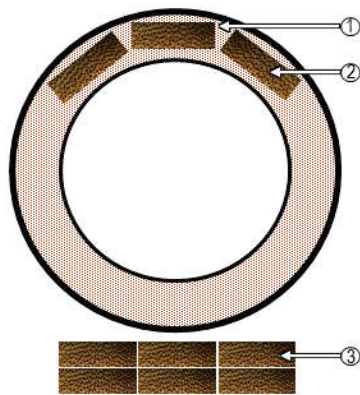
(a) Extraído de: <http://www.bamboodna.com/>



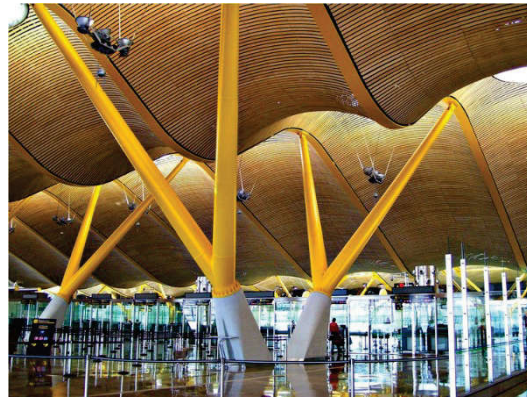
(b) Extraído de: <http://ibuku.com/>

Figura 2.12: (a) Autor: Bamboodna, EUA. (b) Autor: Ibuku, Indonésia.

MOIZÉS (2007) exemplifica uma forma de utilização do material baseada na produção de laminados. Dos colmos são retirados pequenos pedaços próximo a área externa do material, conforme ilustrações da figura 2.13 (a). Essas lâminas são formadas por um conjunto de camadas e posterior ao processamento podem ser utilizadas na fabricação de móveis, painéis, pilares, vigas e revestimento de coberturas, conforme mostrado na figura 2.13 (b).



(a) 1) Colmo. 2) Lâmina. 3) Peça.



(b) Cobertura do Aeroporto de Barajas, Madrid.

Figura 2.13: Ilustração do processo de confecção e aplicação do laminado de bambu. (MOIZÉS, 2007) e disponível em: www.edreams.pt/blog/, respectivamente.

LOPEZ (2003) ilustrou a técnica vernacular taipa de mão onde as ripas de bambu são trançadas no sentido vertical e horizontal. A estrutura é montada em quadros de colmos amarrados que recebem pastas cimentícias como fechamento. A técnica pode ser adaptada dependendo da região e disponibilidade de matéria-prima. A figura 2.14 ilustra as etapas construtivas de uma residência em Bogotá, na Colômbia, onde utilizou-se bambu como elemento de estrutura e arrames que foram unidos com sacos de fibras de sisal, onde aplicou-se argamassa fibrosa como fechamento.



(a) Bambu, arrame e fibras.



(b) Aplicação da argamassa.



(c) Residência finalizada.

Figura 2.14: Residência em Bogotá, Colômbia, extraído de <https://www.zuarq.co/>

Outro exemplo de utilização da taipa de mão foi a execução de um edifício localizado na cidade de Guadalajara, no México, conforme mostra a figura 2.15. Moldes de madeira foram utilizados como suporte que foram preenchidos por taliscas de bambu no sentido horizontal e receberam fechamento com argamassa fibrosa. A técnica foi adaptada para conseguir empregar os materiais comumente encontrados na região.



(a) Madeira e bambu. (b) Aplicação da argamassa. (c) Edifício finalizado.

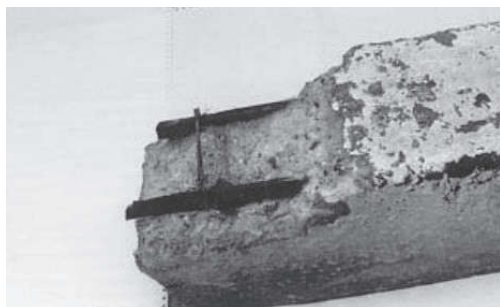
Figura 2.15: Edifício em Guadalajara, México. Extraído de www.archdaily.com

NAVARRO (2002) estudou o comportamento de lajes de concreto reforçadas com bambu. O vão utilizado no estudo era de 3,50 m com alturas e larguras variadas em razão do diâmetro dos colmos. Os primeiros testes realizados consideravam a metade da seção transversal do bambu, conforme ilustrado na figura 2.16 (a) e apresentaram baixa resistência ao cisalhamento (10,89 MPa). Um novo protótipo foi executado visando melhorar o conjunto onde foram utilizados os diafragmas inteiros, conforme ilustrado na figura 2.16 (b). Também foram adicionadas tiras de bambu intercaladas com aço nos vãos dos entrenós. O método que está ilustrado na figura 2.16 (c) permitiu alcançar o dobro da resistência inicial.



Figura 2.16: (a) Seção transversal do bambu. (b) Diafragma inteiro, reforçado com tiras de bambu e aço. (c) Protótipo finalizado. Adaptado de (NAVARRO, 2002).

GHAVAMI (2005) mostrou que o bambu pode substituir o aço das armaduras do concreto de maneira satisfatória, devido à baixa densidade e resistência equivalente a 1/5 do aço. Em sua pesquisa foram submetidos ao teste duas colunas com diferentes idades. A primeira que era de bambu com quinze anos de idade, mostrada na figura 2.17 (a) e manteve-se em bom estado após esse período. A segunda era de aço com dez anos de idade, mostrada na figura 2.17 (b) e apresentou-se com elevada deterioração após esse período, fato justificado pela corrosão da armadura de aço.



(a) Concreto reforçado com bambu (15 anos).



(b) Concreto reforçado com aço (10 anos).

Figura 2.17: Aspectos dos concretos reforçados com bambu e aço (GHAVAMI, 2005).

PEREIRA e BERALDO (2007) comentam que os bio-concretos produzidos a partir de partículas de bambu e cimento podem ser utilizados em construções, com e sem reforço na matriz. Conforme 2.18 (a) e (b) dentre as alternativas testadas pelos pesquisadores, as aplicações em pisos, blocos, telhas e placas foram satisfatórias e indicadas para uso. MARTINS (2002) realizou experimentos avaliando as propriedades do bio-concreto para confecção de piso. Os resultados mostraram que a aplicação em pavimentação atendeu satisfatoriamente as normas específicas e o acabamento do material produzido pode ser visualizado na figura 2.18 (c).



(a) Bio-concreto de bambu.



(b) Placas de bio-concreto.



(c) Piso de bio-concreto.

Figura 2.18: Aparência dos bio-concretos produzidos com bambu e as possibilidades de aplicações (PEREIRA e BERALDO, 2007) e MARTINS (2002), respectivamente.

2.4.1 Resíduos de biomassa de bambu

No processo de seleção dos colmos para utilização na forma natural é necessário escolher colmos uniformes e retilíneos, resultando na ocorrência de resíduos quando o material não apresentar-se com uniformidade. Os colmos com características irregulares ou retorcidos que são semelhantes aos mostrados na figura 2.19, não serão adequados para serem utilizados em obras que empregam os colmos como elemento estrutural.



Figura 2.19: Colmos irregulares e inadequados para utilização em estruturas.

O montante mais significativo de resíduos de bambu ocorre no processamento do colmo durante o método da laminação. KRAVCHENKO *et al.* (2015) salienta que no processo de confecção do bambu laminado há produção aproximada de 40% de resíduos, sobras e fragmentos. LAHR *et al.* (2015) comenta que a falta de processamento mecânico adequado e automação do bambu acaba gerando grandes quantidades de resíduos, que podem agravar os problemas ambientais caso o seu destino não for apropriado.

A utilização dos resíduos de bambu gerados e oriundos de diferentes processamentos do colmo, torna-se uma alternativa adequada que dispensa a utilização do material uniforme e retilíneo. O uso das sobras e fragmentos reduz o volume de resíduos destinados a aterros e apresenta-se como uma alternativa para a produção de novos produtos, como por exemplo os materiais compósitos com partículas de biomassa vegetal e cimento.

2.4.2 Compósito de biomassa vegetal e cimento

TOLEDO FILHO (1997) explica que a utilização de fibras como reforço em matrizes frágeis é uma técnica antiga, sendo suas primeiras utilizações aplicadas com palha e capim para produção de adobes. Há uma diversidade de fibras que podem ser empregadas como reforço de matrizes à base de cimento, incluem-se: fibras poliméricas, metálicas, minerais e vegetais. HULL e CLYNE (1996) descrevem os materiais compósitos como aqueles formados por dois ou mais elementos de diferentes constituições, particularidades, estruturas e que apresentam associações de materiais rígidos e resistentes.

BERALDO (2011) comenta que o compósito é constituído por uma matriz cimentícia que pode ser originada por pastas, argamassas ou concretos. Eles são reforçados com partículas de biomassas vegetais de diferentes origens, por exemplo a biomassa de bambu, agregando propriedades não disponibilizadas pela matriz. Os compósitos podem ser constituídos de aglomerantes ou ligantes minerais combinados com partículas vegetais e outros aditivos (aceleradores de pega, super plastificantes, agente modificador de viscosidade, etc.). À medida que as proporções entre os componentes e o tamanho das partículas são modificados, amplia-se as opções de aplicações do produto.

As matrizes a base de cimento podem ser incorporadas às fibras como reforço primário e secundário. Em produtos que apresentam espessura pequena, quando as barras tradicionais não podem ser empregadas, funcionam como reforço primário. Nessas condições as fibras agem para aumentar a resistência e ductilidade do compósito. Como reforço secundário, são aplicadas em pavimentos e lajes. Nessas situações as fibras atuam para controlar a fissuração causadas por mecanismos externos (TOLEDO FILHO, 1997).

2.4.3 Compatibilidade entre cimento e biomassa vegetal

A expressão compatibilidade quando utilizada na área da construção civil, no caso de compósitos, refere-se a pega do cimento depois de ser misturado com água e partículas de biomassa (CASTRO, 2015). Existem pesquisas com enfoque nos mecanismos que podem levar a inibição da pega do cimento quando utiliza-se esse aglomerante combinado com diferentes fontes de biomassa vegetal.

SIMATUPANG (1978) citado por MENDES *et al.* (2015) comenta que no caso da madeira, os extrativos presentes na sua composição são os principais responsáveis pela inibição da solidificação do cimento. Reações similares foram observadas por

BERALDO (1994) que utilizou partículas de bambu, a biomassa apresentou comportamento desfavorável quando foi utilizada em seu estado natural e sem tratamento, influenciando negativamente a pega das pastas de cimento. As partículas mostraram-se inibitórias à pega em virtude da sua constituição química que é composta de extrativos.

PIMIENITA (1994) explica que devido a cristalinidade da celulose possivelmente ela não reaja ao cimento. A lignina não apresenta efeito inibitório. Os açúcares simples (glicose, galactose e manose) podem inibir a pega e a hidratação por motivos distintos. LIEBER e RICHARTZ (1972) citado por BERALDO (2011) comentam que o teor de açúcar de 0,5% já é suficiente para inibir a pega do cimento.

A presença de 1% de glicose também é suficiente para uma completa inibição (SIMATUPANG, 1986) citado por (BERALDO, 2011). O ambiente alcalino do cimento pode contribuir para a modificação da hemicelulose e dos polímeros de açúcar, provocando problemas na pega. Os extrativos solúveis em água migram para a superfície da biomassa formando uma camada sobre os grãos de cimento, reduzindo as ligações de hidrogênio e afetando a pega (BERALDO E CARVALHO, 2004) citado por (SOUZA, 2006).

2.4.4 Tratamentos para melhorar a compatibilidade

Para minimizar ou eliminar os efeitos nocivos e inibidores das biomassas na hidratação do cimento, algumas soluções foram sugeridas e testadas por pesquisadores. BERALDO (1994) constatou que a utilização de cimento com alta resistência inicial é menos sensível a ação dos extrativos e que há necessidade de lavagem em água quando não adota-se a mineralização nas biomassas. GRAM (1986) citado por DA GLORIA (2015) propôs a substituição do cimento Portland por aglomerantes com alto teor de alumínio.

BERALDO (1997) avaliou o efeito de diferentes tratamentos em partículas de bambu. Para remover os extrativos da biomassa, as partículas foram lavadas em água a 80°C por 2 horas. Além disso foi adotado o cloreto de cálcio (CaCl_2) com o objetivo de acelerar a pega do cimento (3% em relação à massa de cimento). As partículas foram imersas em solução aquosa a 5% de silicato de sódio ($\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si}$) e seguidas de imersão em solução saturada a 30% de sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), mineralizando o material. Foram avaliados os efeitos dos tratamentos quando se utilizou dois tipos de cimento: o CP V ARI com alta resistência inicial e o CP II E composto com escória de alto forno. O cimento CP V ARI em conjunto com a biomassa vegetal lavada em água mostrou-se com as melhores propriedades mecânicas.

ZUCCO (1999) submeteu frações de casca de arroz em diferentes tratamentos. O tratamento com maiores contribuições para minimizar a inibição da pega foi a lavagem em água a 80°C por 2 horas. Segundo BERALDO (2011) existem pesquisas que utilizam aceleradores para minimizar o efeito inibitório. Os mais empregados são o cloreto de ferro (FeCl_3), o sulfato de ferro ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), o cloreto de magnésio (MgCl_2) e o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

DA GLORIA (2015) obteve compatibilidade entre a serragem de madeira e o cimento para fabricação de painéis sanduíches. As partículas de madeira foram lavadas em água quente a 80°C por 1h. Na moldagem foi utilizado o cloreto de cálcio (3% em massa) para acelerar a pega do cimento. Os procedimentos foram fundamentais para que houvesse a pega do cimento e tornando-se possível a desmoldagem após um dia de moldagem.

2.4.5 Durabilidade dos compósitos de biomassa e cimento

Uma das preocupações para o uso de compósitos de biomassa e cimento referem-se a durabilidade. Alguns produtos apresentam perda de rigidez e resistência ao longo do tempo. Os problemas de durabilidade estão relacionados com a degradação da biomassa, que podem ser causados pelo ataque alcalino da fibra, variação do volume fibroso em virtude da absorção de água e a mineralização causada pela migração dos produtos hidratados do cimento para o interior das fibras (LIMA, 2004).

TOLEDO FILHO *et al.* (2000) estudaram a durabilidade de fibras de sisal e coco expostas a soluções alcalinas. Observaram que após 420 dias as biomassas haviam perdido completamente a flexibilidade e a resistência. A degradação deve-se à migração do hidróxido de cálcio para os poros das fibras.

SARMIENTO (1996) e LIMA (2004) para diminuir o ataque alcalino às fibras na matriz de cimento, substituíram o cimento Portland comum por aglomerantes de baixa alcalinidade produzidos sem clínquer, a partir de escória de alto forno ativada ou cinzas volantes. Nesse âmbito SILVA (2009) obteve matrizes com baixa quantidade de hidróxido de cálcio com substituição de 50% de cimento, por argila calcinada e reforçadas com fibras longas de sisal. Os compósitos não apresentaram nenhum sinal de degradação posterior aos 100 ciclos de molhagem e secagem.

LIMA (2004) substituiu 30% de cimento por metacaulinita para avaliar a durabilidade dos compósitos. Obteve uma matriz livre de hidróxido de cálcio e a substituição resultou em uma mistura trabalhável. As amostras que possuíam metacaulinita aumentaram a capacidade portante das placas após a fissuração e o mesmo compor-

tamento manteve-se após 12 e 25 ciclos de envelhecimento. Compósitos laminados duráveis, tenazes e com elevada resistência podem ser obtidos com a adição de fibras longas de sisal e com a substituição parcial do cimento por metacaulinita.

2.4.6 Compensação de água nos compósitos de biomassa

Com base na Lei de Abrams a resistência de pastas, argamassas e concretos está vinculada à relação água/cimento e influencia nas propriedades do material¹. A hidratação de materiais cimentícios pode ser completa quando as misturas forem armazenadas em locais adequados e quando a relação água/cimento for maior que 0,38 em massa. Nas relações maiores que 0,38 as misturas tendem a hidratar todo o cimento, mas podem surgir os poros capilares (NEVILLE, 1997) citado por (LATORRACA, 2000).

SOUZA (2006) explica que por apresentar elevada incidência de poros permeáveis, a anatomia das biomassas contém excessiva capacidade de absorção de água. Corroborando ao exposto WOLFE e GJINOLLI (1999) comentam que a água é o fator determinante principalmente em misturas que apresentam biomassa vegetal. Os autores sugerem a compensação de água mostrada na equação 2.1. Dessa maneira a quantidade de água será suficiente para que as fibras fiquem saturadas e facilitem a hidratação do cimento, assegurando à resistência do material. CAMPOS (1999) citado por SOUZA (2006) utilizou uma quantidade semelhante de água, conforme mostrado na equação 2.2 para a produção de compósito cimento madeira. Para os autores a compensação de água acontece em função das condições e procedência da biomassa, como por exemplo, o grau de umidade.

LATORRACA (2000) esclarece que é necessário acrescentar água até o ponto de saturação das fibras. A quantidade utilizada deve levar em consideração o teor de umidade da biomassa e o autor adotou a equação 2.3 apresentada por MOSLEMI e PFISTER (1987), para moldagem dos materiais produzidos em sua pesquisa. Essa mesma proporção foi utilizada por PARCHEN (2013) e de acordo com o autor, a relação de $0,35 M_c$ precisou ser adaptada para $0,50 M_c$, em função da umidade das partículas de madeira utilizadas, que apresentaram maior demanda de água.

¹Extraído de <http://www.comunidadeconstrucao.com.br/upload/ativos/75/anexo/2relac.pdf>

$$A_t = 0,25 \times M_c + 0,5 \times M_s \quad (2.1)$$

$$A_t = 0,25 \times M_c + 1,23 \times M_s \quad (2.2)$$

$$A_t = 0,35 \times M_c + (0,30 - T_u) \times M_s \quad (2.3)$$

Onde :

A_t = água total

M_c = massa de cimento (Kg)

M_s = massa de biomassa seca (Kg)

T_u = teor de umidade da biomassa (%)

2.4.7 Vantagens dos compósitos cimentícios de biomassa

De acordo com WOLFE e GJINOLLI (2006), os compósitos de biomassa vegetal e cimento apresentam diversas possibilidades de aplicações e variedades de formas. Quando possuem superfícies duráveis e resistentes são sugeridas aplicações em telhados, pisos ou tapumes. Quando são sensíveis e menos resistentes são utilizados como blocos de vedação sem função estrutural.

FRYBORT *et al.* (2008) explica que pode-se utilizar diferentes fontes de partículas de biomassa aliadas ao cimento para haver um ganho na resistência e no isolamento térmico e acústico de diferentes materiais. MATOSKI (2005) esclarece que quanto maior a superfície da biomassa maior será a quantidade de cimento utilizada, porque a biomassa terá um maior consumo de pasta de cimento em volta dela.

LIPINSKI (1994) citado por MATOSKI (2005) comenta que os compósitos cimentícios de biomassa possuem aceitação no mercado e são mais duráveis quando comparados às biomassas isoladas. Isso acontece porque os materiais em conjunto abrangem propriedades almeçadas da biomassa e do cimento. LIMA (2005) expõe que a finalidade da produção de materiais compósitos é conciliar as propriedades da matéria-prima individual para a confecção de um novo protótipo, com particularidades e condições de resistência superiores as constituições dos materiais isolados. As características desejadas do cimento e das biomassas estão expostas na figura 2.20.

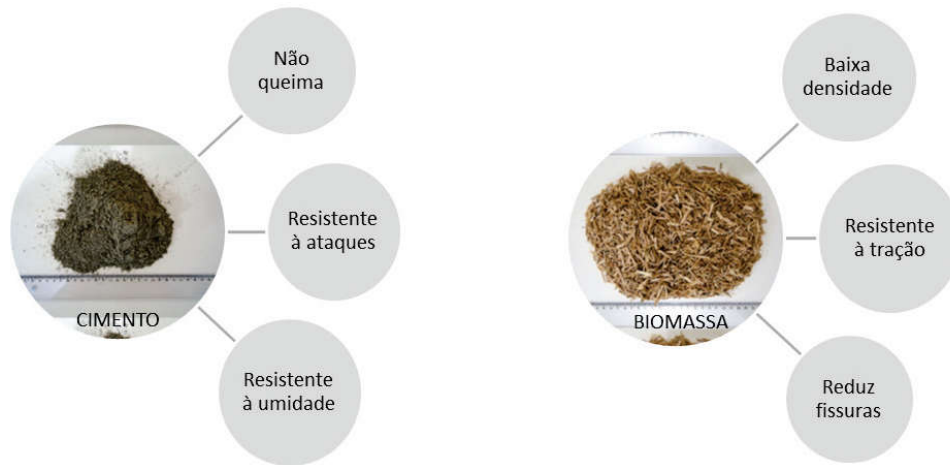


Figura 2.20: Propriedades desejadas do cimento e biomassas na fabricação de materiais compósitos. Adaptado de (LIPINSKI, 1994) citado por (MATOSKI, 2005).

Segundo KURPIEL e MOSLEMI (1994), as principais vantagens dos compósitos cimentícios com biomassa vegetal e que tornam seu uso vantajoso, são:

- Disponibilidade de matéria-prima no Brasil e no mundo;
- O material pode ser serrado e receber furos;
- Apresenta boas características mecânicas;
- Possui baixa massa específica (variando de 400 a 1500 kg/m³);
- Apresentam isolamento térmico e acústico;
- Exigem a mesma quantidade de mão - de - obra de outros processos;
- Baixa perda de material durante o acabamento;
- Os materiais utilizados no processo não são tóxicos;
- Não há formação de poeira na execução;
- Facilidade de manuseio;
- Soluções para os resíduos de biomassa vegetal gerados;
- Substitui as chapas de cimento amianto.

2.4.8 Produção dos compósitos cimentícios de biomassa

Segundo MATOSKI (2005) usualmente os compósitos cimentícios de biomassa são compostos de cimento, biomassas na forma de partículas, água e aditivos químicos. O cimento tem a função de atuar como aglomerante propiciando características físico-mecânicas de resistência e durabilidade. A biomassa tem a função de melhorar a resistência à flexão, diminuir a densidade e favorecer outras propriedades como o isolamento térmico e acústico. Os aditivos e eventualmente as adições atuam como facilitadores do conjunto.

Uma propriedade importante dos compósitos cimentícios de biomassa são os métodos utilizados para a sua produção. Tanto no panorama nacional como internacional, comumente são utilizados os procedimentos de fabricação baseados na prensagem manual e na prensagem industrial, ambos utilizando sistemas e equipamentos específicos que demandam gastos elevados de energia em cada etapa do sistema.

No processo de prensagem manual mostrado na figura 2.21, o compósito fresco é compactado manualmente nos moldes com o auxílio de soquetes que usualmente são empregados na preparação de amostras que utilizam cimento.

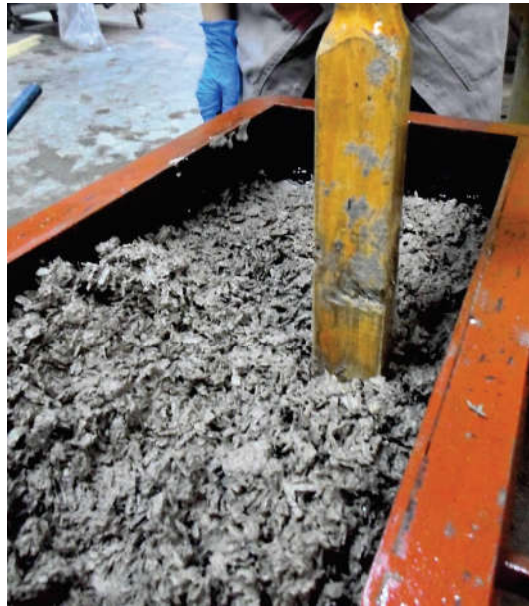


Figura 2.21: Sistema de prensagem manual cimento-biomassa.

No processo de prensagem industrial mostrado na figura 2.22, as biomassas são misturadas com o cimento e a água. O conjunto forma um colchão à seco e é prensado à frio com o auxílio de prensas que atingem determinadas temperaturas e cargas. Após a prensagem os colchões são grampeados e passam pelo processo

de cura que depois do tempo da cura os grampos são retirados (MOSLEMI, 1999). Esse sistema de fabricação foi desenvolvido pela BISON (fábrica alemã) e a partir dele outros desenhos foram desenvolvidos (MATOSKI, 2005).

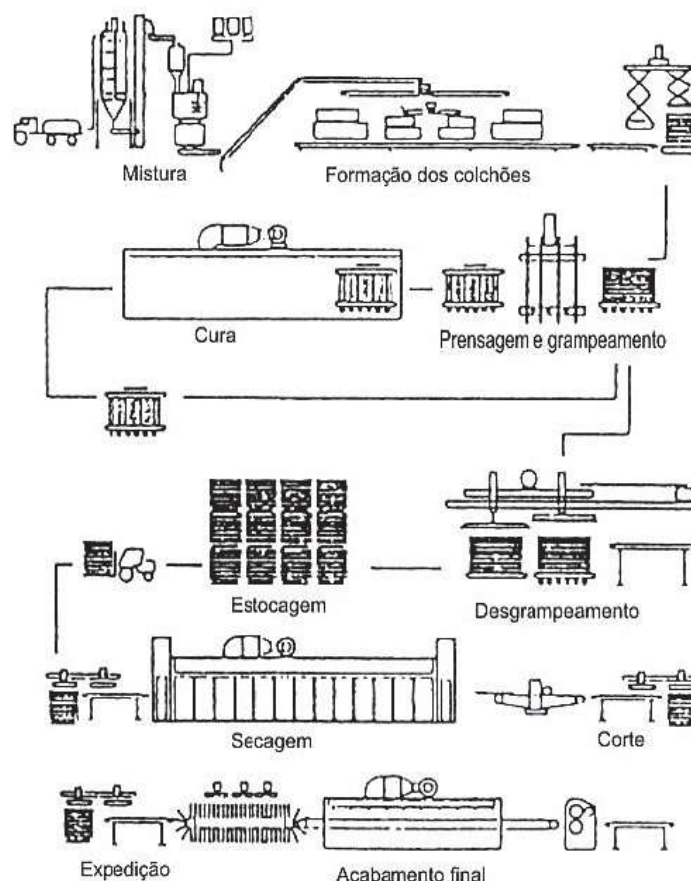


Figura 2.22: Sistema de prensagem industrial cimento-biomassa (MATOSKI, 2005).

No processo de prensagem industrial há gastos contínuos de energia durante os procedimentos empregados. No processo de prensagem manual há gastos menores mas, a energia empregada no método não pode ser quantificada e reproduzida com precisão e controle. Uma alternativa para a produção de compósitos de biomassa vegetal e cimento é empregar técnicas convencionais de produção de concreto. Dessa forma, o consumo de energia será menor e consequentemente alcança-se uma elevada trabalhabilidade e moldabilidade. Como efeito o método apresenta-se com racionalidade resultando em praticidade e rapidez de execução.

No próximo capítulo estão apresentadas as diretrizes e os procedimentos sugeridos e adotados para a produção dos bio-concretos. Propõe-se um método de moldagem que dispensa a prensagem industrial e manual, tornando-se uma possibilidade viável de aplicação em compósitos que utilizam diferentes fontes de biomassa vegetal.

Capítulo 3

Materiais e métodos experimentais

3.1 Procedência da matéria-prima

Nesta pesquisa foram utilizados resíduos de bambu da espécie *Dendrocalamus asper* oriundos do Rio Grande do Sul. Os resíduos eram pedaços e sobras em formato de taliscas, provenientes do processamento dos colmos utilizados em uma indústria madeireira, conforme mostrado na figura 3.1.



Figura 3.1: Resíduos com dimensões variadas.

3.2 Produção das partículas de bambu

Foram testados diferentes equipamentos para obter-se as partículas em tamanho de agregado miúdo. O equipamento utilizado para redução das taliscas de bambu em partículas foi um triturador de construção civil da marca Fragmaq (figura 3.2 a) do Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) da COPPE/UFRJ. O equipamento possui dois eixos (figura 3.2 b) que permitem o processamento e a trituração.



(a) Triturador industrial utilizado.

(b) Eixos de trituração.

Figura 3.2: Triturador industrial utilizado para trituração das taliscas de bambu.

As taliscas não fragmentaram de maneira uniforme. Observou-se que as taliscas com espessuras menores eram apenas fracionadas e esmagadas, conforme mostrado na figura 3.3 (a). Os pedaços não triturados foram selecionados e repassados no triturador, resultando em partículas menores mostradas na figura 3.3 (b). O material obtido no triturador resultou em partículas classificadas como agregado graúdo, já que 95% do material ficou retido na peneira de malha de 4,75 mm de abertura.



(a) Resultado da primeira trituração.

(b) Resultado da segunda trituração.

Figura 3.3: Aparência do material submetido no triturador industrial.

O moinho de martelos também foi testado mas não mostrou eficiência para a produção das partículas. A figura 3.4 mostra tanto as taliscas quanto os pedaços de bambu após o processamento no moinho de martelos.



(a) Taliscas após a trituração.

(b) Pedaços após a trituração.

Figura 3.4: Taliscas e pedaços de bambu após a trituração no moinho de martelos.

O equipamento que apresentou eficiência na redução das partículas de agregado graúdo (mostrado na figura 3.3 b) para miúdo foi o moinho de facas. O modelo utilizado foi o LP 1003 da marca Primotécnica conforme mostrado na figura 3.5 (a) e está localizado nas dependências do Instituto de Macromoléculas (IMA) da UFRJ. O equipamento possui uma tela de 9 mm permitindo controlar o tamanho das partículas e pode ser visualizado na figura 3.5 (b).

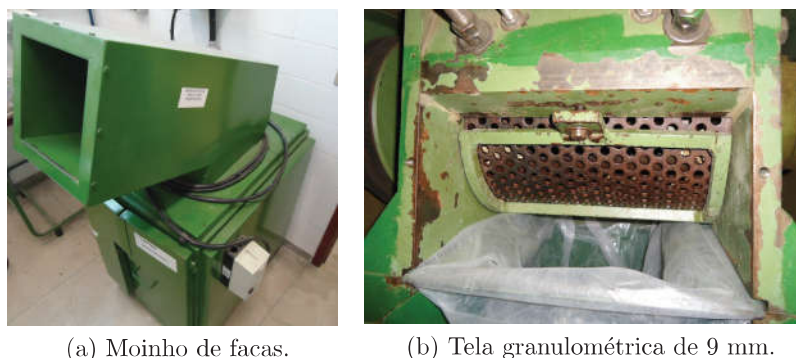


Figura 3.5: Moinho de facas utilizado na trituração do agregado graúdo de bambu.

Dessa maneira, o procedimento para obtenção das partículas de bambu constituiu-se de uma primeira trituração no triturador industrial de construção civil, seguido pela segunda trituração no moinho de facas.

3.3 Caracterização dos materiais

Os métodos adotados para a caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa estão apresentados e especificados neste capítulo.

3.3.1 Partículas de bio-agregados de bambu

3.3.1.1 Obtenção dos bio-agregados miúdos

Os bio-agregados resultantes da trituração no moinho de facas, foram levados para um peneirador mecânico contendo peneiras de malha quadrada para a obtenção dos agregados nas dimensões desejadas (entre 4,75 e 1,18 mm). O peneirador utilizado e as peneiras com os materiais retidos podem ser visualizados na figura 3.6.



(a) Peneirador mecânico. (b) Material retido na #4,75 mm. (c) Material retido na #1,18 mm.

Figura 3.6: Peneirador mecânico e os bio-agregados retidos em cada peneira.

Após o processo de peneiramento o material retido na peneira de #4,75 mm foi reprocessado no moinho de facas para evitar desperdícios. O material retido na peneira #1,18 mm foi integralmente utilizado, juntamente com os finos passante na peneira de #1,18 mm e que somaram 15% de todo o conjunto. As partículas passante e retida na peneira de #1,18 mm que foram utilizadas nesta pesquisa podem ser visualizadas na figura 3.7.



(a) Partículas retidas na #1,18 mm.

(b) Partículas finas passantes na #1,18 mm.

Figura 3.7: Partículas de bio-agregados utilizadas na pesquisa.

3.3.1.2 Homogeneização dos bio-agregados

Visando obter uma amostra homogênea, utilizou-se o método de homogeneização do tipo pilha alongada. A preparação deste tipo de pilha é realizada dividindo todo o material em quantidades iguais. O montante é espalhado em formato de uma pilha alongada com lançamentos em sentidos opostos, da esquerda para direita e vice-versa até que todo material seja disperso. Depois da distribuição total, as partículas

dispostas nas pontas são separadas e lançadas novamente na pilha. O processo de espalhamento está ilustrado na figura 3.8.



(a) Divisão do material em pilha.

(b) Finalização do espalhamento.

Figura 3.8: Homogeneização do tipo pilha alongada utilizado para os bio-agregados.

3.3.1.3 Características granulométricas

De acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 248/2003, foi determinado a composição granulométrica das partículas de bambu homogeneizadas. A distribuição granulométrica acumulada das partículas (retida e passante na peneira de #1,18 mm) está ilustrada na figura 3.9.

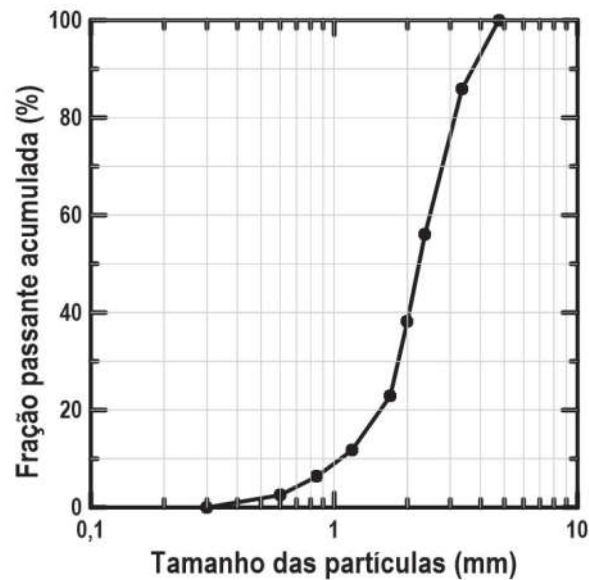


Figura 3.9: Curva granulométrica acumulada das partículas de bambu.

Os resultados obtidos indicam que o módulo de finura do bio-agregado de bambu é igual a 0,80. Com base na curva granulométrica as partículas apresentam um diâmetro D_{90} igual à 3,8 mm, D_{50} igual à 2,2 mm e D_{10} igual à 1,1 mm.

3.3.1.4 Massa específica, absorção de água e teor de umidade

A determinação da massa específica das partículas de bambu foi realizada com base na NBR NM 52/2009. As partículas foram imersas em água por 24h e secas ao ar, conforme mostrado na figura 3.10.

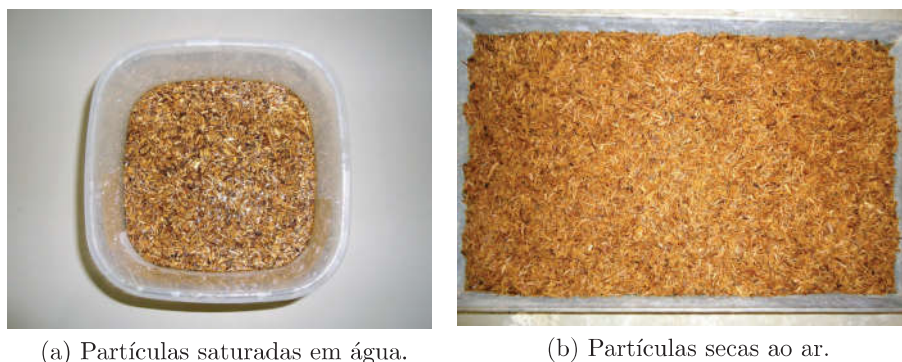


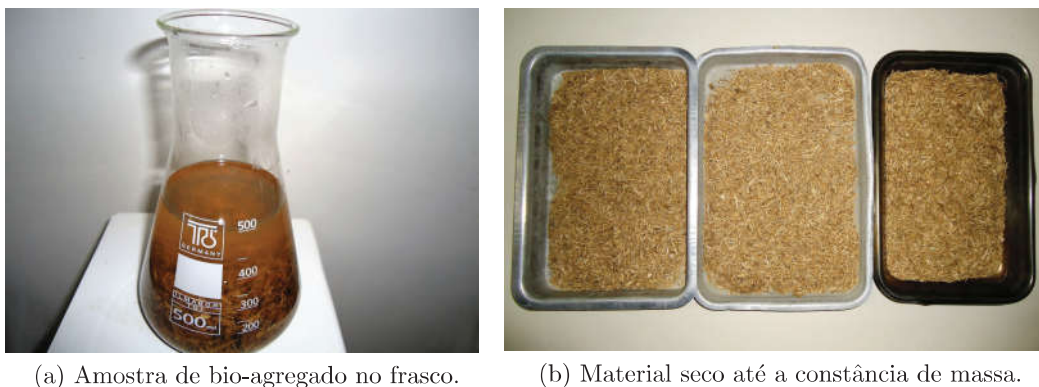
Figura 3.10: Partículas de bio-agregado saturadas em água e secas ao ar.

A umidade superficial foi determinada no tronco de cone conforme procedimentos descritos na NBR NM 52/2009 e ilustrados na figura 3.11 (a) e (b). O material superficialmente úmido e o efeito das partículas pode ser visualizado na figura 3.11 (c). Por apresentar muitos vazios entre as partículas, não houve desmoronamento do bio-agregado. Conforme ilustrado na figura 3.11 (d) os bio-agregados secos também foram testados e o material permaneceu íntegro.



Figura 3.11: Procedimentos realizados para a umidade saturada superfície seca.

Para as partículas de bambu, a umidade saturada superfície seca foi considerada quando as partículas apresentaram-se superficialmente secas ao toque. Nessas condições conforme mostra as imagens da figura 3.12, as amostras foram colocadas em um frasco que foi preenchido com água, condizente com os procedimentos citados na NBR NM 52/2009 e depois foram secas em estufa até atingirem a constância de massa.



(a) Amostra de bio-agregado no frasco.

(b) Material seco até a constância de massa.

Figura 3.12: Bio-agregado imerso em água e seco até a constância de massa.

Com os procedimentos citados e recomendados na NBR específica de cada análise, foi possível calcular a massa específica, a massa específica aparente e a absorção de água (baseado na NBR NM 53/2003). O teor de umidade do material foi calculado conforme as especificações da NBR 9939/2011. Amostras do bio-agregado foram colocadas na estufa em temperatura regulada à 110°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) até atingirem a constância de massa. O tempo necessário para a estabilização das partículas foi de 96 horas.

Os valores de massa específica (γ_g), massa específica aparente (γ_a), absorção de água (A_a) e teor de umidade (T_u) estão apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valores obtidos para os bio-agregados de bambu referentes a massa específica, massa específica aparente, absorção de água e teor de umidade.

γ_g (g/cm^3)	γ_a (g/cm^3)	A_a (%)	T_u (%)
1,43	0,58	109,14	11,01

3.3.1.5 Determinação da absorção de água com o tempo

A absorção de água das partículas de bambu com o tempo foram determinados a partir do desenvolvimento de uma técnica estabelecida para o bio-agregado. Com base na figura 3.13 (a) uma quantidade de partículas lavadas (3 ciclos; $T = 80^{\circ}\text{C}$ por 1h) e secas ($T = 40^{\circ}\text{C}$ por 48h) foi envolvida em um tecido de filó. A figura 3.13 (b) mostra o fechamento do conjunto onde uniu-se as extremidades do tecido com o auxílio de um elástico.



(a) Tecido do tipo filó com bio-agregado. (b) Fechamento do conjunto.

Figura 3.13: Preparação das partículas de bambu para o ensaio de absorção de água.

Como pode-se ver na figura 3.14 o material foi submerso em um *becker* com água e em intervalos de tempo pré estabelecidos. O conjunto era suspenso por 30 segundos para deixar escoar o excesso de água. Depois disso, a água superficialmente remanescente era eliminada com o auxílio de uma secadora manual a uma velocidade de 120 rotações por minuto.



(a) Material submerso. (b) Escoamento da água. (c) Secadora utilizada.

Figura 3.14: Sequência de procedimentos realizados no ensaio de absorção de água.

Durante os primeiros 20 minutos as pesagens eram realizadas a cada 2 minutos e depois aconteciam a cada 30 minutos, até atingirem 6 horas de ensaio. Depois desse intervalo as pesagens aconteceram a cada 4 horas, até observar a saturação dos bio-agregados. Dessa forma pode-se calcular o ganho de massa em função do tempo (equação 3.1) e a absorção de água do bio-agregado de bambu (equação 3.2).

$$G_m = M_t - M_i \quad (3.1)$$

$$A_a = \frac{M_t - M_i}{M_i} \times 100 \quad (3.2)$$

Onde :

G_m = ganho de massa em um tempo t (g)

A_a = absorção de água em um tempo t (%)

M_i = massa inicial das partículas secas (g)

M_t = massa das partículas em contato com água em um tempo t (g)

De acordo com os resultados apresentados na figura 3.15, pode-se perceber que a maior parte da absorção de água acontece nos primeiros 20 minutos (75%). Após 5 minutos de ensaio as partículas já haviam absorvido cerca de 65% de água. Em 24 horas houve absorção de 110,57%, valor próximo ao encontrado utilizando-se o método baseado na NBR NM 53/2003, que indicou uma absorção de água de cerca de 103,52%. A diferença de cerca de 5% deve-se a umidade saturada superfície seca considerada quando utilizou-se os bio-agregados superficialmente secos ao toque.

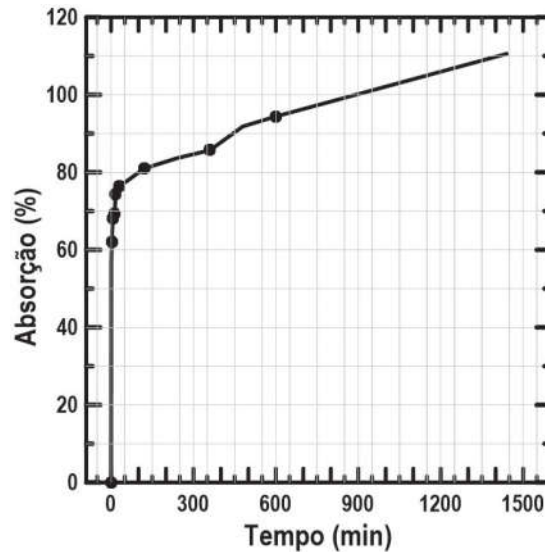


Figura 3.15: Curva de absorção de água no tempo para as partículas de bambu.

3.3.1.6 Morfologia dos bio-agregados de bambu por AIMS

O ensaio de morfologia dos bio-agregados foi realizado no *Aggregate Imaging System* (AIMS) da marca Pine, localizado nas dependências do Laboratório de Geotecnia Professor Jaques de Medina (LABGEO), da COPPE, UFRJ. De acordo com DA SILVA (2015) o equipamento utiliza um sistema de digitalização e processamento digital de imagens, com capacidade para analisar o índice de angularidade

e a forma 2D de agregados miúdos. Além disso examina a forma tridimensional, a textura, a esfericidade, a planicidade, o alongamento, e também a relação entre planicidade *versus* alongamento dos agregados que são classificados como graúdos, que não é o caso dos bio-agregados desta pesquisa.

Para a realização do ensaio de morfologia por AIMS, as amostras foram espalhadas uniformemente em torno de uma bandeja opaca e a iluminação foi realizada na parte superior do aparelho. A análise da morfologia foi composta por um sistema de aquisição de imagens, conforme ilustrados na figura 3.16. Enquanto as amostras permaneciam em movimento na bandeja de ensaio, os bio-agregados foram capturados de acordo com leituras realizadas por câmeras dispostas no interior do equipamento. O *software* acoplado ao computador executou e analisou os dados obtidos. Para análise dos bio-agregados de bambu utilizados nesta pesquisa, foram posicionados os materiais retidos nas peneiras de malha 2,36 mm; 1,18 mm e 0,60 mm. Todo o processo foi executado separadamente para cada uma das malhas.

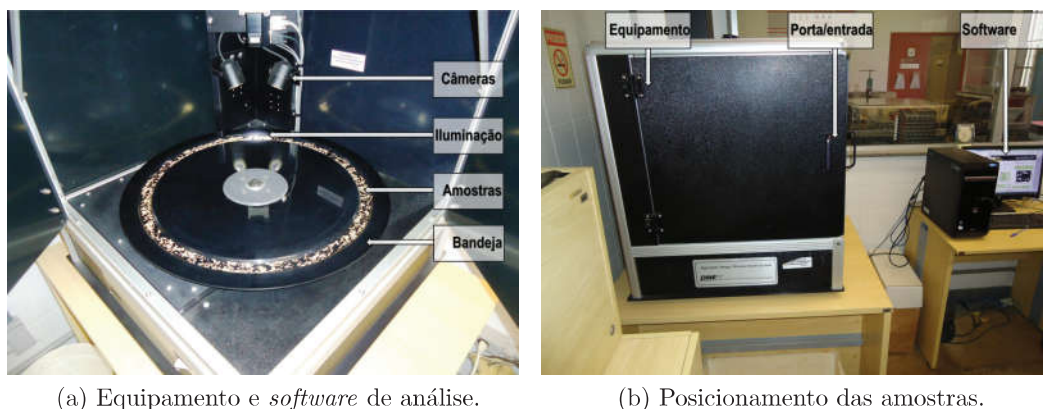


Figura 3.16: Análise do índice de angularidade e forma 2D dos bio-agregados.

O índice de angularidade descreve as variações no contorno dos bio-agregados que influenciam a sua forma, podendo variar de 1 a 10000. Quanto mais próximo de um círculo perfeito, mais perto de zero a amostra será configurada (DA SILVA, 2015). Para esta pesquisa, as partículas serão classificadas conforme os limites dos agregados propostos por AL ROUSAN (2005), descritos na 3.2.

Tabela 3.2: Angularidade e os limites de classificação AL ROUSAN (2005).

Angularidade	Classificação
< 2100	Arredondado
2100 - 4000	Sub - arredondado
4000 - 5400	Sub - angular
< 5400	Angular

Para as análises digitais do índice de angularidade, os bio-agregados foram separados em três diferentes tamanhos retidos nas peneiras de 0,60 mm; 1,18 mm e 2,36 mm que são as aberturas de peneiras utilizadas pelo AIMS. Os resultados das curvas de distribuições cumulativas para o índice de angularidade podem ser observados na figura 3.17.

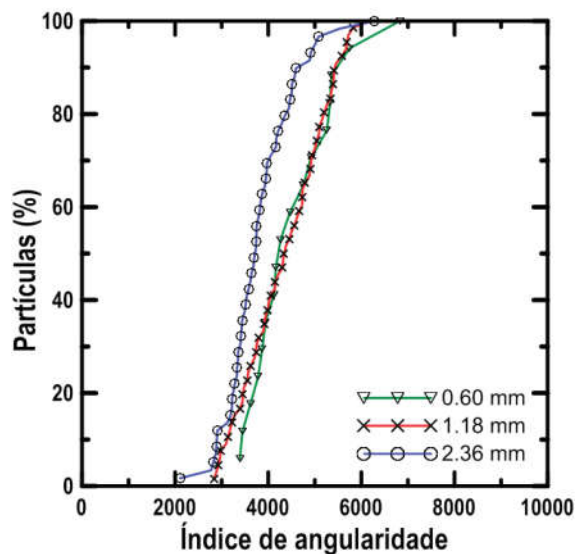


Figura 3.17: Índice de angularidade dos bio-agregados de bambu.

O índice de angularidade médio foi de 4152, com valores variando entre 2000 e 7000. De acordo com AL ROUSAN (2005) para todas as frações analisadas os bio-agregados podem ser classificados como **sub-angulares**, pois há predominância de gradientes agudos em torno deles.

O índice de forma 2D quantifica a forma das imagens bidimensionais dos bio-agregados e relaciona com a proximidade das amostras à forma de um círculo, podendo variar de 0 a 20 (DA SILVA, 2015). Para esta pesquisa, os bio-agregados serão classificados conforme os limites dos agregados propostos por AL ROUSAN (2005) e que estão descritos na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Forma 2D e os limites de classificação AL ROUSAN (2005).

Forma 2D	Classificação
< 6,5	Circular
6,5 - 8,0	Semi - circular
8,0 - 10,5	Semi - alongado
< 10,5	Alongado

Para as análises digitais do índice de forma 2D, os bio-agregados foram separados em três diferentes tamanhos retidos nas malhas de peneiras 0,60 mm; 1,18 mm e

2,36 mm. Os resultados das curvas de distribuições cumulativas para o índice de forma 2D podem ser observados na figura 3.18.

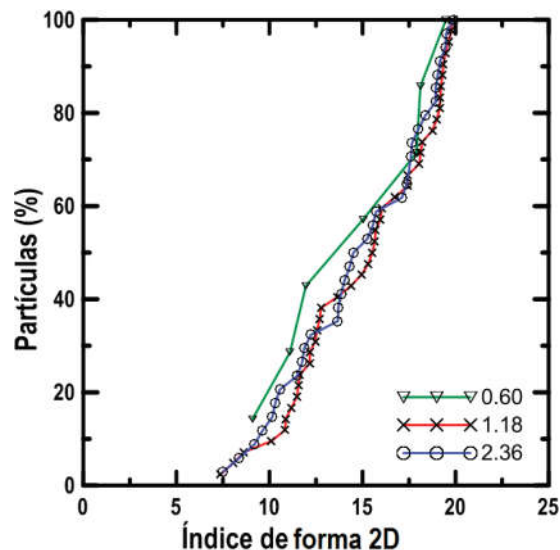


Figura 3.18: Índice de forma 2D dos bio-agregados de bambu.

O índice médio de forma 2D foi de 14,91, indicando um índice de forma 2D extrema com valores variando entre 7,5 e 20. Os bio-agregados apresentam formas longas, sem nenhuma proximidade com um círculo. Os bio-agregados podem ser classificados como **alongados** com comprimentos significativos quando comparado a largura reduzida. Na figura 3.19 estão ilustradas as imagens obtidas durante o ensaio do índice de angularidade e forma 2D.

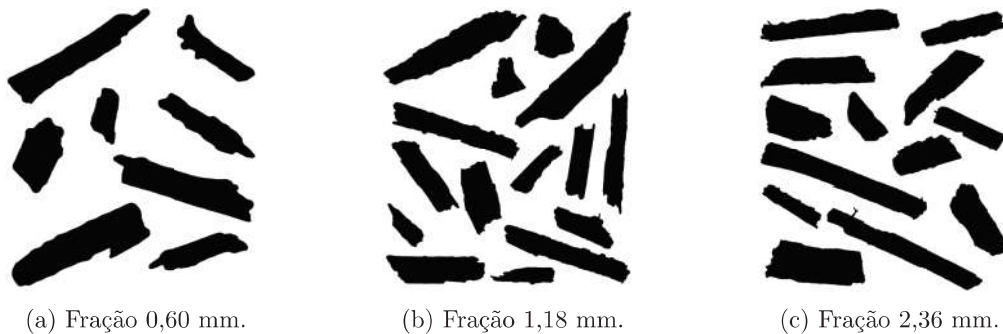


Figura 3.19: Morfologia das partículas de bambu.

3.3.1.7 Tratamento dos bio-agregados de bambu

Considerando que pode haver a inibição da pega do cimento quando utiliza-se esse aglomerante combinado com a biomassa vegetal, os bio-agregados de bambu foram lavados em água para retirada dos extrativos hidrossolúveis existentes no material. A

lavagem foi realizada à uma temperatura de 80°C por 1 hora. A relação biomassa: água utilizada foi de 1: 10, sugerida por BERALDO (1994). O procedimento de lavagem foi repetido por até dez vezes e o teor de extrativos na água determinado após cada lavagem, seguindo a metodologia proposta por DA GLORIA (2016).

O procedimento iniciou-se com a coleta da água residual de cada um dos ciclos de lavagens. A água com extrativos passantes na peneira com abertura de 150 μm , foi separada em um recipiente e deixada em uma sala com temperatura controlada de 40°C (\pm 2°C) por um período de 36 horas. O tempo foi suficiente para que houvesse eliminação da água por evaporação, restando apenas os extrativos. Para determinar a concentração de extrativos presentes em cada um dos ciclos de lavagens, foi utilizada a equação 3.3.

$$C_e = \frac{M_1 - M_r}{M_2 - M_r} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde :

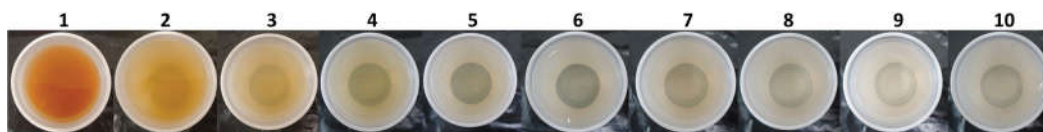
C_e = concentração de extrativos (%)

M_1 = massa dos extrativos após a secagem (g)

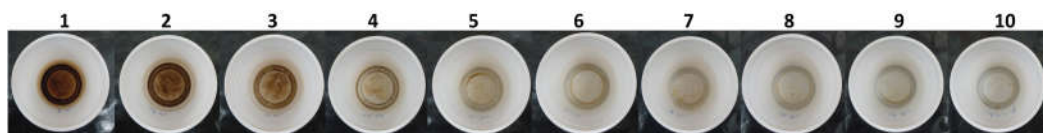
M_2 = massa de água residual (g)

M_r = massa do recipiente (g)

Com os ciclos de lavagem observou-se uma variação gradual na coloração das águas residuais das lavagens. A mudança de cor ilustrado na figura 3.20 (a) e a diminuição da concentrações de extrativos da figura 3.20 (b), são perceptíveis após cada ciclo de lavagem.



(a) Coloração da água após a lavagem.



(b) Extrativos após a secagem.

Figura 3.20: Coloração e extrativos após a evaporação da água.

A figura 3.21 mostra a redução progressiva das concentrações de extrativos. Nota-se que a redução dos extrativos é mais significativa durante os primeiros ciclos com redução de 88,9% até a terceira lavagem. Após o sexto ciclo 97% dos extrativos haviam sido removidos. Dessa maneira, as partículas de bambu desta pesquisa foram lavadas três vezes antes de serem utilizadas na produção dos bio-concretos. Após as lavagens toda a biomassa era colocada em uma sala à 40°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) por um período de 48 horas, para que os bio-agregados de bambu voltassem a sua unidade natural.

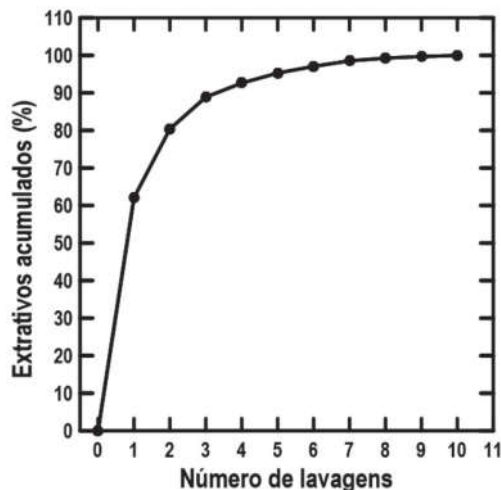


Figura 3.21: Extrativos acumulados *versus* ciclos de lavagens.

3.3.2 Cimento Portland CP V - ARI

Foi utilizado como aglomerante o Cimento Portland CP V - ARI produzido pela empresa Holcim e ilustrado na figura 3.22.



Figura 3.22: Cimento Portland CP V - ARI da Holcim.

Os ensaios de caracterização do cimento foram realizados no Laboratório de Técnicas Analíticas do LABEST/PEC/COPPE/UFRJ. A composição química e a densidade do cimento estão apresentadas na tabela 3.4. A composição foi determinada através da análise por Espectrometria de Fluorescência de Raios X por energia dispersiva, modelo EDX - 720 da Shimadzu que apresenta um tubo com tensão de 5 kW, alvo de ródio (Rh) e detector de silício - lítio (SiLi) resfriado por nitrogênio líquido. A densidade foi determinada no picnômetro à gás hélio, modelo AccuPyc 1340 da marca Micromeritics.

Tabela 3.4: Composição química e densidade do cimento CP V - ARI.

Composição química	CP V - ARI
CaO	70,140 %
SiO ₂	15,475 %
Al ₂ O ₃	4,8700 %
SO ₃	4,2070 %
Fe ₂ O ₃	3,4580 %
K ₂ O	1,0280 %
SrO	0,4070 %
TiO ₂	0,2440 %
MnO	0,1380 %
CuO	0,0160 %
ZnO	0,0150 %
Densidade	3,17 g/cm³

A figura 3.23 mostra a curva granulométrica do cimento CP V - ARI onde observa-se que D₈₀ é igual à 31,5 μm, D₅₀ é igual à 15,1 μm e D₁₀ é igual à 3,15 μm.

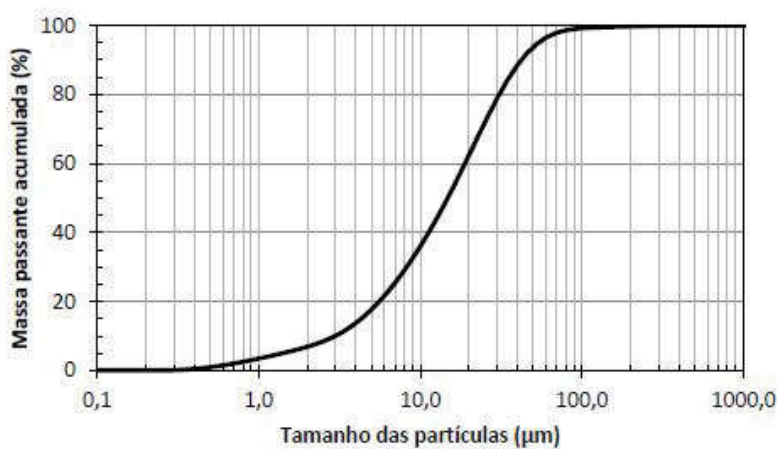


Figura 3.23: Curva granulométrica do cimento CP V - ARI.

3.3.3 Agente modificador de viscosidade

Nessa pesquisa utilizou-se o agente modificador de viscosidade, *Viscosity Modify Admixture* (VMA) com nome comercial Rheomac UW 410, fabricado pela empresa BASF. O agente modificador de viscosidade é um aditivo em pó a base de polímeros de celulose que, quando utilizado na pasta cimentícia aumenta a viscosidade, incrementando a capacidade de retenção de água do concreto e a sua resistência à segregação, proporcionando boa trabalhabilidade à mistura.

3.3.4 Água

Para o desenvolvimento experimental desta pesquisa, toda a água utilizada foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro/RJ.

3.4 Programa experimental

Uma análise fatorial 2^2 foi utilizada para definir o programa experimental a ser executado no estudo das propriedades físicas e mecânicas dos bio-concretos. Com o desenho da análise fatorial pode-se estabelecer se os principais fatores que influenciam as propriedades do material foram examinados, quais causas têm efeitos decisivos nessa propriedade e a influência entre os fatores. Complementarmente, o desenho experimental possibilita a obtenção de uma equação matemática que prevê os valores das propriedades em análise. De acordo com TOLEDO FILHO (1997), a classe de cada variável em um experimento pode abranger uma ampla faixa de valores e a finalidade do desenho experimental é analisar uma superfície racional e prática, não focando nos extremos do processo.

Nesta pesquisa os fatores estudados foram a relação água/cimento (A/C) e o volume de partículas (V_p) em relação a quantidade de cimento/ m^3 . Os fatores foram selecionados pois são as variáveis essenciais consideradas nas dosagens dos bio-concretos à base de cimento. O desenho fatorial irá estabelecer qual o fator relevante que influencia nas propriedades físicas e mecânicas estudadas. Foi utilizado o programa **MATLAB® 2010a** para analisar estatisticamente o efeito de interação dos fatores selecionados.

O desenho fatorial do programa experimental está mostrado na figura 3.24, e mostra as relações água/cimento e os volumes de partículas com os respectivos volumes de cimento/ m^3 estudados nesta pesquisa.

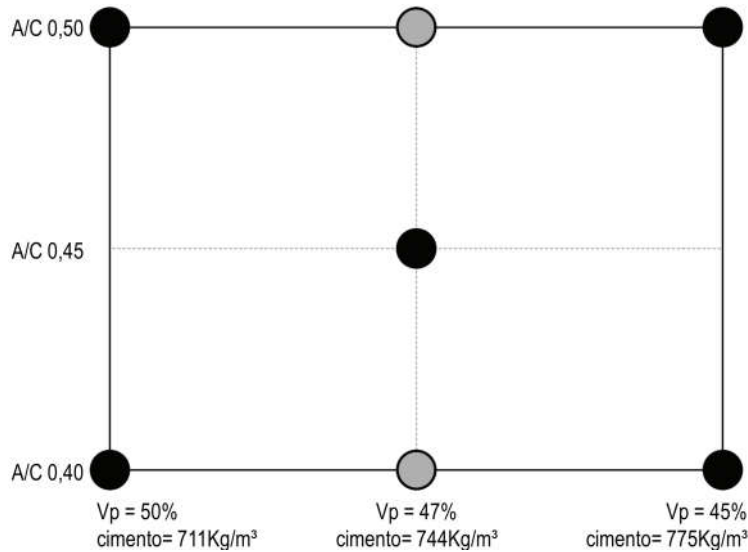


Figura 3.24: Desenho fatorial utilizado no estudo.

A caracterização desta pesquisa foi determinada para os cinco pontos cheios. Para os cinco pontos dos bio-concretos foram realizados os ensaios mecânicos de resistência à compressão uniaxial, tração direta, cisalhamento e flexão em três pontos, além do ensaio físico de absorção de água por capilaridade. Para comprovar a confiabilidade do modelo de regressão múltipla gerado pela análise fatorial, foram selecionados dois pontos novos e intermediários ($Vp = 47\%$ correspondente a $744 \text{ Kg}/m^3$ de cimento). Para esses pontos foi realizado o ensaio mecânico de resistência à compressão uniaxial com os respectivos módulos de elasticidade.

3.5 Dosagem dos bio-concretos

Sabe-se que na produção de bio-concretos é fundamental a realização de métodos racionais para compensar a água, devido à elevada porosidade e facilidade de absorção das biomassas. Buscando aperfeiçoar a produção dos bio-concretos de bambu com elevada trabalhabilidade ($290 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$), a compensação de água da mistura foi estabelecida baseando-se na curva da figura 3.15, eliminando a saturação prévia do bio-agregado de bambu. Inicialmente, alguns métodos de mistura foram analisados e vários procedimentos foram testados, onde a propriedade de controle no estado fresco foi o ensaio de espalhamento.

A figura 3.25 mostra a mistura prévia das partículas de bambu com o cimento e posterior adição da água. Pode-se observar um espalhamento de 240 mm que é próximo ao pretendido.



Figura 3.25: Etapas testadas no procedimento 1: (a) mistura dos materiais secos, (b) adição da água no conjunto, (c) teste de espalhamento com presença de segregação.

A figura 3.26 mostra a mistura do cimento com a água e as partículas foram adicionadas à pasta. Foi observado no ensaio de espalhamento a presença de bolhas na mistura e a exsudação era presente desde o início do ensaio.

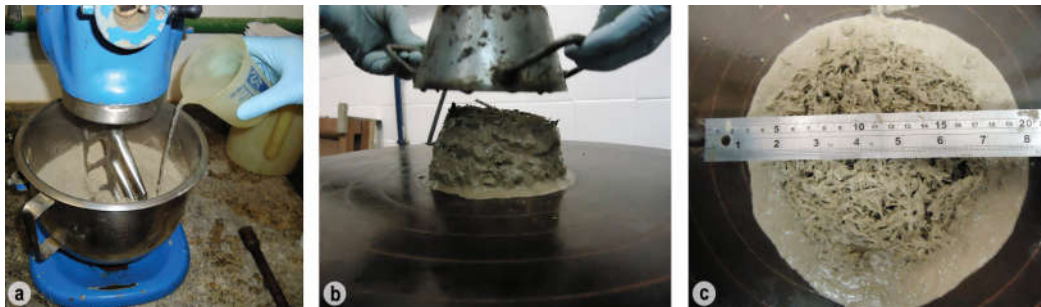


Figura 3.26: Etapas testadas no procedimento 2: (a) mistura do cimento com água que forma uma pasta, (b) início do teste com segregação, (c) teste do espalhamento.

A figura 3.27 mostra a mistura do cimento com a água que originou a pasta cimentícia. Na pasta foi adicionado as partículas pré saturadas. Não foi observado exsudação e segregação no início da mistura, mas no final ocorreu em excesso. Nesse procedimento foi o que mais originou segregação e exsudação da mistura.



Figura 3.27: Etapas testadas no procedimento 3: (a) início da mistura com pasta, (b) pré saturação das partículas, (c) espalhamento com exsudação e segregação.

A figura 3.28 mostra a mistura das partículas secas com a água onde o cimento foi adicionado em um segundo momento. Foi observado um espalhamento próximo a 170 mm, sendo que o procedimento apresentou menor ocorrência de exsudação quando comparado ao teste anterior.

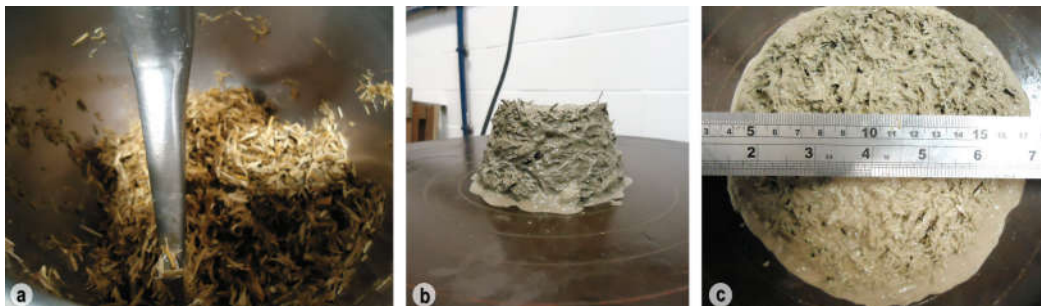


Figura 3.28: Etapas testadas no procedimento 4: (a) partículas misturadas com a água, (b) início do teste com exsudação, (c) teste do espalhamento.

Os resultados obtidos mostraram que o procedimento 1 que utilizava as partículas secas com o cimento e posterior adição da água, apresentou-se com o maior espalhamento e menor ocorrência de segregação.

Definido o procedimento de mistura para os bio-concretos, buscou-se aperfeiçoar o método para eliminar a segregação e exsudação que se faziam presentes. Para isso utilizou-se a água de compensação correspondente a saturação das partículas obtidas durante o método do filó e secadora (figura 3.15). O agente modificador de viscosidade foi testado variando de 0,05 à 0,5% em relação a massa de cimento. O bio-agregado fino passante na peneira de #1,18 mm, conforme mostrado na figura 3.7 foi testado em volumes de 5 à 25% da massa da biomassa.

Após a avaliação do potencial de segregação das misturas, observou-se que a adição de 15% de finos, combinados com 0,125% de VMA e água de absorção correspondente ao ganho de massa de 24 horas foram adequados para controlar a exsudação e a segregação. As misturas garantiram a definida e adequada homogeneidade, trabalhabilidade e moldabilidade. A propriedade analisada no estado fresco foi o ensaio de espalhamento (*flow table test*), que conduziu à premissa definida para a dosagem dos bio - concretos, onde buscou-se limites de 290 mm \pm 20 mm. A figura 3.29 mostra os procedimentos durante o ensaio e a aparência das misturas após o ensaio de espalhamento.

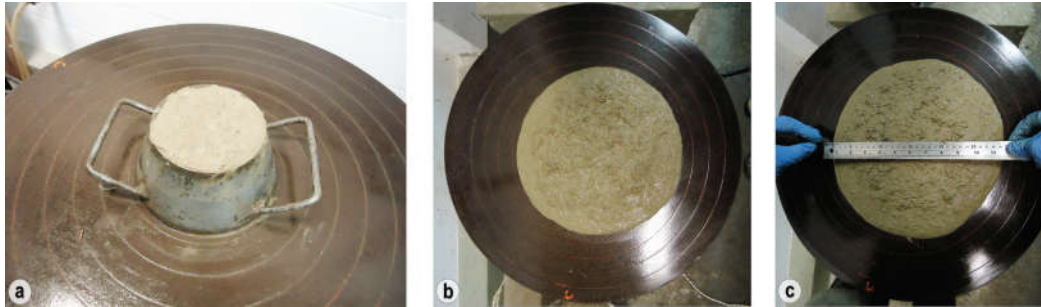


Figura 3.29: Aperfeiçoamento do procedimento 1: *flow table test* (a) início do teste (b) espalhamento e aparência da mistura (c) espalhamento obtido.

As relações mássicas entre os materiais utilizados estão apresentados na tabela 3.5. Conforme mostrado na figura 3.24, os volumes de partículas de bambu utilizados nesta pesquisa foram de 50, 47 e 45% e o volume de cimento correspondente foi de 711; 744 e 775 Kg/m^3 , respectivamente. As relações de água/cimento efetivas foram de 0,40; 0,45 e 0,50 e a quantidade de VMA utilizada foi de 0,125% em relação à massa de cimento. As misturas foram denominadas de CCB (compósito cimento bambu) conforme as relações mássicas entre elas.

Tabela 3.5: Volume de cimento (em Kg/m^3), volume de biomassa (em %) e a relação mássica entre os materiais onde: Cim. = Cimento e Bio. = biomassa de bambu.

Cimento (Kg/m^3)	Biomassa (%)	Mistura CCB	Cim.	Bio.	Relação A/C	Água absorção	VMA
711	50	2,50	1	0,40	0,50	0,515	0,00125
775	45	3,00	1	0,33	0,50	0,427	0,00125
744	47	2,75	1	0,36	0,40	0,464	0,00125
744	47	2,75	1	0,36	0,45	0,464	0,00125
744	47	2,75	1	0,36	0,50	0,464	0,00125
711	50	2,50	1	0,40	0,40	0,515	0,00125
775	45	3,00	1	0,33	0,40	0,427	0,00125

3.5.1 Produção dos bio - concretos

As etapas envolvendo a produção dos bio-concretos foram executadas no Laboratório de Estruturas e Materiais Professor Lobo Carneiro (LABEST/COPPE/UFRJ). Os bio-concretos foram produzidos em uma betoneira modelo MB - 120P, fabricado pelo grupo MOTOMIL/GMEG. A rotação do tambor é de 28 rpm (motor 1700 rpm) com capacidade de mistura de 80 litros (motor 120 litros). O modelo do equipamento utilizado pode ser visualizado na figura 3.30 (a).

Inicialmente, misturavam-se as partículas de bambu secas com o cimento na velocidade de rotação do tambor por 2 minutos. Gradativamente adicionava-se a água total durante um tempo de 2 minutos. Decorrendo 5 minutos de mistura o VMA era progressivamente adicionado. O conjunto foi misturado até 8 minutos na mesma velocidade inicial (28 rpm). O tempo foi suficiente para se observar e adquirir uma boa homogeneidade do compósito, conforme ilustrado na figura 3.30 (b).



(a) Modelo da betoneira utilizado. (b) Mistura com boa homogeneidade.

Figura 3.30: Betoneira utilizada na moldagem e aparência dos bio - concretos.

Os moldes utilizados foram de 90 cm de comprimento, 25 cm de largura e 10 cm de espessura. Inicialmente, os moldes foram limpos e receberam uma fina camada de óleo mineral que facilitou a desmoldagem. Para cada traço estudado foi moldado um molde e de cada um deles foram extraídos os corpos - de - prova para a caracterização física e mecânica dos bio-concretos.

Conforme observado na sequência de ilustrações da figura 3.31 o lançamento do compósito fresco nos moldes ocorreu sobre uma mesa vibratória, em três porções que formaram três camadas e etapas. Todo o procedimento foi realizado preenchendo o molde com o auxílio de uma colher de pedreiro. Os bio-concretos frescos foram distribuídos em três pequenas porções para cada camada, conforme mostrado na figura 3.31 (a). Posterior à prévia distribuição das porções, o painel foi submetido ao adensamento mecânico (68 Hz) durante 30 segundos, formando a primeira camada conforme mostrado na figura 3.31 (b). Finalizada a primeira camada o procedimento foi repetido para a segunda e a terceira camada. O preenchimento completo do molde sucedeu-se após as três camadas completas, com a finalização da moldagem visivelmente homogênea onde o compósito fresco apresentava-se uniformemente distribuído e mostrado na figura 3.31 (f).

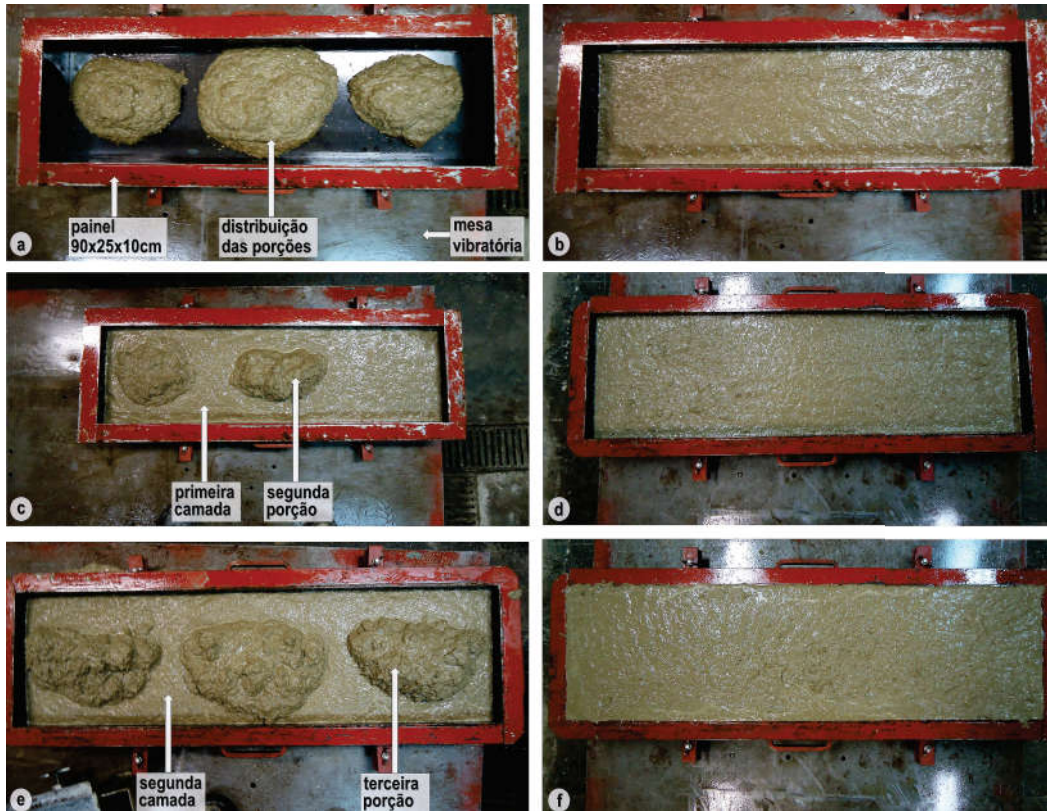


Figura 3.31: (a) distribuições das porções, (b) formação da primeira camada, (c) distribuição da segunda porção, (d) formação da segunda camada, (e) distribuição da terceira porção, (f) finalização da moldagem.

Os moldes foram protegidos contra a perda de umidade com um tecido úmido e mantidos em uma sala de 20°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) até a desmoldagem, que aconteceu 24 horas depois da moldagem. Após a desmoldagem os corpos - de - prova foram levados à cura em câmara úmida, com umidade relativa do ar de 100% ($\pm 2\%$) e temperatura de 21°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) onde permaneceram até as idades dos ensaios.

3.5.2 Corte, extração e desbaste dos corpos - de - prova

A partir dos painéis de $90 \times 25 \times 10$ cm (comprimento, largura e espessura) foram cortados e extraídos os corpos - de - prova (CP) para a avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos bio-concretos. Com o auxílio de uma serra circular adiamantada de 3×400 mm (espessura e diâmetro) foram realizados dois cortes de 35 cm no sentido das extremidades para a região central do painel, conforme ilustrado nas imagens da figura 3.32. Do procedimento resultaram três blocos e todos tiveram as faces cortadas na espessura de 3 mm, para que houvesse regularização e nivelção do conjunto.

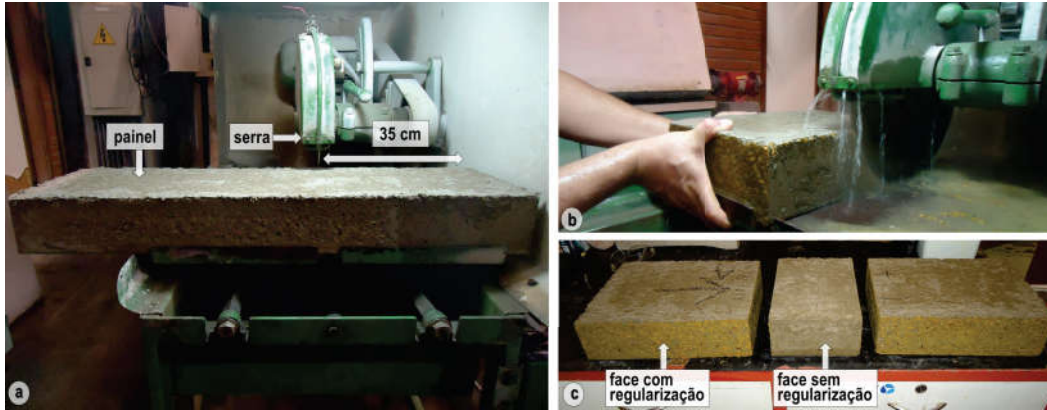


Figura 3.32: Procedimentos de corte: (a) painel posicionado para o corte, (b) regularização das faces (c) painel cortado em blocos.

Todos os blocos foram reduzidos do formato prismático nas dimensões específicas para obtenção das amostras. Foram extraídos quatro corpos - de - prova para cada tipo de ensaio, totalizando 20 CP por painel e mistura estudada. Conforme ilustrado na figura 3.33, da região central foram retirados os CP's de absorção por capilaridade (5,5 x 5,5 x 10,5 cm). Do núcleo da esquerda e direita foram extraídos os CP's de compressão (5,5 x 5,5 x 10,5 cm). Intercalando a posição das extremidades foram retirados os CP de tração e flexão (35 x 5,0 x 1,5 cm). Os corpos - de - prova de cisalhamento foram extraídos do topo das extremidades (35 x 5,0 x 5,0 cm).

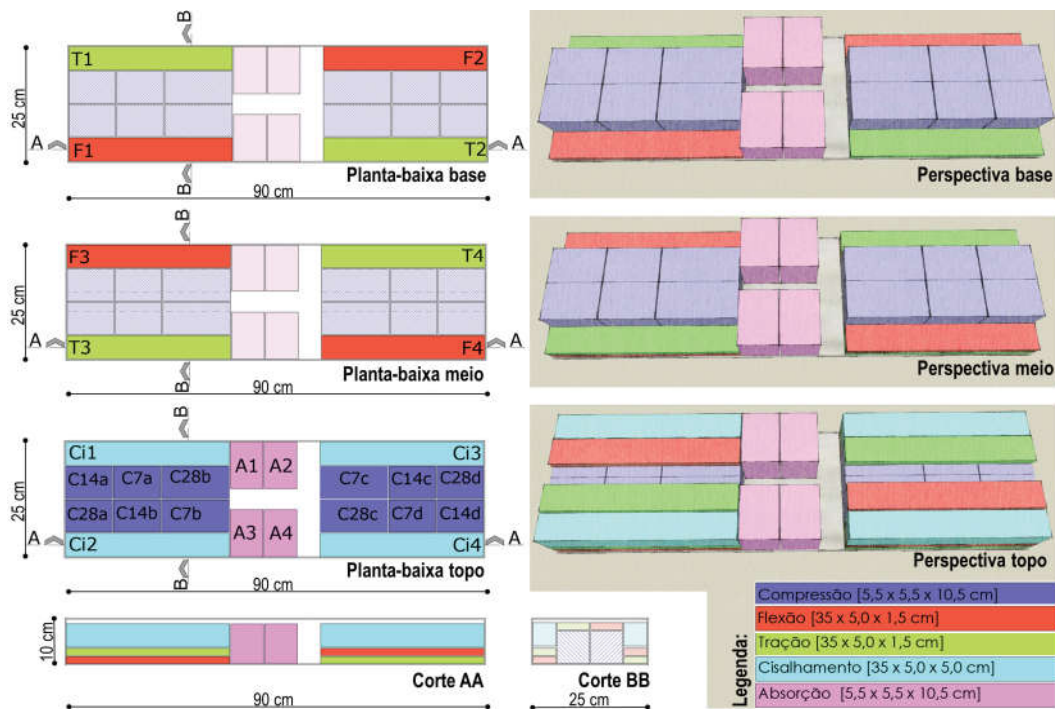
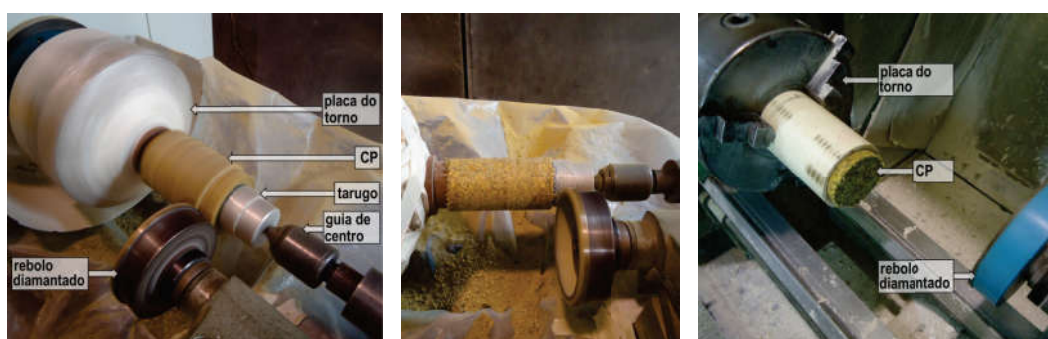


Figura 3.33: Esquema da retirada dos corpos - de - prova do molde.

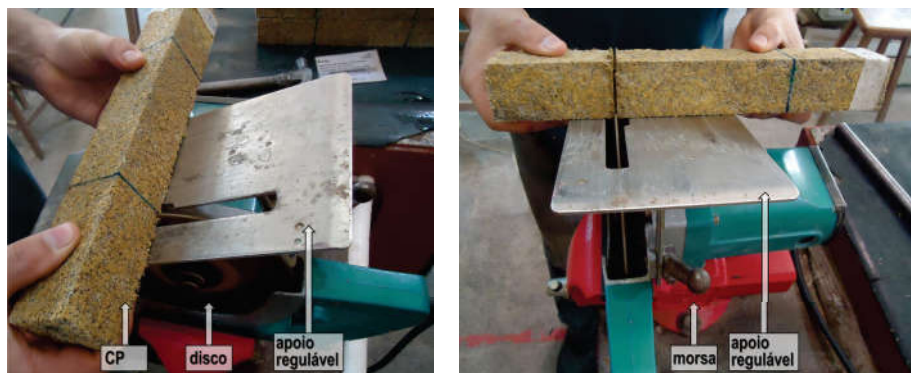
No ensaio de resistência à compressão e absorção de água é recomendado a utilização de CP's cilíndricos. Porém, durante o processo de extração obteve-se CP's com formato prismáticos. Para reduzir as amostras para o formato cilíndrico foram executados desbastes nas peças prismáticas com o auxílio de um torno mecânico universal da Linha TORMAX 20 e fabricado pela ROMI, conforme ilustrações da figura 3.34 (a) e (b). As extremidades foram faceadas com o auxílio de uma retífica de modelo W22 Plus, fabricado pela WEG. O equipamento apresenta um rebolo adiamantado que está acoplado em um torno mecânico de modelo TR - 600 da RI-OSULENSE, conforme ilustrações da figura 3.34 (c). Os procedimentos de desbaste e faceamento resultaram em CP's cilíndricos de 5,0 x 10,0 cm (diâmetro e altura).



(a) Desbaste no torno mecânico. (b) Desbaste do CP. (c) Faceamento das extremidades.

Figura 3.34: Procedimento de desbaste e faceamento nos bio - concretos.

No CP de cisalhamento foram induzidos entalhes em volta de todas as faces nas amostras prismáticas. A profundidade foi de 5,0 mm e a largura de 2,4 mm. O procedimento é ilustrado na figura 3.35 onde foi utilizado um disco adiamantado (13.000 rpm) e um traçador (maquita). As peças foram adaptadas e fixadas em uma morsa provida de apoio regulável, que controlou a profundidade.



(a) Serra de mármore com apoio. (b) Procedimento de entalhe nas faces.

Figura 3.35: Execução dos entalhes nos corpos - de - prova de cisalhamento.

Posteriormente aos procedimentos de corte, extração, desbaste e entalhes todos os corpos - de - prova voltaram para a câmara úmida ($UR = 100\%$ e $T = 21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) até atingirem as idades de ensaios.

3.6 Ensaios mecânicos

Todos os ensaios mecânicos foram executados na condição do bio - concreto saturado superficialmente seco, os corpos - de - prova foram retirados da câmara úmida 30 minutos antes de se iniciar os ensaios.

3.6.1 Resistência à compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado na máquina de ensaio universal modelo Shimadzu - 1000 kN, com velocidade de deslocamento de 0,1 mm/min. Para cada mistura foram ensaiados quatro corpos - de - prova cilíndrico com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, conforme mostrado na figura 3.36 (a). As deformações verticais foram obtidas a partir da leitura média de dois LVDTs que foram acoplados na região central CP por anéis metálicos, de acordo com a figura 3.36 (b). O ensaio foi realizado após 7, 14 e 28 dias de cura em câmara úmida.



(a) CP cilíndrico desbastado.



(b) LVDTs montados no corpo - de - prova.

Figura 3.36: Ensaio de compressão uniaxial dos bio - concretos.

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos CCB foram determinados seguindo as recomendações da NBR 5739/2007. O cálculo do módulo de elasticidade foi realizado de acordo com os procedimentos descritos na norma NBR 8522/2003, conforme a equação 3.4.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \times 1000 \quad (3.4)$$

Onde :

E = módulo de elasticidade (GPa)

σ_2 = tensão de compressão correspondente a 40% da carga máxima

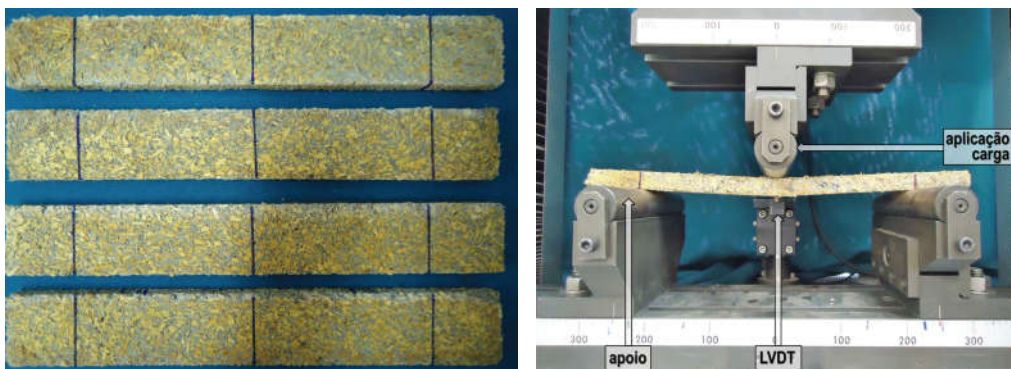
σ_1 = tensão de compressão correspondente a deformação axial, ε_1 , de 5.10^{-5}

ε_2 = deformação axial produzida pela σ_2

ε_1 = deformação axial igual a 5.10^{-5}

3.6.2 Resistência à flexão em 3 pontos

A resistência à flexão em 3 pontos foi realizada conforme procedimentos da norma Europeia EN 310/1993. Foi executado na máquina de ensaio universal modelo Shimadzu AGX - 100 kN com velocidade de deslocamento de 0,1 mm/min, após 28 dias de cura em câmara úmida. Para cada mistura foram ensaiados quatro corpos - de - prova prismáticos de 350 x 50 x 15 mm (comprimento x largura x espessura) conforme ilustrado na figura 3.37 (a). As dimensões foram determinadas pela EN 310/1993 e devem ser utilizados CP's com comprimento de 20 vezes a espessura nominal, adicionado de 50 mm. O sistema de aquisição de dados Trapezium foi utilizado para adquirir a deflexão central por meio de um sensor da máquina e um LVDT acoplado à um dispositivo, posicionado no meio do CP. A distância utilizada entre os apoios foi de 250 mm. A figura 3.37 (b) ilustra os dispositivos instalados.



(a) CP prismático com a marcação dos apoios. (b) Dispositivos instalados para o ensaio.

Figura 3.37: Ensaio de resistência à flexão em 3 pontos dos bio - concretos.

Seguindo as recomendações da norma Europeia EN 310/1993 foram determinados o módulo de ruptura (MOR) conforme equação 3.5. O módulo de elasticidade (MOE) foi calculado baseando-se na equação 3.6.

$$MOR = \frac{3 \times F_{max} \times l_1}{2 \times bt^2} \quad (3.5)$$

$$MOE = \frac{l_1^3(F_2 - F_1)}{4 \times bt^3(a_2 - a_1)} \div 1000 \quad (3.6)$$

Onde :

MOR = resistência em flexão (MPa)

MOE = módulo de elasticidade (GPa)

F_{max} = carga máxima (N)

l_1 = distância entre os apoios (mm)

b = largura do corpo - de - prova (mm)

t = espessura do corpo - de - prova (mm)

F_2 = 40% da carga máxima (N)

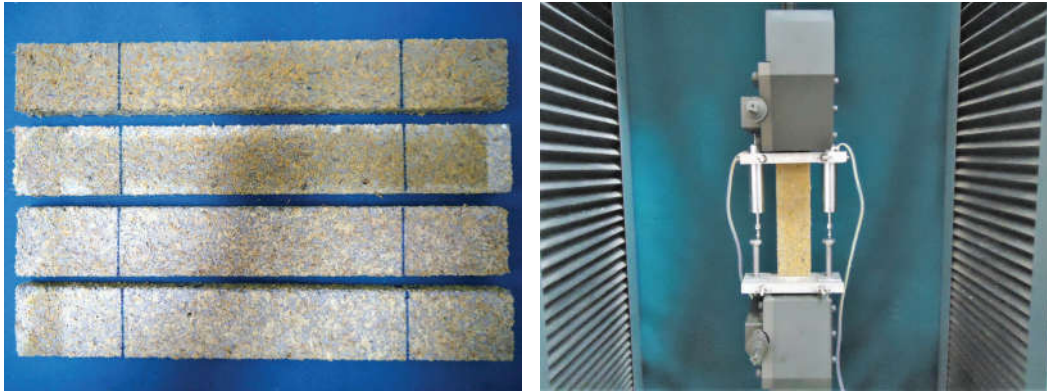
F_1 = 10% da carga máxima (N)

a_2 = deflexão correspondente à 40% da carga máxima (mm)

a_1 = deflexão correspondente à 10% da carga máxima (mm)

3.6.3 Resistência à tração direta

O ensaio de tração direta foi realizado na máquina de ensaios modelo Shimadzu AGX - 100 kN com controle de deslocamento de 0,1 mm/min, após 28 dias de cura em câmara úmida. Para cada mistura foram ensaiados quatro corpos - de - prova prismáticos de 350 x 50 x 15 mm (comprimento x largura x espessura) conforme ilustrado na figura 3.38 (a). Os deslocamentos axiais foram obtidos a partir da leitura média de dois LVDTs fixados à região central dos corpos - de - prova. Os LVDTs foram acoplados em um suporte de alumínio que foi fixado à amostra por parafusos nas extremidades, impedindo a rotação em relação ao eixo do CP e mostrado na figura 3.38 (b). A aquisição de dados de carga e deslocamento axial foram realizadas pelo sistema ADS 2000 da marca LYNX.



(a) CP prismático de tração.

(b) LVDTs e aparatos montados para o ensaio.

Figura 3.38: Ensaio de resistência à tração direta dos bio - concretos.

O cálculo da resistência à tração direta dos bio - concretos foi realizado de acordo com a equação 3.7.

$$\tau = \frac{F}{b \times e} \quad (3.7)$$

Onde :

τ = resistência à tração direta (*MPa*)

F = carga aplicada (N)

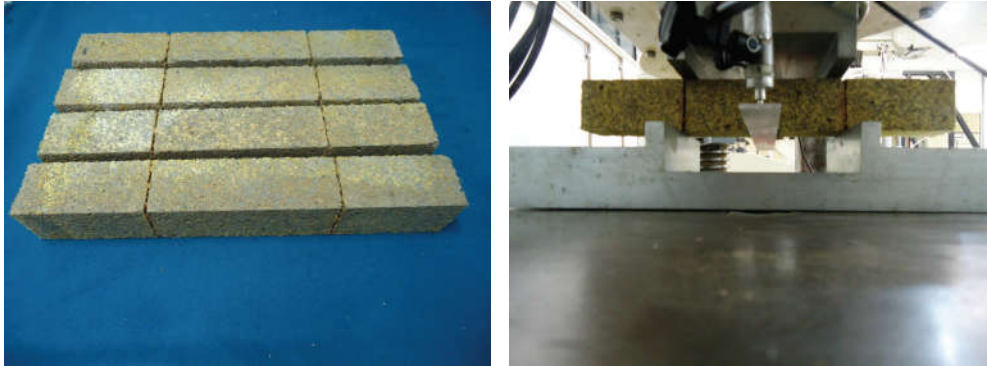
b = largura do corpo - de - prova (mm)

e = espessura do corpo - de - prova (mm)

3.6.4 Resistência ao cisalhamento

O ensaio de resistência ao cisalhamento foi realizado após 28 dias de cura em câmara úmida. Essa propriedade foi determinada com base na norma japonesa JSCE - SF6 seguindo as recomendações de MARANGON (2006). O ensaio foi realizado na máquina modelo Shimadzu - 1000 kN com velocidade de deslocamento de 0,1 mm/min. Para cada mistura foram ensaiados quatro CP's prismáticos com dimensões de 350 x 50 x 50 mm (comprimento x largura x espessura). Os entalhes apresentavam profundidade de 5 mm e largura de 2,4 mm, conforme a figura 3.39 (a). Para a medição dos deslocamentos foram acoplados à mesa da máquina duas

bases magnéticas contendo dois LVDTs, um em cada lado da amostra. Uma amostra de aço foi fixada no centro do CP e serviu de apoio para fixação dos LVDTs, que registraram o deslocamento conforme mostrado na figura 3.39 (b).



(a) CP prismático com os entalhes.

(b) LVDTs montados no corpo - de -prova.

Figura 3.39: Ensaio de resistência ao cisalhamento dos bio - concretos.

O cálculo da resistência ao cisalhamento dos bio - concretos foi realizado de acordo com a equação 3.8.

$$\tau = \frac{0,5 \times P}{(b - 2e)(h - 2e)} \quad (3.8)$$

Onde :

τ = resistência ao cisalhamento (MPa)

P = carga máxima (N)

b = largura da seção transversal da amostra (mm)

h = altura da seção transversal da amostra (mm)

e = profundidade média do entalhe (mm)

3.7 Ensaios físicos

3.7.1 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi executado com base nas recomendações da NBR 9779/2012. O objetivo do ensaio é obter o ganho de massa

de água em função do tempo e analisar a facilidade de ingresso da água por ascensão capilar. Para cada bio - concreto foram ensaiados quatro corpos - de - prova cilíndrico com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm. Após 28 dias de cura em câmara úmida os corpos - de - prova foram deixados em estufa de 40°C por 24 horas até a perda da umidade inicial. Depois desse tempo foram colocados numa estufa com ventilação interna à temperatura de 110°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) até atingirem a constância de massa, que aconteceu uma semana depois.

Para garantir o fluxo unidirecional e evitar a perda de umidade, os corpos - de - prova foram selados com fita alumínio nas laterais conforme ilustrações da figura 3.40 (a). Depois da selagem as amostras foram posicionadas em um recipiente com nível de água controlado de 5 (± 1 mm) acima da face inferior. Conforme imagem da figura 3.40 (b) o nível de água foi mantido constante durante todo tempo do ensaio.



(a) Amostras seladas com fita alumínio.



(b) Amostras no recipiente com água.

Figura 3.40: Ensaio absorção de água por capilaridade dos bio - concretos.

A absorção de água foi monitorada pelo ganho de massa em função do tempo. As leituras foram realizadas no período entre 1 a 28 dias após o contato dos corpos - de - prova com a água. A absorção de água por capilaridade dos bio - concretos foram calculadas de acordo com a equação 3.9:

$$A_c = \frac{M_a - M_s}{S_t} \quad (3.9)$$

Onde :

A_e = absorção de água por capilaridade (g/cm^2)

M_a = massa do corpo - de - prova em contato com a água (g)

M_s = massa do corpo - de - prova seco, em constância de massa (g)

S_t = área da seção transversal do corpo - de - prova (cm^2)

Para calcular as absorvidades dos bio - concretos foi adotado os dois estágios observados por FONTES (2008). Os estágios são representados por duas inclinações conforme ilustrado na figura 3.41. O primeiro estágio de absorção (S_1) é caracterizado pelo comportamento linear do ganho de massa de água em função do tempo. O fenômeno ocorre nos poros capilares maiores. O segundo estágio de saturação (S_2) é definido como o ganho de massa de água em relação ao tempo e apresenta um comportamento não linear. É identificado como período de saturação onde o fluxo de água acontece nos poros capilares menores. A mudança de estágio de absorção para saturação denomina-se ponto de transição (P_t).

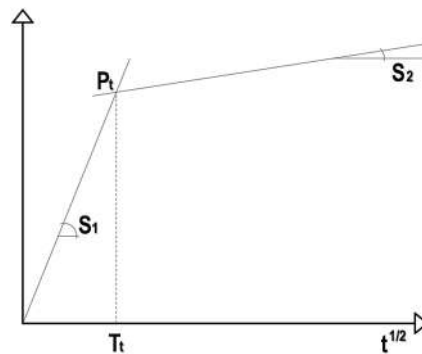


Figura 3.41: Gráfico típico da absorção de água por capilaridade *versus* a raiz quadrada do tempo. Adaptado de FONTES (2008).

3.7.2 Retração por secagem e perda de massa

O ensaio de retração por secagem foi realizado para avaliar a variação dimensional dos bio - concretos quando a condição da umidade relativa do ambiente foi menor que a do material. Para esse ensaio foram adotadas as recomendações da norma ASTM C157/2003. Utilizando corpos - de - prova prismáticos de 285 x 75 x 75 mm (comprimento x largura x espessura) e com o auxílio de uma furadeira com guia metálico em 90°, o CP foi fixado em uma superfície plana (figura 3.42) onde foram

introduzidos pinos nos orifícios centrais das duas faces menores. A profundidade do furo foi de 17,5 mm em cada face. A distância entre as extremidades interiores dos pinos ficou com 250 mm (comprimento L_p). Para a fixação dos pinos nos corpos - de - prova foi utilizado um adesivo à base de resina epóxi. Os bio - concretos preparados para o ensaio estão ilustrados na figura 3.42 (b).

Posterior à cura de 28 dias em câmara úmida as primeiras leituras de comprimento e de massa foram realizadas, utilizando um relógio digital fixado à um pórtico. Antes da realização das leituras de comprimento o relógio comparador era zerado com o auxílio de uma barra de referência de aço inox. O conjunto para os registros de variação dimensional e de massa estão mostrados na figura 3.42 (c).

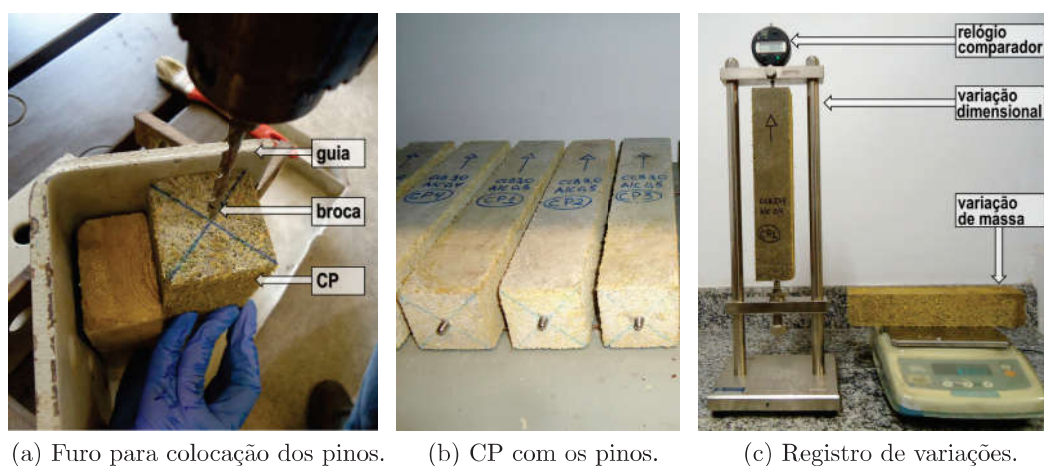


Figura 3.42: Procedimentos do ensaio de retração por secagem dos bio - concretos.

Os corpos - de - prova foram mantidos em uma sala com temperatura $22^{\circ}\text{C} (\pm 2^{\circ}\text{C})$ e umidade controlada de $55\% (\pm 2\%)$, onde permaneceram durante todo o processo de retração. Para os primeiros 20 dias de ensaio as leituras foram realizadas todos os dias. Após esse período foram registradas leituras a cada 7 dias. Com isso pode ser calculado as deformações de retração dos bio - concretos baseado na equação 3.10. A perda de massa ao longo do tempo foi calculada com base na equação 3.11.

$$\varepsilon = \frac{L_t - L_i}{L_p} \quad (3.10)$$

$$W_m = \frac{m_t - m_i}{m_i} \quad (3.11)$$

Onde :

ε = deformação de retração por secagem (%)

W_m = perda de massa de água durante a retração por secagem (%)

L_t = leitura de comprimento em um instante t (mm)

L_i = leitura de comprimento inicial, após 28 dias de cura (mm)

L_p = distância entre os pinos (mm)

m_t = massa da amostra, em 1h (Kg)

m_i = massa inicial da amostra, após 28 dias de cura (Kg)

Capítulo 4

Resultados e discussões

4.1 Bio-concretos

Este capítulo apresenta as propriedades físicas e mecânicas dos bio-concretos produzidos. As análises e discussões dos resultados obtidos estão abordados em etapas, de acordo com cada propriedade analisada nos procedimentos experimentais. As caracterizações físicas e mecânicas vêm acompanhadas das análises fatoriais, com os resultados para os cinco pontos cheios mostrados no programa experimental.

4.2 Propriedades dos bio-concretos

4.2.1 Ensaio de espalhamento

Com a finalidade de investigar a premissa definida para a dosagem científica dos bio-concretos de bambu, a propriedade de controle no estado fresco das misturas foi o ensaio de espalhamento (*flow table test*). Conforme mostrado na tabela 4.1, a hipótese adotada na dosagem racional dos bio-concretos desta pesquisa foi alcançada, já que todas as misturas produzidas apresentaram espalhamento de $290 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$. Além disso, apresentaram-se isentas de exsudação e segregação e os valores indicam que houve uma boa trabalhabilidade e moldabilidade para todas as misturas.

Tabela 4.1: Valores de espalhamento obtidos para cada mistura dos bio-concretos.

Cimento (Kg/m³)	Partículas (%)	Mistura CCB	Relação de A/C	Espalhamento (mm)
711	50	2,50	0,50	292
775	45	3,00	0,50	310
744	47	2,75	0,45	280
711	50	2,50	0,40	280
775	45	3,00	0,40	285

4.2.2 Densidade dos bio-concretos

Os valores médios das densidades dos bio-concretos produzidos estão apresentados na tabela 4.2. As densidades foram analisadas na condição do bio-concreto saturado (ρ_1) retirado da câmara úmida ($U = 100\%$ e $T = 21^\circ\text{C}$) e seco até a constância de massa (ρ_2) em estufa ($T = 110^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$).

Tabela 4.2: Valores médios das densidades ρ_1 e ρ_2 dos bio-concretos.

Cimento (Kg/m³)	Partículas (%)	Mistura CCB	Relação de A/C	ρ_1 Kg/m³	ρ_2 Kg/m³
711	50	2,50	0,50	1058,65	694,73
775	45	3,00	0,50	1093,60	763,37
744	47	2,75	0,45	1091,13	736,26
711	50	2,50	0,40	1081,94	714,21
775	45	3,00	0,40	1190,15	788,47

O modelo de regressão que relaciona a densidade (ρ_1) com os fatores está representado na equação 4.1. Enquanto a representação gráfica é apresentada na figura 4.1. Na condição saturada (ρ_1) tanto as partículas como os vazios do bio-concreto apresentam-se cheios de água. Observando a figura nota-se que as densidades saturadas variaram de 1058,65 a 1190,15 Kg/m³. O maior valor foi observado para a mistura com maior volume de cimento, menor volume de partículas e menor relação de A/C. O que mais influenciou para aumentar a densidade dos bio-concretos no estado saturado foi o maior volume de cimento (775 Kg/m³) e menor volume de partículas (45%).

$$\rho_1 = 7,18Vp^2 + 19674,07 - 762,82Vp + 146,52A/C.Vp - 8398,78(A/C)^2 \quad (4.1)$$

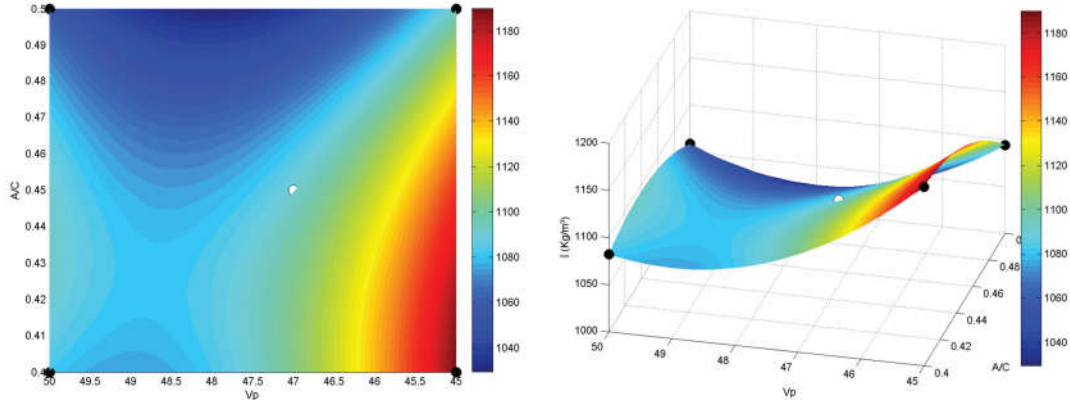


Figura 4.1: Influência do volume de partículas V_p (%) e a relação de A/C na densidade saturada (ρ_1) dos bio-concretos.

O modelo de regressão múltipla que relaciona a densidade (ρ_2) com os fatores estudados está apresentado na equação 4.2. A figura 4.2 mostra a variação da densidade seca (ρ_2). Na região estudada os resultados mostram que a menor densidade observada foi quando utilizou-se o menor volume de cimento, o maior volume de partículas e a maior relação de A/C. O que mais influenciou para diminuir a densidade dos bio-concretos no estado seco foi o menor volume de cimento ($711 \text{ Kg}/m^3$) e maior volume de partículas (50%).

$$\rho_2 = 2,20V_p^2 + 6534,69 - 228,07V_p + 11,24A/C.V_p - 840,89(A/C)^2 \quad (4.2)$$

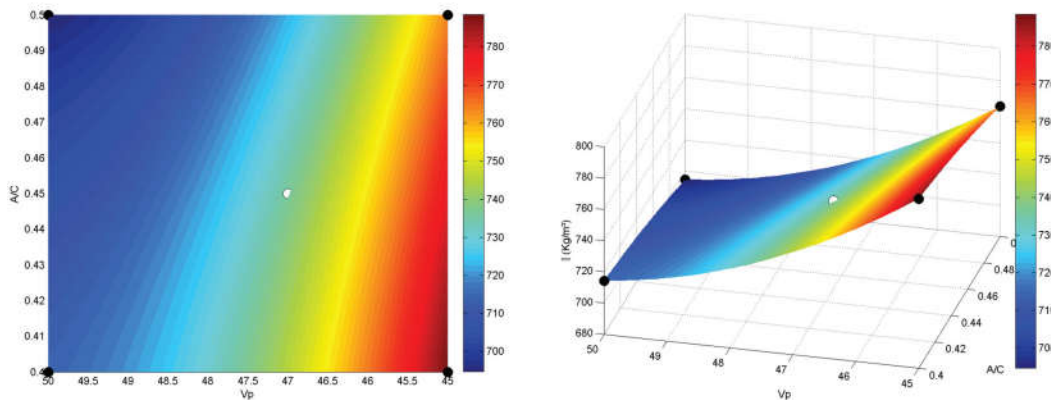


Figura 4.2: Influência do volume de partículas V_p (%) e a relação de A/C na densidade seca (ρ_2) dos bio-concretos.

Na condição seca (ρ_2) o compósito apresentou variações de 694,73 a 788,47 Kg/m^3 e na condição saturada (ρ_1) as mudanças foram de 1058,65 a 1190,15 Kg/m^3 . Ressalta-se que em ambas as condições todos os bio-concretos podem ser classificados como concretos leves, onde as recomendações são de densidade menores que 1800 Kg/m^3 (RILEM, 1978). O bio-concreto de maior densidade (cimento = 775 Kg/m^3 e $V_p = 45\%$) apresentou 34% a menos de densidade que o recomendado pela associação. As circunstâncias para a redução podem ser explicadas pelo uso das partículas de bambu e pela água total no conjunto. Tais circunstâncias refletiram na leveza do e na porosidade ocasionada pelos vazios de água que estão presentes nos bio-concretos e podem ser observados na figura 4.3.

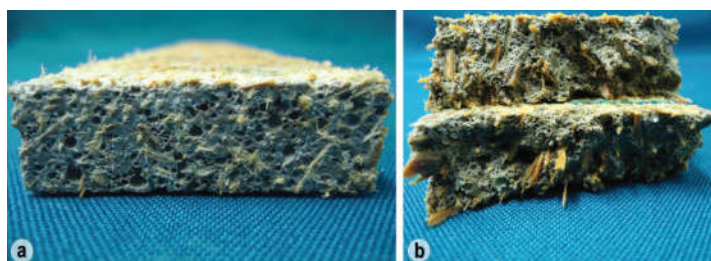
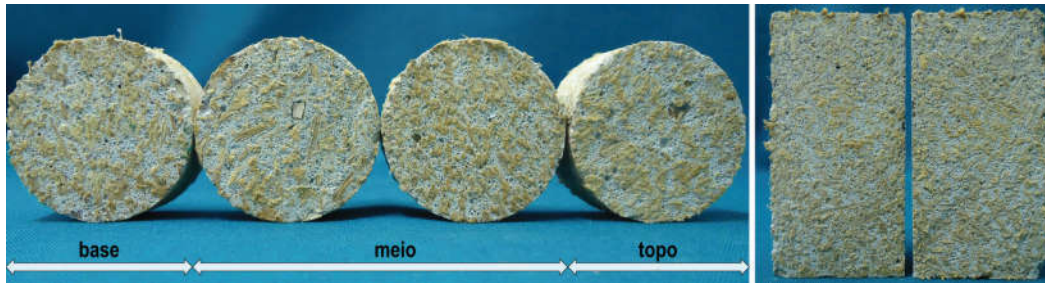


Figura 4.3: (a) superfície lisa e (b) fraturada, ambas com presença de poros.

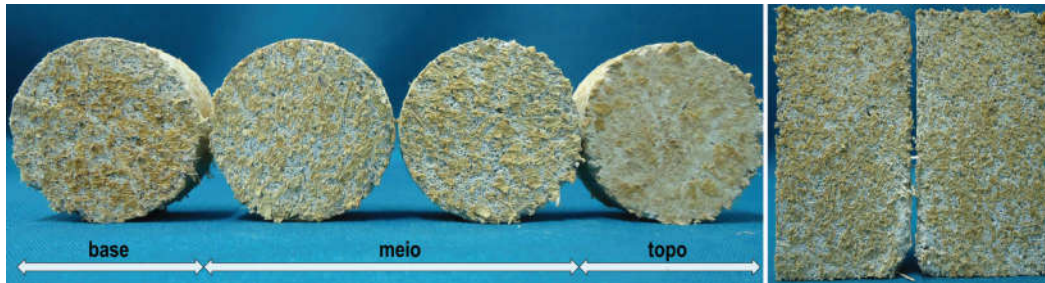
Para efeito ilustrativo de comparação, foram selecionadas as pesquisas que utilizam biomassas vegetais e cimento com métodos de prensagem industrial ou manual. DA GLORIA (2015) obteve para bio-concretos cimento: madeira de $V_p = 50\%$ e 45% com relação de $A/C = 0,40$, valores de densidade correspondentes a 1100 Kg/m^3 e 1250 Kg/m^3 , respectivamente. MACÊDO *et al.* (2012) para o bio-concreto cimento: madeira com $V_p = 50\%$ encontrou densidade para o Cedro de 1330 Kg/m^3 , para o Jatobá de 1557 Kg/m^3 e a Quaruba de 1433 Kg/m^3 . As densidades foram maiores que as encontradas nesta pesquisa devido ao método de prensagem empregado que, comprime e densifica o conjunto durante a moldagem.

4.2.2.1 Homogeneidade dos bio-concretos

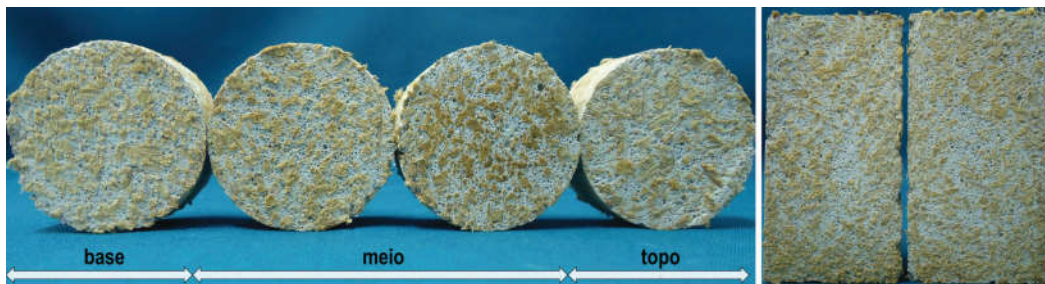
Nas produções dos bio-concretos as misturas apresentaram uma boa homogeneidade sem ocorrência de segregação. Corroborando às observações, seções horizontais e verticais dos corpos - de - prova cilíndricos das diferentes misturas foram produzidos. Com base nas imagens da figura 4.4 é perceptível a distribuição homogênea das partículas de bambu ao longo de toda extensão das amostras, sem a presença de segregação em nenhum dos bio-concretos estudados. Os valores de densidade das amostras da base, meio e topo apresentaram diferenças entre elas de apenas 0,10%.



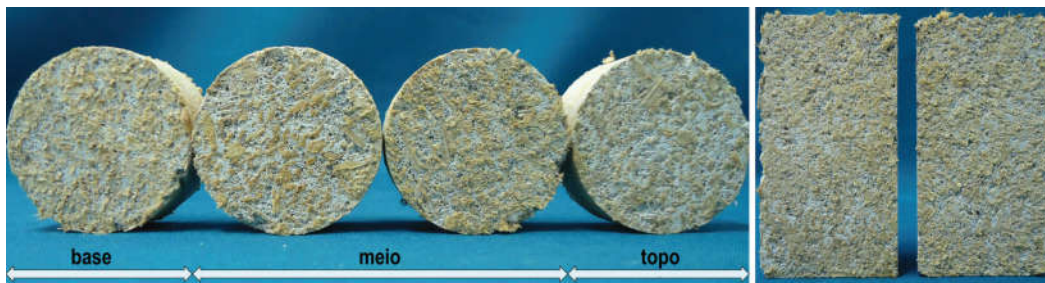
(a) Bio-concreto da mistura CCB 2,50 A/C 0,50. (Cimento = 711 Kg/m^3 e $V_p = 50\%$)



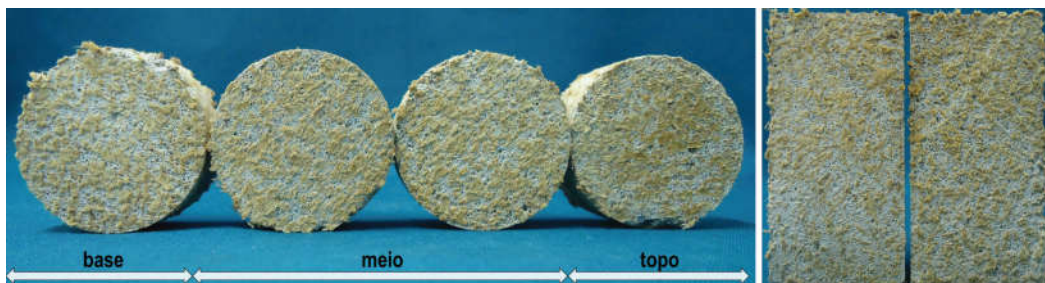
(b) Bio-concreto da mistura CCB 3,00 A/C 0,50. (Cimento = 775 Kg/m^3 e $V_p = 45\%$)



(c) Bio-concreto da mistura CCB 2,75 A/C 0,45. (Cimento = 744 Kg/m^3 e $V_p = 47\%$)



(d) Bio-concreto da mistura CCB 2,50 A/C 0,40. (Cimento = 711 Kg/m^3 e $V_p = 50\%$)



(e) Bio-concreto da mistura CCB 3,00 A/C 0,40. (Cimento = 775 Kg/m^3 e $V_p = 45\%$)

Figura 4.4: Seção horizontal e vertical das amostras dos bio-concretos produzidos.

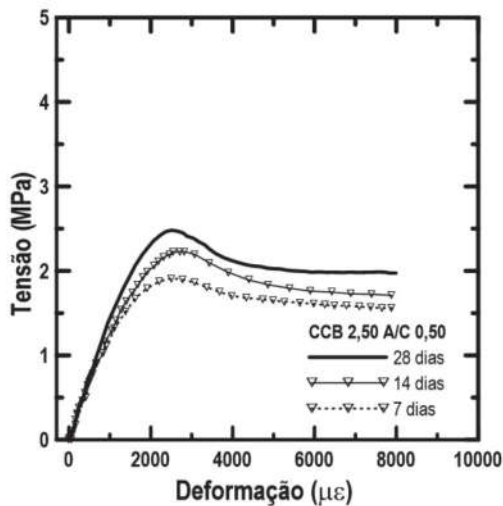
4.3 Propriedades mecânicas

Neste item são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios mecânicos realizados para a caracterização dos bio-concretos produzidos. Cada análise é apresentada separadamente e o fechamento das discussões dos resultados apresentam os modelos de regressão múltipla, relacionando cada propriedade mecânica com os fatores selecionados para o presente estudo, conforme já discutido no programa experimental. Juntamente com o modelo é apresentado graficamente a relação do volume de partículas V_p (%) *versus* a relação de água/cimento (A/C) obtida para cada análise. No caso específico da resistência à compressão uniaxial, é mostrado o resultado obtido que comprova a confiabilidade da superfície de resposta obtida para os dois pontos intermediários (cimento = 744 Kg/m^3 e $V_p = 47\%$). Com isso e baseado no modelo gerado pode-se relacionar a resistência mecânica obtida no programa experimental *versus* a resistência mecânica encontrada na validação.

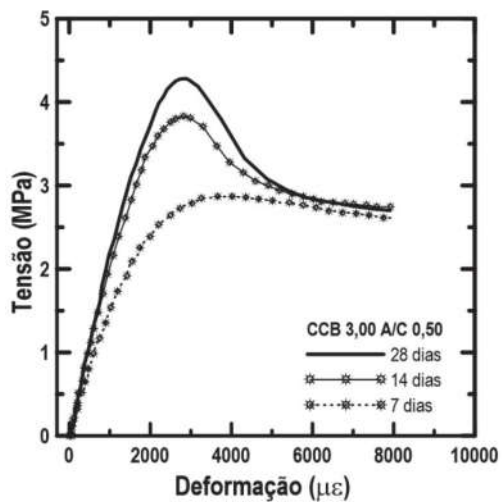
4.3.1 Resistência à compressão uniaxial

Os bio-concretos foram avaliados sob esforços de compressão após 7, 14 e 28 dias de cura em câmara úmida. Os ensaios foram realizados em corpos - de - prova na condição saturado superficialmente seco por 30 minutos. Os resultados e discussões sobre a resistência à compressão (F_c), módulo de elasticidade (E) e o comportamento tensão *versus* deformação para cada um dos bio-concretos produzidos são apresentados a seguir.

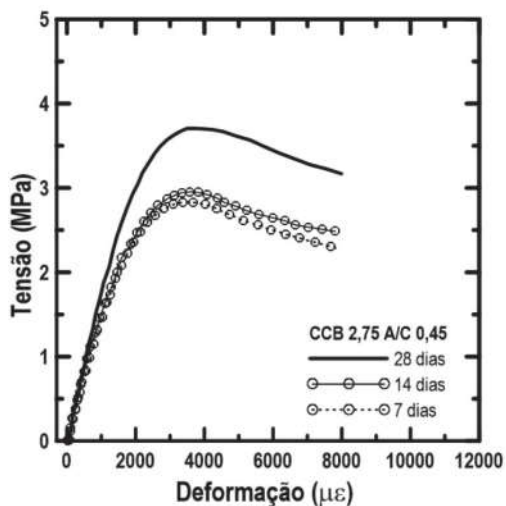
Observando as curvas tensão *versus* deformação apresentadas na figura 4.5 nota-se um comportamento linear elástico inicial seguido por uma não linearidade, até se atingir a resistência máxima de ruptura. As partículas de bambu permitiram o controle do processo de fissuração na compressão e um comportamento pós-pico com redução gradual da tensão, podendo ser observado o aumento da deformação. Os bio-concretos podem ser submetidos a grandes deformações antes da ruptura, por isso podem ser chamados de materiais dúcteis. Eles são capazes de absorver choque ou energia e quando sobrecarregados, apresentam grandes deformações antes da ruptura.



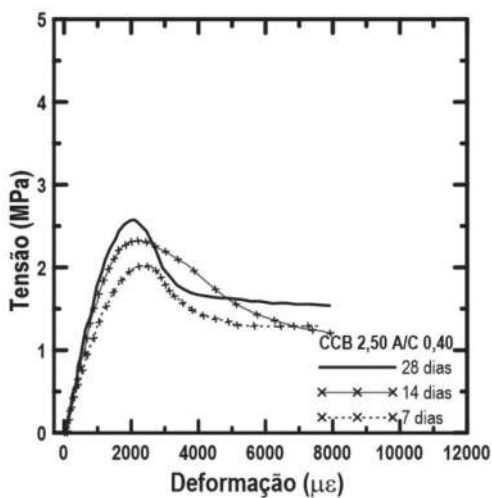
(a) Cimento = 711 Kg/m³; V_p = 50%



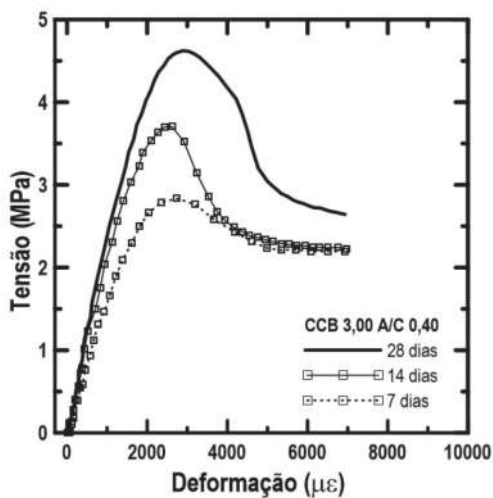
(b) Cimento = 775 Kg/m³; V_p = 45%



(c) Cimento = 744 Kg/m³; V_p = 47%



(d) Cimento = 711 Kg/m³; V_p = 50%



(e) Cimento = 775 Kg/m³; V_p = 45%

Figura 4.5: Curvas típicas da evolução de tensão *versus* deformação axial.

A partir das curvas tensão *versus* deformação determinou-se o momento em que ocorreu o desvio de linearidade, que variou dependendo da idade e conforme mostrado na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Desvio de linearidade conforme a idade dos bio-concretos.

Cimento (Kg/m ³)	Partículas (%)	Mistura CCB	Relação de A/C	7 dias %	14 dias %	28 dias %
711	50	2,50	0,50	48,6	54,0	59,3
775	45	3,00	0,50	30,0	52,6	60,0
744	47	2,75	0,45	42,7	55,0	73,2
711	50	2,50	0,40	53,6	67,3	72,6
775	45	3,00	0,40	40,4	56,2	70,2

A tabela 4.4 apresenta os valores médios de resistência à compressão obtidos para as idades de 7, 14 e 28 dias. Com base nos valores da tabela, a resistência à compressão *versus* a idade de cura dos bio-concretos são ilustrados na figura 4.6.

Tabela 4.4: Valores médios da resistência sob compressão dos bio-concretos aos 7, 14 e 28 dias de idade, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses)

Cimento (Kg/m ³)	Partículas (%)	Mistura CCB	Relação A/C	F _c 7 dias (MPa)	F _c 14 dias (MPa)	F _c 28 dias (MPa)
711	50	2,50	0,50	1,75 (8,1)	2,17 (2,5)	2,25 (8,9)
775	45	3,00	0,50	3,10 (7,6)	3,60 (3,6)	3,93 (5,5)
744	47	2,75	0,45	2,82 (2,7)	3,05 (2,8)	3,51 (4,8)
711	50	2,50	0,40	2,19 (6,6)	2,38 (3,4)	2,57 (0,5)
775	45	3,00	0,40	3,46 (8,7)	3,68 (4,6)	4,20 (6,5)

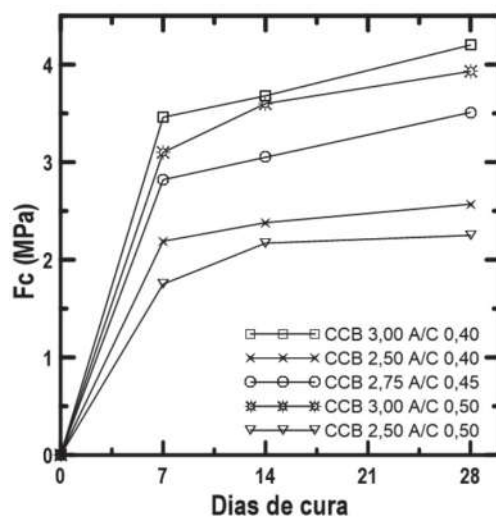


Figura 4.6: Evolução da resistência à compressão dos bio-concretos estudados.

A tabela 4.5 apresenta os valores médios do módulo de elasticidade obtidos para as idades de 7, 14 e 28 dias. Com base nos valores da tabela, o módulo *versus* a idade de cura dos bio-concretos são ilustrados na figura 4.7.

Tabela 4.5: Valores médios do módulo de elasticidade dos bio-concretos aos 7, 14 e 28 dias de idade, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses)

Cimento (Kg/m ³)	Partículas (%)	Mistura CCB	Relação A/C	E 7 dias (GPa)	E 14 dias (GPa)	E 28 dias (GPa)
711	50	2,50	0,50	1,29 (2,8)	1,39 (4,9)	1,51 (0,8)
775	45	3,00	0,50	1,73 (8,7)	2,12 (3,4)	2,31 (6,9)
744	47	2,75	0,45	1,65 (8,1)	2,00 (7,5)	2,10 (7,7)
711	50	2,50	0,40	1,42 (7,4)	1,81 (5,1)	2,01 (4,7)
775	45	3,00	0,40	2,20 (6,1)	2,25 (5,8)	2,35 (2,9)

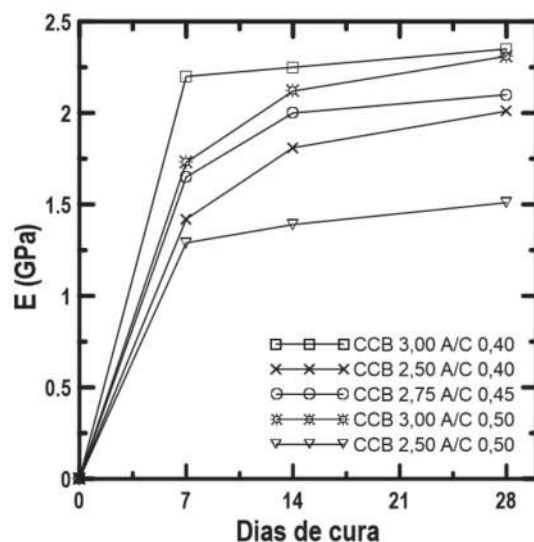


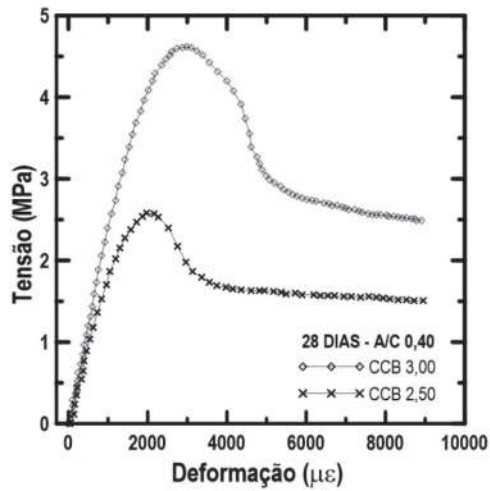
Figura 4.7: Evolução do módulo de elasticidade dos bio-concretos estudados.

Pode-se perceber que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade apresentaram aumento mais significativo nos primeiros 7 dias de idade, devido ao tipo de cimento utilizado que foi de alta resistência inicial. Compreende-se também que o aumento progressivo da resistência e do módulo sucederam-se em função do maior volume de cimento (775 Kg/m³), menor volume de partículas (45%) e menor relação de A/C (0,40) da mistura. Da mesma forma constatou-se que tanto a resistência quanto o módulo são menores quando o utilizou-se o menor volume de cimento (711 Kg/m³), maior volume de partículas (50%) e maior relação de A/C (0,50). Assim, os bio-concretos tornam-se mais resistentes e suportam maiores cargas com o aumento do volume de cimento.

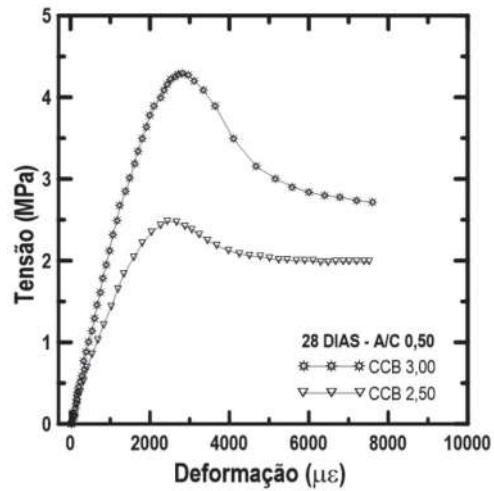
Conseqüentemente houve um ganho de resistência de 20% (7 dias), 8,8% (14 dias) e 12,4% (28 dias) da mistura $V_p = 50\%$ e A/C 0,40 para a $V_p = 50\%$ e A/C 0,50. Nota-se que houve aumento de resistência de 36,7% (7 dias), 35,3% (14 dias) e 38,8% da mistura $V_p = 45\%$ e A/C 0,40 para a $V_p = 50\%$ e A/C 0,40. A mistura $V_p = 45\%$ e A/C 0,40 apresentou com 7 dias um aumento de 17,6% da resistência aos 28 dias de cura.

O módulo de elasticidade aumentou 9,1% (7 dias), 8,8% (14 dias) e 12,45% (28 dias) da mistura $V_p = 50\%$ e A/C 0,40 para a $V_p = 50\%$ e A/C 0,50. Percebe-se um aumento no módulo de elasticidade de 35,4% (7 dias), 19,5% (14 dias) e 14,4% da mistura $V_p = 45\%$ e A/C 0,40 para a $V_p = 50\%$ e A/C 0,40, reforçando que o aumento é mais significativo nas misturas com maior volume de cimento e menor volume de partículas.

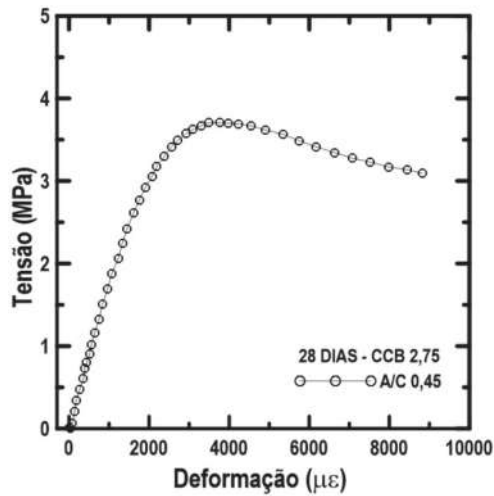
A figura 4.8 (a) e (b) apresenta as curvas tensão *versus* deformação das misturas de diferentes volumes de partículas e mesma relação de A/C, enquanto a figura 4.8 (d) e (e) mostram as mesmas misturas para diferentes relações de A/C. Todas as curvas referem-se aos bio-concretos ensaiados aos 28 dias de idade.



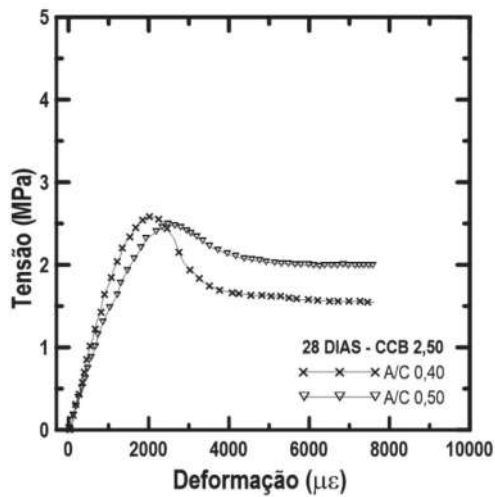
(a) CCB 3,00 e 2,50 A/C 0,40.



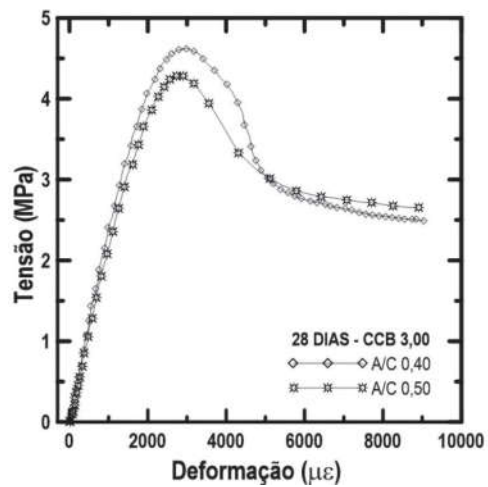
(b) CCB 3,00 e 2,50 A/C 0,50.



(c) CCB 2,75 A/C 0,45.



(d) CCB 2,50 A/C 0,40 e 0,50.



(e) CCB 3,00 A/C 0,40 e 0,50.

Figura 4.8: Curvas típicas de tensão *versus* deformação axial na compressão.

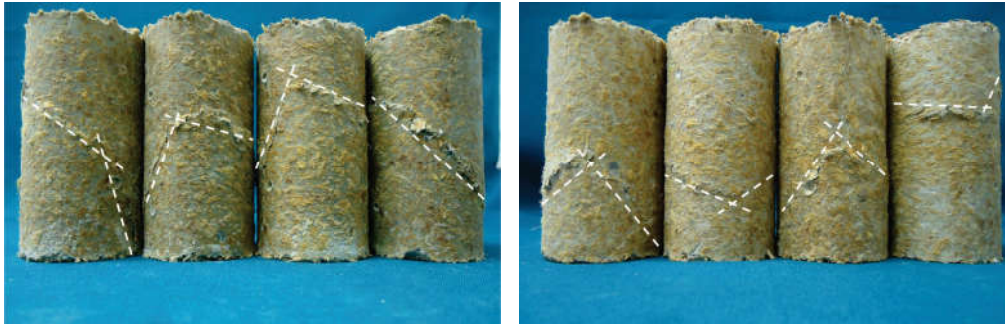
Com base nas curvas é perceptível que o volume de partículas influenciou de forma mais acentuada a perda de resistência das misturas do que a relação de A/C. O bio-concreto $V_p = 50\%$ e A/C 0,40 apresentou resistência 12,4% maior que o $V_p = 50\%$ e A/C 0,50. Já o $V_p = 45\%$ e A/C 0,40 apresentou uma resistência 6,4% maior quando comparado ao $V_p = 45\%$ e A/C 0,50.

Os bio-concretos $V_p = 50\%$ e 45% com A/C 0,40 apresentaram resistências 12,4% e 6,42% maior quando comparados com o das misturas $V_p = 50\%$ e 45% com A/C 0,50. O $V_p = 45\%$ e A/C 0,50 apresentou uma resistência 42,7% maior que o $V_p = 50\%$ e A/C 0,50. Já a mistura $V_p = 45\%$ e A/C 0,40 apresentou resistência 38,8% maior do que a mistura $V_p = 50\%$ e A/C 0,40. O bio-concreto $V_p = 47\%$ e A/C 0,45 apresentou-se com resistência e módulo de elasticidade de 3,51 MPa e 2,10 GPa, respectivamente.

Os resultados obtidos na compressão são comparáveis aos da literatura estudada. Por exemplo BERALDO (1997) obteve resistência à compressão de 6,60 MPa para os bio-concretos produzidos com um $V_p = 45\%$ quando as partículas de bambu foram lavadas em água e de 3,70 MPa quando as partículas foram utilizadas sem tratamento.

Para efeito ilustrativo de comparação, foram selecionadas as pesquisas que utilizam biomassas vegetais e cimento com métodos de moldagem diferentes do usados nesta pesquisa. Os resultados referem-se a bio-concretos produzidos sob prensagem industrial e manual. Por exemplo SOUZA (2006) obteve resistência de 3,9 MPa e 2,1 MPa um volume de partículas de madeira de 45% da espécie Anani e Cedro, respectivamente. DA GLORIA (2015) alcançou resistência de 9,46 MPa e 15 MPa para um $V_p = 45\%$ e $V_p = 50\%$, respectivamente e utilizando bio-agregado de madeira. É perceptível que os valores de resistência à compressão são maiores que os obtidos nesta pesquisa devido aos métodos de prensagem utilizados, que comprimem e densificam o conjunto durante o processo de moldagem.

A figura 4.9 ilustra o tipo de ruptura sofrido pelos corpos - de - prova na compressão. Com base na NBR 5739/2007 pode-se afirmar que todos os bio-concretos estudados apresentaram rupturas do tipo cônica ou de cisalhamento. Nenhuma das misturas apresentou fragmentação durante a ruptura e todos os corpos - de - prova mantiveram-se íntegros após o ensaio. O comportamento pós-ensaio reforça que os bio-concretos podem ser classificados como materiais dúcteis, pois suportam determinadas tensões com grandes deformações na fase plástica.



(a) Ruptura típica do $V_p= 45\%$.

(b) Ruptura típica do $V_p= 50\%$.

Figura 4.9: Tipos de ruptura dos bio-concretos de bambu.

4.3.1.1 Modelagem da superfície de resposta na compressão

O modelo de regressão múltipla que relaciona a resistência à compressão com os fatores estudados está apresentado na equação 4.3. A representação gráfica da superfície de resposta está apresentada na figura 4.10. Os resultados obtidos indicam que ambas variáveis influenciam os valores de resistência à compressão, mas o volume de partículas têm mais contribuição e quando mais próximo de $V_p= 50\%$, maiores são as perdas de resistência.

$$F_c = 1,49V_p - 0,02V_p^2 - 20,71 - 0,10A/C.V_p + 2,00(A/C)^2 \quad (4.3)$$

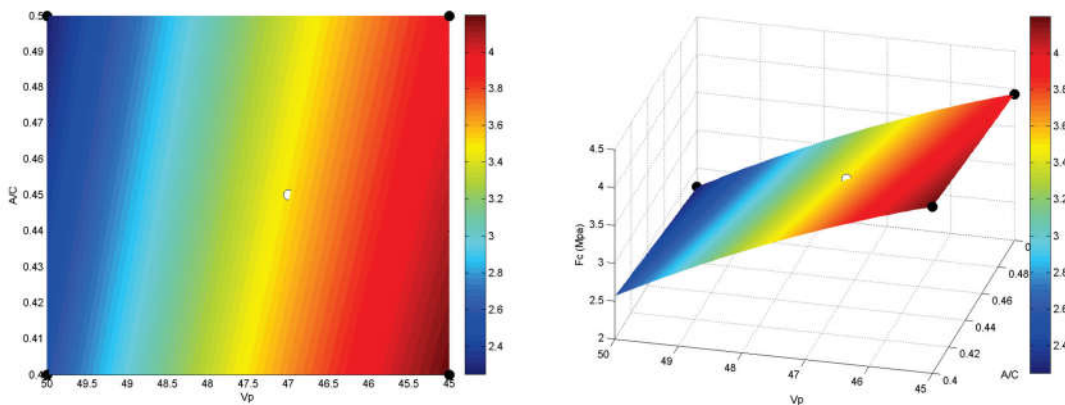


Figura 4.10: Influência do volume de partículas V_p (%) e da relação A/C na resistência à compressão aos 28 dias de idade dos bio-concretos.

Os dois pontos intermediários com $V_p= 47\%$ A/C 0,40 e 0,50 (cimento = 744 Kg/m^3) foram utilizados para validar a superfície de resposta obtida na análise fatorial realizada para os dados de resistência à compressão uniaxial. Os resultados obtidos

experimentalmente e os resultados preditos pela equação 4.3 estão apresentados na tabela 4.6. Os resultados mostram que há uma boa correlação entre os valores obtidos no experimento e os dados preditos pelo modelo, já que os erros observados variaram entre 1,82 e 5,54%.

Tabela 4.6: Valores médios da resistência mecânica à compressão aos 28 dias e os valores obtidos pelo modelo fatorial. Exp. = Experimento e Val. = Validação.

Cimento (Kg/m ³)	Partículas (%)	Mistura CCB	Relação A/C	Exp. (MPa)	Val. (MPa)	Erro (%)
744	47	2,75	0,40	3,79	3,58	5,54
744	47	2,75	0,50	3,23	3,29	1,82

O modelo de regressão múltipla obtido para o módulo de elasticidade é dado pela equação 4.4. A representação gráfica apresentada na figura 4.11 mostra que quando os valores do V_p estiverem próximos à 50% e a relação de A/C próxima à 0,50 obtém-se menores módulos de elasticidade.

$$E = 2,07V_p - 0,02V_p^2 - 40,84 - 0,92A/C.V_p + 45,56(A/C)^2 \quad (4.4)$$

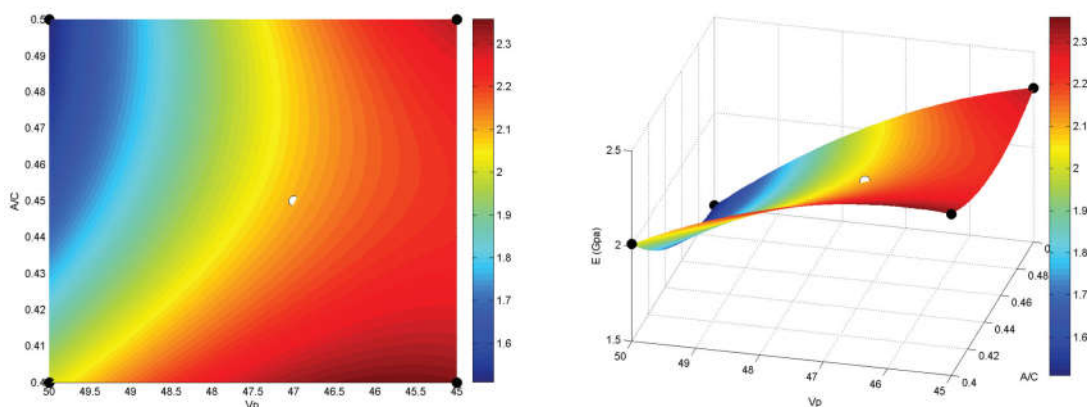


Figura 4.11: Influência do volume de partículas V_p (%) e da relação A/C no módulo de elasticidade aos 28 dias dos bio-concretos.

Os dois pontos intermediários com $V_p = 47\%$ A/C 0,40 e 0,50 (cimento = 744 Kg/m³) foram utilizados para validar a superfície de resposta obtida na análise fatorial para o módulo de elasticidade. Os valores experimentais e preditos estão apresentados na tabela 4.7. Os resultados mostram que houve uma boa correlação entre os valores experimentais e os obtidos pelo modelo, com erros variando entre 0,88 e 6,45%.

Tabela 4.7: Valores médios do módulo de elasticidade aos 28 dias e os valores obtidos pelo modelo fatorial. Exp. = Experimento e Val. = Validação.

Cimento (Kg/m ³)	Partículas (%)	Mistura CCB	Relação A/C	Exp. (MPa)	Val. (MPa)	Erro (%)
744	47	2,75	0,40	2,27	2,25	0,88
744	47	2,75	0,50	2,17	2,03	6,45

4.3.2 Resistência à flexão em 3 pontos

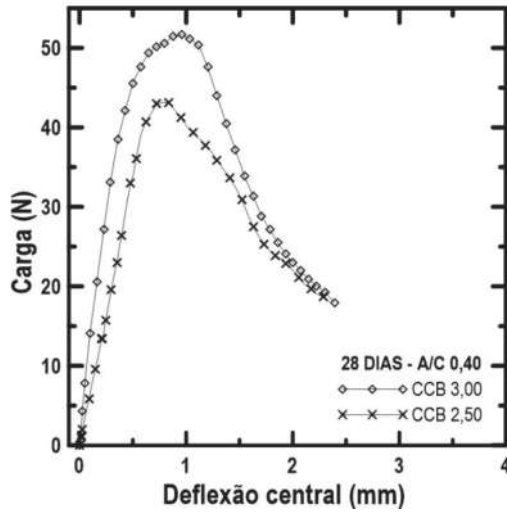
Os bio-concretos foram avaliados sob esforços de flexão em 3 pontos após 28 dias de cura em câmara úmida. Os ensaios foram realizados em corpos - de - prova na condição saturado superficialmente seco por 30 minutos. Os resultados do módulo de ruptura (MOR), de elasticidade (MOE) e as curvas de carga *versus* deflexão central para cada um dos bio-concretos produzidos estão apresentados a seguir.

Os resultados do módulo de ruptura (MOR), de elasticidade (MOE) estão apresentados na tabela 4.8.

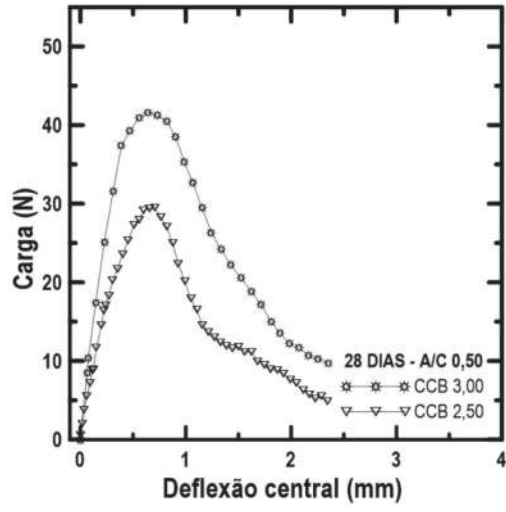
Tabela 4.8: Valores médios da resistência sob flexão dos bio-concretos aos 28 dias de idade, com os respectivos coeficientes de variação (em % entre parênteses).

Cimento (Kg/m ³)	Partículas (%)	Mistura CCB	Relação de A/C	MOR MPa	MOE GPa
711	50	2,50	0,50	1,26 (8,70)	1,42 (6,91)
775	45	3,00	0,50	1,78 (6,59)	2,41 (8,24)
744	47	2,75	0,45	1,76 (0,55)	2,13 (7,97)
711	50	2,50	0,40	1,46 (3,40)	1,88 (3,19)
775	45	3,00	0,40	1,85 (5,06)	2,76 (9,24)

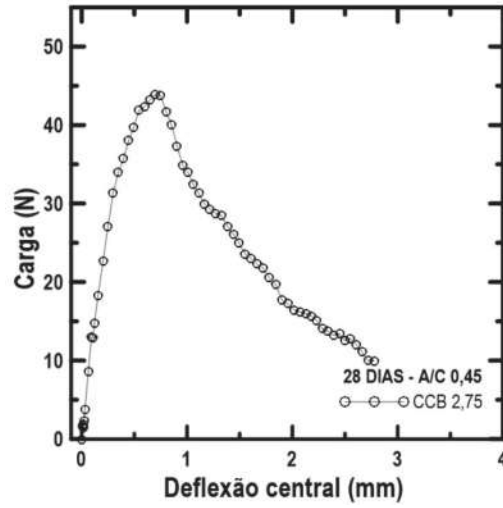
As figuras 4.12 (a) e (b) apresentam as curvas de carga *versus* deflexão central das misturas de diferentes volumes de partículas e mesma relação de A/C, já as figuras 4.12 (d) e (e) mostram as mesmas misturas para diferentes relações de A/C. Todas as curvas referem-se aos bio-concretos ensaiados aos 28 dias de idade. Observando as curvas nota-se que após a carga de pico não houve uma ruptura brusca dos bio-concretos. Houve um comportamento pós-fissuração com redução gradual de carga e aumento de deformação. As partículas de bambu atuaram como reforço e controle da abertura de fissuras na flexão.



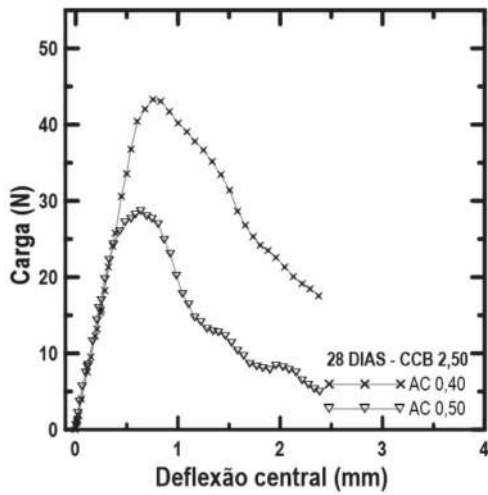
(a) CCB 3,00 e 2,50 A/C 0,40.



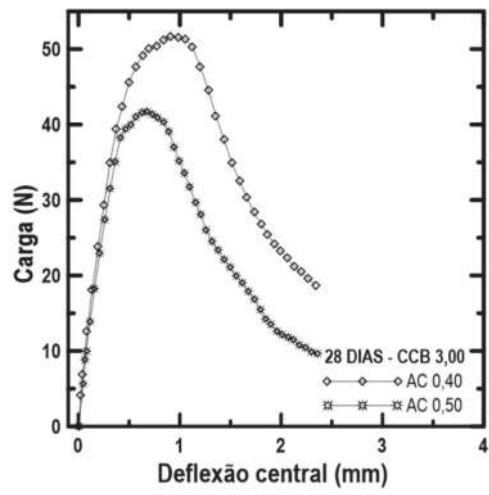
(b) CCB 3,00 e 2,50 A/C 0,50.



(c) CCB 2,75 A/C 0,45.



(d) CCB 2,50 A/C 0,40 e 0,50.



(e) CCB 3,00 A/C 0,40 e 0,50.

Figura 4.12: Curvas típicas de carga *versus* deflexão na flexão em 3 pontos.

Com base nas curvas o bio-concreto $V_p = 50\%$ e $A/C = 0,40$ apresentou MOR 13,6% e MOE 24,4% maior que o $V_p = 50\%$ e $A/C = 0,50$. Já o $V_p = 45\%$ e $A/C = 0,40$ apresentou MOR 3,7% e MOE 12,6% maior que o $V_p = 45\%$ e $A/C = 0,50$. O bio-concreto com $V_p = 45\%$ e $A/C = 0,50$ apresentou MOR 29,2% e MOE 41% maior que o $V_p = 50\%$ e $A/C = 0,50$. Já o $V_p = 45\%$ e $A/C = 0,40$ apresentou MOR 21% e MOE 31,8% maior que o $V_p = 50\%$ e $A/C = 0,40$. Os bio-concretos com $V_p = 45\%$ $A/C = 0,40$ e $0,50$ apresentaram MOR e MOE maiores devido ao maior volume de cimento no conjunto. O bio-concreto $V_p = 47\%$ e $A/C = 0,45$ apresentou-se com MOR e MOE de 1,76 MPa e 2,13 GPa, respectivamente.

Para efeito ilustrativo de comparação foram selecionadas as pesquisas que utilizam biomassas e cimento com métodos de prensagem industrial e manual. Por exemplo, SOUZA (2006) obteve MOR de 4,72 MPa e 7,56 MPa e MOR de 5,24 e 5,65 GPa para o $V_p = 45\%$ com partículas de madeira da espécie Jatobá e Quaruba, respectivamente. MARZUKI *et al.* (2011) obteve MOR e MOE de 8,95 MPa e 4,0 GPa quando utilizou partículas de madeira e $V_p = 50\%$. Nessas pesquisas, tanto o MOR quanto o MOE encontrados são superiores aos valores desta pesquisa, devido ao método de moldagem industrial empregado que comprime e densifica o conjunto.

A figura 4.13 ilustra o tipo de ruptura sofrido pelos corpos - de - prova na flexão. Todos os bio-concretos sofreram uma única ruptura na região central.



(a) Fratura na região central.

(b) Detalhe do corpo - de - prova rompido.

Figura 4.13: Tipo de ruptura dos bio-concretos no ensaio de flexão em 3 pontos.

4.3.2.1 Modelagem da superfície de resposta na flexão em 3 pontos

O modelo de regressão múltipla que relaciona o módulo de ruptura (MOR) com os fatores estudados está apresentado na equação 4.5. A representação gráfica da superfície de resposta está apresentada na figura 4.14. Os resultados obtidos indicam que o MOR é menor com o aumento do V_p e a relação A/C , onde o V_p próximo à 50% e a A/C próxima à 0,50 apresentou o menor valor de MOR.

$$MOR = 2,52Vp - 0,03Vp^2 - 55,68 - 0,26A/C.Vp + 12,22(A/C)^2 \quad (4.5)$$

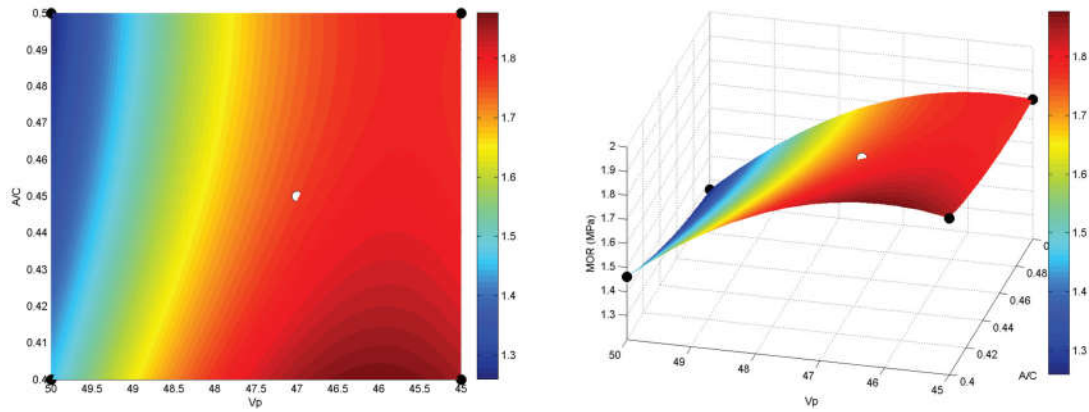


Figura 4.14: Influência do volume de partículas Vp (%) e da relação A/C no MOR aos 28 dias de idade dos bio-concretos.

O modelo de regressão múltipla que relaciona o módulo de elasticidade (MOE) com os fatores estudados está apresentado na equação 4.6. A representação gráfica da superfície de resposta está apresentada na figura 4.15. Os resultados obtidos indicam que o MOE também tende a diminuir com o aumento do Vp e da relação A/C.

$$MOE = 0,01Vp^2 + 33,25 - 1,09Vp - 0,22A/C.Vp + 7,11(A/C)^2 \quad (4.6)$$

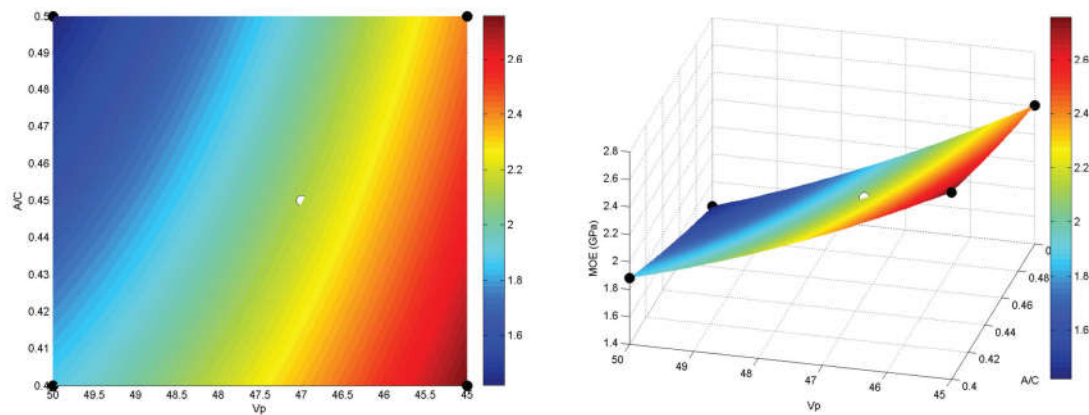


Figura 4.15: Influência do volume de partículas Vp (%) e da relação A/C no MOE aos 28 dias de idade dos bio-concretos.

4.3.3 Resistência à tração direta

Os bio-concretos foram avaliados sob esforços de tração direta após 28 dias de cura em câmara úmida. Os ensaios foram realizados em corpos - de - prova na condição saturado superficialmente seco por 30 minutos. Os resultados da resistência em tração correspondente à tensão máxima (σ_u), a deformação na tensão máxima (ε_u) e as curvas típicas de tensão de tração *versus* deformação dos bio-concretos produzidos estão apresentados a seguir.

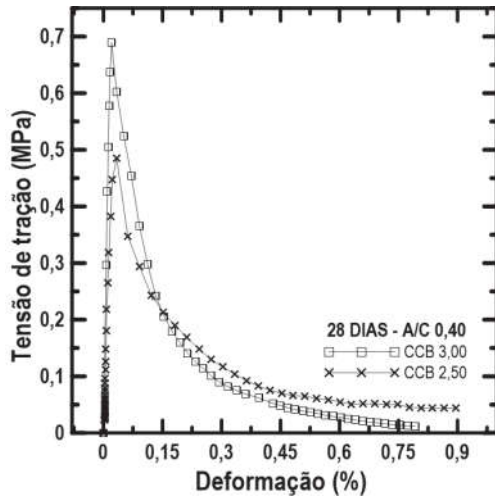
A tabela 4.9 apresenta os valores médios da tensão máxima (σ_u) e da deformação na tensão máxima (ε_u) com os respectivos coeficientes de variação.

Tabela 4.9: Valores médios da resistência à tração dos bio-concretos aos 28 dias de idade, com os respectivos coeficientes de variação (em % entre parênteses).

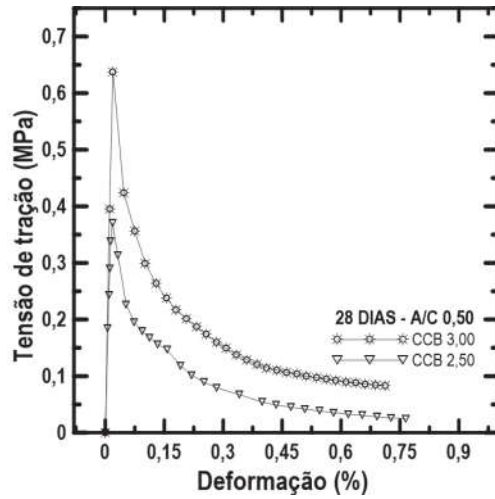
Cimento (Kg/m ³)	Partículas (%)	Mistura CCB	Relação de A/C	σ_u MPa	ε_u %
711	50	2,50	0,50	0,40 (9,60)	0,032 (7,04)
775	45	3,00	0,50	0,66 (3,38)	0,022 (4,10)
744	47	2,75	0,45	0,62 (3,50)	0,030 (8,78)
711	50	2,50	0,40	0,47 (8,75)	0,039 (1,31)
775	45	3,00	0,40	0,72 (9,07)	0,027 (3,26)

As figuras 4.16 (a) e (b) apresentam as curvas de tensão de tração *versus* deformação das misturas de diferentes volumes de partículas e mesma relação de A/C, já as figuras 4.16 (d) e (e) mostram as mesmas misturas para diferentes relações de A/C. Todas as curvas referem-se aos bio-concretos ensaiados aos 28 dias de idade.

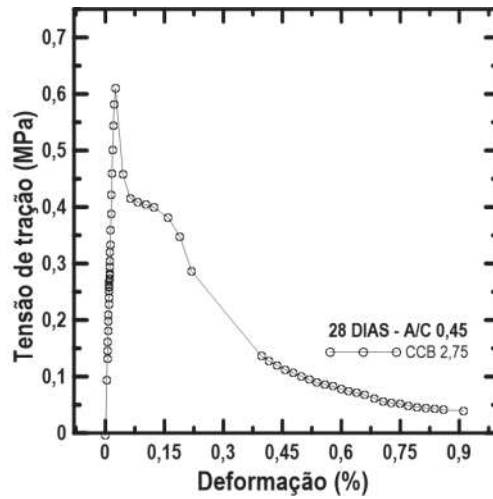
Observando as curvas dos bio-concretos nota-se que houve um comportamento linear elástico até atingir a tensão de pico seguido de uma deformação acentuada. O comportamento observado foi o de materiais dúcteis, onde as partículas de bambu atuaram como reforço e também prolongaram as deformações na resistência à tração direta.



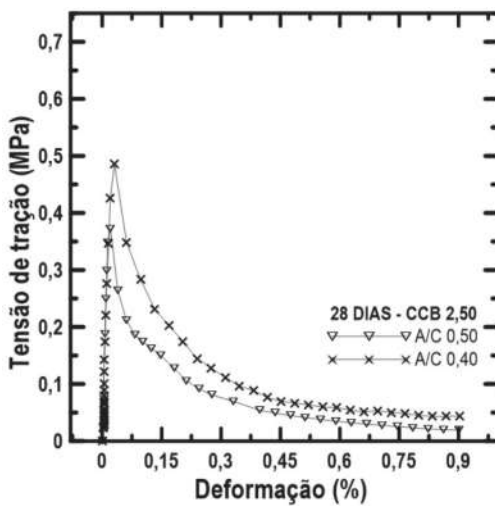
(a) CCB 3,00 e 2,50 A/C 0,40.



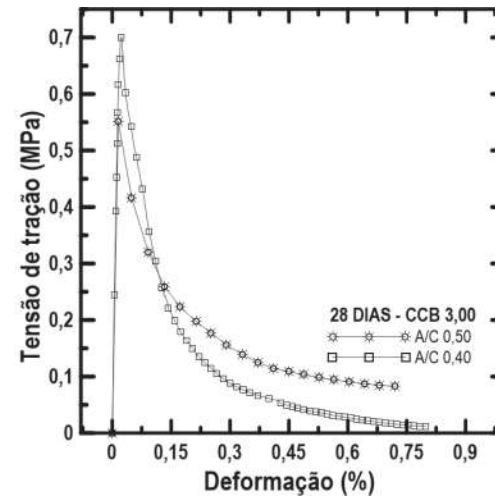
(b) CCB 3,00 e 2,50 A/C 0,50.



(c) CCB 2,75 A/C 0,45.



(d) CCB 2,50 A/C 0,40 e 0,50.



(e) CCB 3,00 A/C 0,40 e 0,50.

Figura 4.16: Curvas típicas de tensão *versus* deformação na tração.

Com base nas curvas o bio-concreto $V_p = 45\%$ e $A/C 0,40$ apresentou maior tensão de tração com 44,4% a mais que o $V_p = 50\%$ e $A/C 0,50$. O bio-concreto $V_p = 50\%$ e $A/C 0,40$ apresentou 14,8% a mais de resistência que o $V_p = 50\%$ e $A/C 0,50$. A mistura com $V_p = 45\%$ e $A/C 0,40$ apresentou resistência de 8,3% a mais que o $V_p = 45\%$ e $A/C 0,50$. O bio-concreto $V_p = 47\%$ e $A/C 0,45$ apresentou-se com tensão de tração e deformação de 0,62 MPa e 0,030%, respectivamente.

A figura 4.17 ilustra o tipo de fissura sofrido pelos corpos - de - prova na tração direta. Uma fissura dentro do L_0 foi formada em todas as misturas dos bio-concretos analisados, não acontecendo diferenças expressivas no modo de ruptura.



(a) CP fissurado durante o ensaio.



(b) Fissuras do ensaio dentro do L_0 .

Figura 4.17: Tipo de ruptura dos bio-concretos no ensaio de tração direta.

4.3.3.1 Modelagem da superfície de resposta na tração direta

O modelo de regressão múltipla que relaciona a tração direta com os fatores estudados está apresentado na equação 4.7. A representação gráfica da superfície de resposta está apresentada na figura 4.18. Os resultados obtidos indicam que a tensão de tração diminuiu com o aumento do volume das partículas (V_p) e maior relação de A/C . Quando o V_p estiver próximo de 45% e a relação A/C próxima de 0,40, maior será o resultado da tensão em tração direta.

$$T = 0,48V_p - 0,01V_p^2 - 9,40 - 0,02A/C.V_p - 0,03(A/C)^2 \quad (4.7)$$

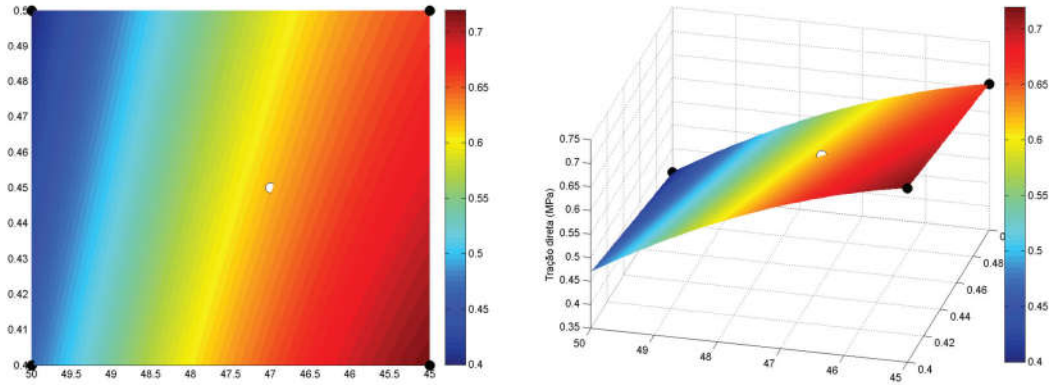


Figura 4.18: Influência do volume de partículas V_p (%) e da relação A/C na tração direta aos 28 dias de idade dos bio-concretos.

4.3.4 Resistência ao cisalhamento

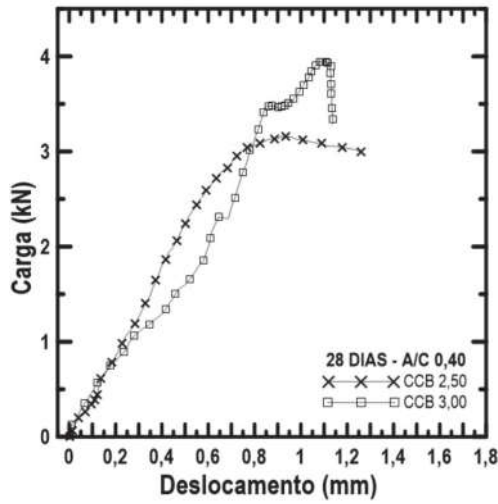
Os bio-concretos foram avaliados sob esforços de cisalhamento após 28 dias de cura em câmara úmida. Os ensaios foram realizados em corpos - de - prova na condição saturado superficialmente seco por 30 minutos. Os resultados da resistência correspondente a carga máxima, tensões últimas (τ_u), deslocamentos centrais do pico (δ) equivalente à carga máxima e as curvas típicas de carga *versus* deslocamento de cada um dos bio-concretos produzidos estão apresentados a seguir.

A tabela 4.10 apresenta os valores médios de carga máxima, tensões últimas (τ_u) e os deslocamentos centrais do pico (δ) com os respectivos coeficientes de variação.

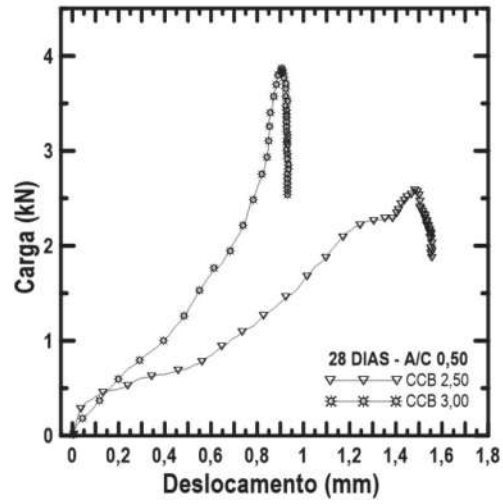
Tabela 4.10: Valores médios resistência ao cisalhamento dos bio-concretos aos 28 dias de idade, com os coeficientes de variação (em % entre parênteses).

Cimento (Kg/m ³)	Partículas (%)	Mistura CCB	Relação de A/C	Carga kN	τ_u MPa	δ mm
711	50	2,50	0,50	2,4 (5,9)	0,7 (5,9)	0,9 (9,0)
775	45	3,00	0,50	3,4 (9,9)	1,0 (9,9)	1,1 (9,5)
744	47	2,75	0,45	3,1 (4,4)	0,9 (4,4)	1,1 (9,1)
711	50	2,50	0,40	3,0 (2,4)	0,9 (2,4)	0,9 (0,7)
775	45	3,00	0,40	3,5 (8,8)	1,1 (8,8)	1,2 (9,7)

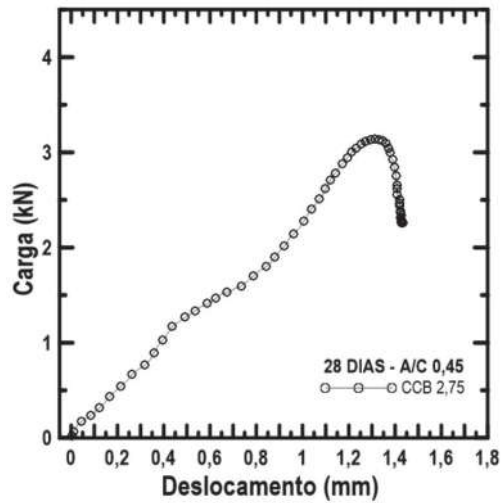
As figuras 4.19 (a) e (b) apresentam as curvas de carga *versus* deslocamento das misturas de diferentes volumes de partículas e mesma relação de A/C, já as figuras 4.16 (d) e (e) mostram as mesmas misturas para diferentes relações de A/C. Todas as curvas referem-se aos bio-concretos ensaiados aos 28 dias de idade. Observando as curvas nota-se uma amplitude do deslocamento em função da carga, seguida de uma região de pico com queda brusca.



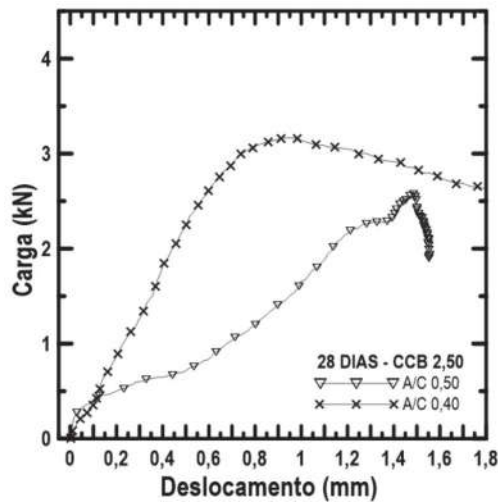
(a) CCB 3,00 e 2,50 A/C 0,40.



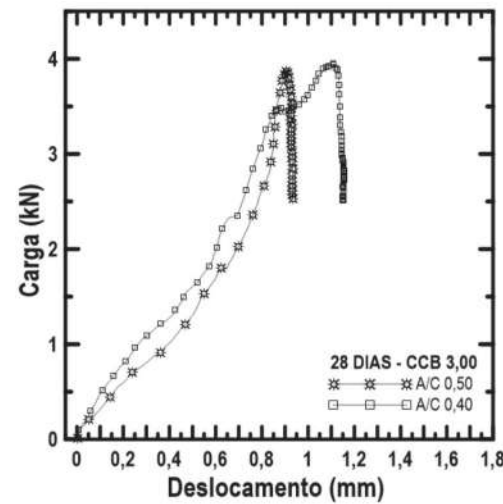
(b) CCB 3,00 e 2,50 A/C 0,50.



(c) CCB 2,75 A/C 0,45.



(d) CCB 2,50 A/C 0,40 e 0,50.

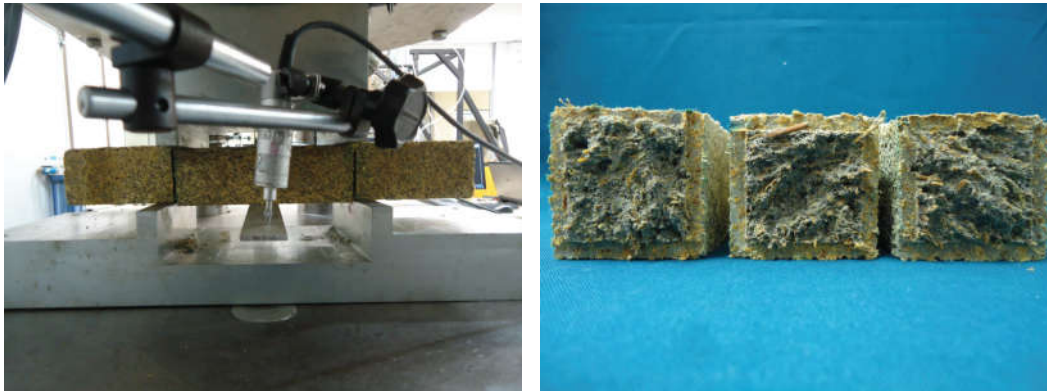


(e) CCB 3,00 A/C 0,40 e 0,50.

Figura 4.19: Curvas típicas de carga *versus* deslocamento no cisalhamento.

Com base nas curvas o bio-concreto $V_p = 45\%$ e $A/C 0,40$ apresentou carga máxima 30,3% a mais que o $V_p = 50\%$ e $A/C 0,40$. Já o $V_p = 50\%$ e $A/C 0,40$ apresentou 19,4% a mais de carga que o $V_p = 50\%$ e $A/C 0,50$. O bio-concreto $V_p = 45\%$ e $A/C 0,40$ apresentou carga de 2,5% maior que o bio-concreto $V_p = 45\%$ e $A/C 0,50$. Os bio-concretos com menores volumes de partículas $V_p = 45\%$ $A/C 0,40$ e $0,50$ suportaram cargas maiores de 3,5 e 3,4 kN. O bio-concreto $V_p = 47\%$ e $A/C 0,45$ apresentou-se com carga máxima, tensão última e deslocamento de pico de 3,11 kN, 0,97 MPa e 1,15 mm, respectivamente.

A figura 4.20 ilustra o modo de fratura sofrida pelos corpos - de - prova no cisalhamento. Observando a figura 4.20 (b) nota-se que as partículas de bambu foram arrancadas da matriz cimentícia durante o ensaio. O que pode justificar a perda de carga seguida de ganho de carga das curvas dos bio-concretos estudados.



(a) CP durante o ensaio de cisalhamento.

(b) Plano de ruptura no cisalhamento.

Figura 4.20: Visualização do ensaio e superfícies fraturadas ao cisalhamento.

4.3.4.1 Modelagem da superfície de resposta no cisalhamento

O modelo de regressão múltipla que relaciona a carga cisalhante com os fatores estudados está apresentado na equação 4.8. A representação gráfica da superfície de resposta está apresentada na figura 4.21. Os resultados obtidos indicam que a carga cisalhante aumenta quando o V_p estiver próximo de 45% e a relação A/C próximo de 0,40.

$$Carga = 0,53V_p - 5,37 - 1,02A/C.V_p + 50(A/C)^2 \quad (4.8)$$

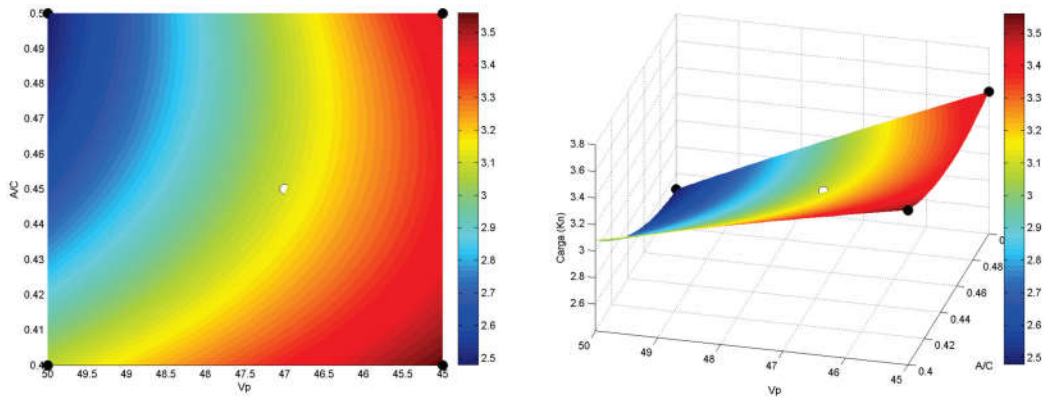


Figura 4.21: Influência do volume de partículas V_p (%) e da relação A/C no cisalhamento aos 28 dias de idade dos bio-concretos.

4.4 Propriedades físicas

4.4.1 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade dos bio-concretos foi avaliada após 28 dias de cura em câmara úmida. O ensaio foi realizado em corpos - de - prova seco até a constância de massa em estufa ($T = 110^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) após uma semana da secagem. As curvas de absorção de água por capilaridade e estágios de absorvidades de cada um dos bio-concretos estão apresentados a seguir. As curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo estão apresentadas na figura 4.22.

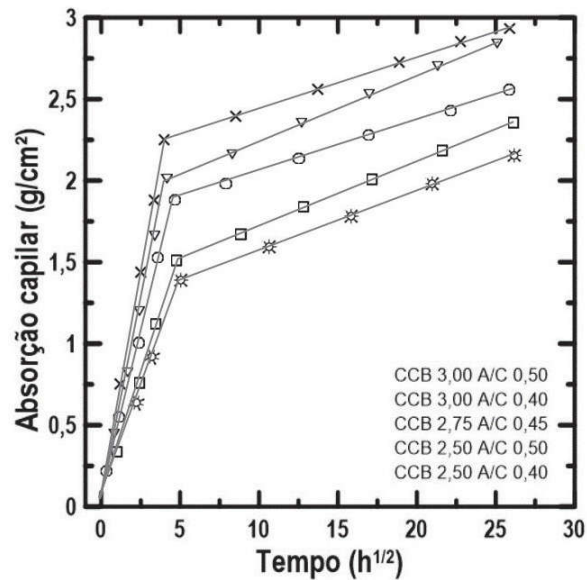


Figura 4.22: Absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada.

A figura 3.41 do capítulo anterior mostra uma aproximação das curvas desta pesquisa com o gráfico típico da absorção de água por capilaridade *versus* a raiz quadrada do tempo. Nota-se nas curvas que o estágio S_1 apresenta comportamento linear acentuado com maior ganho de massa de água em menor tempo. Já o estágio S_2 que é o de saturação, apresentou-se com um comportamento não linear menos acentuado quando comparado com o S_1 .

Na tabela 4.11 estão apresentados os valores de absorvidades dos bio-concretos estudados no estágio de absorção (S_1), estágio de saturação (S_2) onde ambos os valores estão em $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$. Além deles, também estão expostos os pontos de transição (P_t) dos bio-concretos.

Tabela 4.11: Valores dos estágios de absorvidades e pontos de transição.

Cimento (Kg/m³)	Partículas (%)	Mistura CCB	Relação de A/C	P_t g/cm²	P_t h^{1/2}	S₁	S₂
711	50	2,50	0,50	1,95	4,10	0,106	0,002
775	45	3,00	0,50	1,33	4,92	0,078	0,003
744	47	2,75	0,45	1,83	4,52	0,089	0,002
711	50	2,50	0,40	2,20	4,01	0,115	0,001
775	45	3,00	0,40	1,46	4,86	0,079	0,002

Com base nas absorvidades, houve pequenas diferenças entre as mesmas misturas e nota-se que a maior absorvidade foi em função do maior volume de partículas de bambu, referentes ao bio-concreto $V_p = 50\%$ A/C 0,40 e 0,50. O comportamento pode ser explicado pelos bio-concretos com maior volume de partículas absorverem rapidamente quantidades maiores de água, tendência e característica natural das biomassas.

Na tabela 4.12 estão apresentados os valores médios de absorção de água por capilaridade após 72 horas e 672 horas (28 dias) de ensaio.

Tabela 4.12: Valores médios de absorção de água por capilaridade após 72 horas e 672 horas de ensaio, com os respectivos coeficientes de variação (em % entre parênteses).

Cimento (Kg/m³)	Partículas (%)	Mistura CCB	Relação de A/C	Abs_{72h}	Abs_{672h}
711	50	2,50	0,50	2,11 (5,36)	2,93 (6,79)
775	45	3,00	0,50	1,58 (8,46)	2,65 (3,99)
744	47	2,75	0,45	1,75 (8,51)	2,81 (5,38)
711	50	2,50	0,40	2,26 (4,06)	3,00 (6,77)
775	45	3,00	0,40	1,65 (7,53)	2,77 (4,42)

Os resultados mostram que em 72 horas ocorreu 75,33% para o bio-concreto com $V_p= 50\%$ A/C e 0,40, 72,01% para o $V_p= 50\%$ e A/C 0,50, 62,27% para o $V_p= 47\%$ e A/C 0,45, 59,56% para o $V_p= 45\%$ e A/C 0,40, 59,62% para o $V_p= 45\%$ e A/C 0,50 de ascensão capilar aos 28 dias de ensaio. Após 25 dias do início do ensaio, todos os bio-concretos já encontravam-se saturados. O maior aumento de absorção capilar também aconteceu nos bio-concretos com maiores volumes de partículas e menores relação de A/C, no $V_p= 50\%$ A/C 0,40 e 0,50.

4.4.2 Retração por secagem e perda de massa

Os bio-concretos foram avaliados na retração por secagem após 28 dias de cura em câmara úmida. O ensaio foi realizado em corpos - de - prova saturado retirado da câmara úmida ($U = 100\%$ e $T = 21^\circ\text{C}$). As curvas de retração por secagem e perda de massa de cada um dos bio-concretos produzidos estão apresentados a seguir.

A figura 4.23 (a) apresenta as curvas de retração por secagem e a figura 4.23 (b) apresenta as curvas de perda de massa dos bio-concretos, após 86 dias de ensaio.

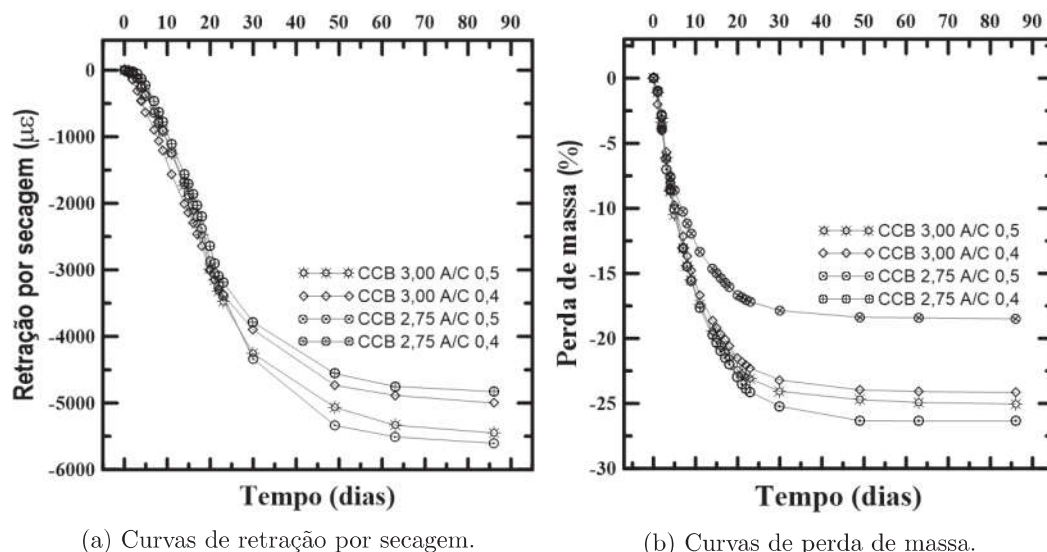


Figura 4.23: Curva de retração por secagem e perda de massa dos bio-concretos.

A figura 4.23 (a) mostra que no segundo dia de ensaio o bio-concreto com $V_p= 45\%$ e A/C 0,40 apresentou retração de $145 \mu\epsilon$, o com $V_p= 45\%$ e A/C 0,50 cerca de $44 \mu\epsilon$, já o bio - concreto $V_p= 47\%$ e A/C 0,50 apresentou $43 \mu\epsilon$ e o $V_p= 47\%$ e A/C 0,40 apresentou $24 \mu\epsilon$. Com 86 dias de ensaio o bio - concreto $V_p= 47\%$ e A/C 0,50 apresentou a maior retração com cerca de $5600 \mu\epsilon$ e o $V_p= 45\%$ e A/C 0,50 obteve $5500 \mu\epsilon$, ambos os bio-concretos que apresentavam maiores relações de A/C.

O bio-concreto com $V_p= 45\%$ e A/C 0,40 apresentou retração de $5000 \mu\epsilon$ e o $V_p= 47\%$ e A/C 0,40 de $4800 \mu\epsilon$.

A figura 4.23 (b) mostra que com 86 dias de ensaio o bio-concreto com $V_p= 47\%$ e A/C 0,50 apresentou maior perda de massa. O bio-concreto com $V_p= 45\%$ e A/C 0,40 perdeu mais massa que o $V_p= 47\%$ e A/C 0,40. O bio-concreto com $V_p= 47\%$ e A/C 0,40 apresentou menor perda de massa, já o $V_p= 47\%$ e A/C 0,50 apresentou maior perda de massa. O bio-concreto com $V_p= 47\%$ e A/C 0,40 e $V_p= 45\%$ e A/C 0,40 apresentaram menores perdas de água em função do tempo e menores deformações na retração.

A retração por secagem está diretamente relacionada a quantidade de água perdida pelo corpo - de - prova para o ambiente externo. O bio-concreto com $V_p= 47\%$ e A/C 0,50 e com $V_p= 45\%$ e A/C 0,50 acarretaram em maiores valores de retração já que a quantidade de água da relação de A/C no conjunto era maior. Esse fenômeno já foi observado por TOLEDO FILHO *et al.* (2005), quando a retração por secagem aumentou com a incorporação de biomassas vegetais e deve-se a estrutura porosa das partículas que possibilitam o movimento da água na matriz cimentícia.

Para efeito ilustrativo de comparação foi selecionada a pesquisa que utiliza biomassas e cimento com método de prensagem manual, referente à DA GLORIA (2015) que obteve retração na ordem de $2000 \mu\epsilon$ utilizando biomassa de madeira com $V_p= 45\%$. Na pesquisa também foi observado uma rápida retração e perda de água nos bio-concretos com maior relação de A/C. Ressalta-se que as maiores deformações de retração por secagem encontradas nesta pesquisa sucederam-se em função do método de moldagem adotado, que dispensa a prensagem e conseqüentemente os bio-concretos não foram comprimidos nos moldes.

4.5 Impacto ambiental do bio-concreto

Seguindo a metodologia proposta por CALDAS *et al.* (2017), foi calculado o impacto ambiental do bio-concreto $V_p= 50\%$; A/C 0,45 e com consumo de cimento de $711 \text{ Kg}/\text{m}^3$. Foram quantificadas as emissões de carbono do bio-concreto utilizando a metodologia de pegada de carbono, a partir das diretrizes da ISO 14067:2014. O estudo foi dividido nas seguintes etapas: (1) caracterização do bio-concreto; (2) definição do objetivo e escopo do estudo; (3) análise de inventário; (4) avaliação de impacto ambiental. A pegada de carbono do bio-concreto foi avaliada no contexto brasileiro. A figura 4.24 mostra o sistema de produção estudado cuja fronteira adotada foi do berço ao portão. É importante ressaltar que foi considerado como

o fim de vida do bio-concreto o aterramento sanitário, que é a prática mais utilizada no Brasil. No aterramento 98% do carbono biogênico continua armazenado indefinidamente no material.

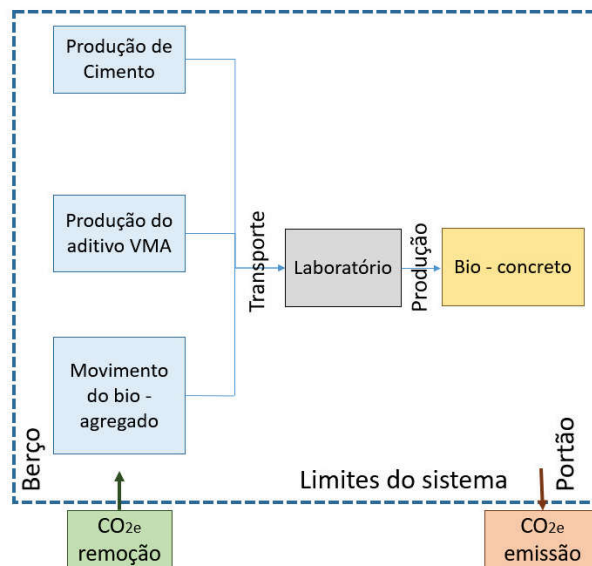


Figura 4.24: Limites do sistema de produção (CALDAS *et al.*, 2017).

4.5.1 Definição do objetivo e escopo do estudo

O objetivo do estudo foi a quantificação das emissões de carbono do bio-concreto. O escopo estudado foi do tipo berço ao portão em que foi considerado o transporte da matéria-prima e a produção do bio-concreto no laboratório. A unidade funcional escolhida foi o volume de compósito produzido (em m^3). Neste sentido, foram quantificadas as emissões de CO_2 para a produção de $1 m^3$ de bio-concreto de bambu.

4.5.2 Análise do inventário

Os dados de inventário de CO_{2e} do bio-agregado e VMA foram retirados do banco de dados do *Ecoinvent* (versão 3.3) e os dados do cimento foram coletados na declaração ambiental de produtos EPDs da empresa VOTORANTIMN (2016). O processo de cultivo do bio-agregado de bambu não foi considerado devido a procedência ser resíduos de uma indústria madeireira. No entanto as emissões de CO_{2e} na produção no laboratório foram consideradas.

O carbono biogênico (M_{CO_2}) foi calculado de acordo com a metodologia de CALDAS *et al.* (2017). Os valores da porcentagem de carbono na matéria seca foram obtidos da literatura. O carbono biogênico pode ser definido como a fixação de CO_2

atmosférico no bio-agregado durante seu crescimento. O fator de energia de CO_{2e} foi coletado dos Ministério da Ciência e Tecnologia (2016). O valor médio de 0.064 $\text{kgCO}_{2e}/\text{kWh}$ de 2006 até 2015 foi adotado nesse estudo.

Para o transporte do material o diesel foi utilizado com o consumo médio de 0.019 $\text{l}/\text{t.km}$ e FCO_{2eq} de 2.64 $\text{kgCO}_{2e}/\text{l}$. Resultando no FCO_{2e} de 0.050 $\text{kgCO}_{2e}/\text{t.km}$. A distância entre a cidade de origem do material até o Rio de Janeiro (local de produção) foram consideradas constantes num raio de 200 km, uma prática comum adotada no Brasil para transporte de materiais de construção.

4.5.3 Avaliação de Impacto Ambiental

Foi utilizada a metodologia CML-IA que possui uma abordagem do tipo *midpoint* para a avaliação dos impactos ambientais. Como o presente estudo trata da pegada de carbono foi utilizado a categoria de impacto ambiental de potencial de aquecimento global para 100 anos (*global warming potential - GWP 100*), em dióxido de carbono equivalente à 133,2 $\text{kgCO}_{2e}/\text{m}^3$ e referente ao bio-concreto com $V_p=50\%$ e A/C 0,45. Foi utilizado o *SimaPro* e a planilha Excel para a modelagem dos dados.

4.5.4 Interpretação do impacto ambiental do bio-concreto

Para efeito ilustrativo calculou-se utilizando-se a mesma metodologia, a pegada de carbono de algumas formulações de concreto normalmente utilizados na produção de blocos de concreto. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 4.13.

Tabela 4.13: Concretos normalmente utilizados na produção de blocos de concreto. Onde: * Bio-concreto com $V_p=50\%$ e A/C 0,45 desta pesquisa. ⊖ Bloco de concreto para vedação. ⊗ Bloco de concreto estrutural (divisórias internas). ⊕ Bloco de concreto estrutural (para fachadas). ⊗ Argamassa de assentamento industrializada.

Família do concreto		Emissão de CO_2
Bio-concreto	*	133,20 $\text{kgCO}_{2e}/\text{m}^3$
Bloco vedação	⊖	268,00 $\text{kgCO}_{2e}/\text{m}^3$
Bloco 4MPa	⊗	341,10 $\text{kgCO}_{2e}/\text{m}^3$
Bloco 6MPa	⊕	365,50 $\text{kgCO}_{2e}/\text{m}^3$
Argamassa	⊗	361,80 $\text{kgCO}_{2e}/\text{m}^3$

Em termos de volume de CO_2 por m^3 , o bio-concreto com $V_p=50\%$ e A/C 0,45 pode ser classificado como um concreto de baixo carbono quando comparado as famílias de concreto e argamassa apresentada na tabela 4.13.

Capítulo 5

Conclusões

A partir dos ensaios realizados no presente estudo pode-se concluir que, em geral, é possível obter concretos de baixa emissão de carbono com emissão de $133,20 \text{ kgCO}_{2e}/\text{m}^3$ apresentando adequadas propriedades físicas e mecânicas para uso na construção civil. A seguir apresenta-se conclusões mais específicas relacionadas a dosagem e a caracterização experimental e ambiental dos bio-concretos estudados.

No que se refere a transformação dos resíduos dos colmos do bambu estudado em bio-agregados miúdos, a moagem sequencial utilizando-se os moinhos industrial e de facas mostrou-se bastante efetiva. Partículas angulares e alongadas foram obtidas com o processamento realizado. Os ensaios físicos indicaram que a massa específica aparente das partículas de bambu foi de $0,58 \text{ g/cm}^3$ e que a absorção até a saturação foi de 110,57%. A taxa de absorção de água dos bio-agregados é muito mais alta nos primeiros minutos de contato da biomassa com a água. Após 5 minutos, por exemplo, a absorção de água já era de cerca de 65% da absorção total medida. A técnica do filó e centrífuga utilizada mostrou-se bastante adequada para se determinar a absorção de água das biomassas no tempo.

Para remoção dos extrativos da biomassa de bambu, o presente estudo indicou que três lavagens em água quente ($T = 80^\circ\text{C}$ por 1h) garantindo uma expressiva redução de 88,9% dos extrativos da biomassa da variedade de bambu estudada. Assim, não se observou retardo na pega dos bio-concretos que puderam ser desmoldados após 24 horas de cura a uma temperatura de 21°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) e umidade relativa do ar de 100% ($\pm 2\%$).

O método de dosagem racional utilizado, com compensação da água de absorção e uso dos finos de bambu e agente modificador de viscosidade, permitiu a moldagem de misturas elevada trabalhabilidade ($290 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$) isentas de exsudação e segregação. O procedimento foi utilizado, com robustez, na dosagem das misturas

utilizadas no desenho fatorial 2^2 utilizado com o volume de partículas variando de 45 a 50% e fatores A/C variando de 0,40 a 0,50.

A densidade saturada (ρ_1) dos bio-concretos variou entre 1058,65 e 1190,60 Kg/m^3 enquanto que na condição seca (ρ_2) a densidade variou de 694,73 a 788,47 Kg/m^3 .

Os ensaios mecânicos, executados na condição do corpo - de - prova saturado superficialmente seca, mostraram valores de resistência à compressão variando entre 2,25 e 4,20 MPa com módulos de elasticidade variando de 1,51 e 2,35 GPa. Na flexão em três pontos o módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) obtidos variaram de 1,26 à 1,85 MPa e 1,42 à 2,76 GPa, respectivamente. Na tração direta a tensão de tração máxima variou de 0,40 à 0,72 MPa. No cisalhamento as tensões cisalhantes variaram de 0,77 a 1,11 MPa. Os resultados obtidos mostram que os materiais possuem potencial para várias aplicações na construção civil.

Comparando-se os resultados mecânicos nota-se que o bio-concreto com $V_p = 45\%$ e A/C 0,40 apresentou propriedades mecânicas mais altas. Nesse caso a resistência à compressão uniaxial atingiu 4,20 MPa e módulo de elasticidade de 2,35 GPa. Na flexão em três pontos o MOR foi 1,85 MPa e o MOE foi 2,76 GPa. Na tração direta a tensão máxima foi de 0,72 MPa e a deformação de 0,027%. No cisalhamento a tensão cisalhante foi 1,11 MPa. A densidade saturada foi de 1190,15 Kg/m^3 e seca foi de 788,47 Kg/m^3 .

A análise fatorial realizada para as várias propriedades mostraram que ambos fatores (volume de partículas e relação água/cimento) influenciam fortemente no comportamento dos bio-concretos. Nota-se, no entanto, que os resultados são mais influenciados nos limites estudados, pelo aumento do volume de partículas. Os modelos matemáticos foram validados utilizando-se os resultados dos ensaios de compressão (superfícies de resposta de resistência a compressão e módulo de elasticidade) e mostraram-se bastante adequados para o espaço das variáveis estudado, com erros inferiores a 7%.

A avaliação do impacto ambiental realizada obtida utilizando-se a ISO 14067: 2014 indicou que a pegada de carbono do bio-concreto com $V_p = 50\%$ e A/C 0,45 foi de 133,20 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$. Nota-se que o resultado encontrado para o bio-concreto torna sua classificação como concreto de baixo carbono (CBC).

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

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

- Estudar a influência microestrutural do tratamento das partículas (lavagem em água com $T = 80^{\circ}\text{C}$ por 1h), buscando observar a morfologia e o efeito do tratamento em sua superfície.
- Incrementar e enriquecer os bio-concretos com novas combinações de traços e modificações da matriz cimentícia. Testar diferentes matrizes para diminuir o volume de cimento utilizado e conseqüentemente reduzir as emissões de CO_2 .
- Analisar a durabilidade, expondo o material a ensaios de envelhecimento natural e acelerado, através de ciclos alternados de molhagem e secagem.
- Desenvolver um protótipo de painel que possibilite a montagem seca *in loco*, com facilidade e rapidez de moldagem e manuseio, com baixa densidade.
- Analisar o impacto ambiental e a pegada de carbono dos bio-concretos produzidos com o método da prensagem industrial e manual, comparando as emissões desta pesquisa que não utiliza compactação na moldagem.
- Avaliar a procedência e eficiência de diferentes tipos de acabamentos, testando os painéis para aplicação em escala industrial.

Referências Bibliográficas

- AL ROUSAN, T. M., 2005, *Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system*. Tese de Doutorado, Texas AM University.
- AMZIANE, S., SONEBI, M., 2016, “Overview on Biobased Building Material made with plant aggregate”, *RILEM Technical Letters*, v. 1, pp. 31–38.
- BAI, X., 1996, *Experimental and numerical evaluations of structural bamboo-based composite materials*.
- BERALDO, A., 1997, “Bambu-cimento: alternativa para construções rurais”, *Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis*, v. 1, pp. 145–50.
- BERALDO, A. L., 2011, “Compuestos de biomasa vegetal y cemento”, *Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción*, v. 1, pp. 301–326.
- BERALDO, A. L., 1994, *Généralisation et optimisation de la fabrication d’un composite biomasse végétale-ciment à variations dimensionnelles limitées vis-à-vis des variations de l’humidité*. Tese de Doutorado, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France.
- BERALDO, A. L., AZZINI, A., CASCARDO, C. R., RIBEIRO, C. A., 2003, “Desempenho de um dispositivo para efetuar o tratamento químico de colmos de bambu: avaliação por ultra-som”, *Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis*.
- BILCATI, G. K., 2015, *Produção de painéis de cimento Portland reforçados com fibra de curauá (Ananas erectifolius)*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- CALDAS, L., DA GLORIA, M., SANTOS, D., ANDREOLA, V., PEPE, M., TOLEDO FILHO, R., 2017, “Carbon footprint for Bamboo particles, rice

- husk and wood shavings - cement composites”, *II International Conference on Bio - based Building Materials and I Conference on ECOlogical valorisation of GRANular and FIBrous materials*, pp. 1–7.
- CASSILHA, A. C., PODLASEK, C. L., JUNIOR, E. F. C., DA SILVA, M. C., MENGATTO, S. N. F., 2004, “Indústria moveleira e resíduos sólidos: considerações para o equilíbrio ambiental”, v. 8, pp. 209–228.
- CASTRO, V. G. D., 2015, *Espécies da amazônia na produção de compósitos madeira-cimento por vibro-compactação*. Tese de Doutorado, Departamento de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- DA GLORIA, M. Y. R., 2016, “Influence of the wood shavings/cement ratio on the thermo-mechanical properties of lightweight wood shavings - cement based composites”, *VI Amazon and Pacific Green Materials Congress and Sustainable Construction Materials LAT - RILEM Conference*, v. 6, pp. 1–9.
- DA GLORIA, M. Y. R., 2015, *Desenvolvimento e caracterização de painéis sanduíches de concreto com núcleo leve e faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal*. Tese de Mestrado, Programa de Pós graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- DA SILVA, M. A., 2015, *Desenvolvimento e caracterização experimental de concretos autoadensáveis de alto desempenho contendo seixo rolado*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- FENGEL, D., WEGENER, G., 1983, *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter.
- FIALHO, E. G., DA SILVA, A. L. P., TONHOLO, J., 2005, “Desenvolvimento da cadeia produtiva do bambu: uma oportunidade para empreender”, v. 1, n. 1.
- FILHO, M. T., AZZINI, A., 1987, “Estrutura anatômica, dimensões das fibras e densidade básica de colmos de *Bambusa vulgaris* Schrad”, v. 36, n. 1, pp. 43–50.
- FONTES, C. M. A., 2008, *Utilização das Cinzas de Lodo de Esgoto e de Resíduo Sólido Urbano em Concretos de Alto Desempenho*. Tese de Doutorado, Programa de Pós graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

- FRYBORT, S., MAURITZ, R., TEISCHINGER, A., MÜLLER, U., 2008, “Cement bonded composites – A mechanical review”, *BioResources*, v. 3, n. 2, pp. 602–626.
- GHAVAMI, K., 1989, “Application of bamboo as a low-cost energy material in civil engineering”. In: *Symposium Materials for Low Income Housing*, v. 3, pp. 526–536.
- GHAVAMI, K., TOLEDO FILHO, R. D., 1992, “Desenvolvimento de materiais de construção de baixo consumo de energia usando fibras naturais, terra e bambu”, *Revista Engenharia Agrícola*, v. 2, pp. 1–19.
- GHAVAMI, K., 2005, “Bamboo as reinforcement in structural concrete elements”, *Cement and concrete composites*, v. 27, n. 6, pp. 637–649.
- GHAVAMI, K., MARINHO, A. B., 2005, “Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 9, n. 1, pp. 107–114.
- GRECO, T. M., CROMBERG, M., 2011, *Bambu: cultivo e manejo*. Insular.
- HULL, D., CLYNE, T., 1996, *An introduction to composite materials*. Cambridge university press.
- JANSSEN, J. J., 2000, *Designing and building with bamboo*. International Network for Bamboo and Rattan China.
- JANSSEN, J. J. A., 1981, *Bamboo in building structures*. Tese de Doutorado, Technische Hogeschool Eindhoven.
- KLOCK, U., MUÑIZ, G. D., HERNANDEZ, J. A., ANDRADE, A. D., 2005, “Química da madeira”, *Fupef, Curitiba*.
- KRAVCHENKO, G. A., FERREIRA, E. M., PASQUALETTO, A., 2015, “Utilização de Resíduos do Processamento de Chapas Laminadas de Bambu para Produção de Chapas Recompuestas”, v. 19, n. 21, pp. 1499–1507.
- KURPIEL, E., MOSLEMI, A. A., 1994, “Acceptance of Mineral Composites in North America”, *International Inorganic - Bonded Wood and Fiber Composite Materials Conference*, v. 4, pp. 124–126.
- LAHR, F. A. R., SAVASTANO JUNIOR, H., FIORELLI, J., 2015, *Non-conventional building materials based on agro-industrial wastes*. Tiliform.

- LATORRACA, J. V. D. F., 2000, *Eucalyptus spp. na produção de painéis de cimento-madeira*. Tese de Doutorado, Departamento de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- LIESE, W., 1985, *Bamboos: biology, silvics, properties, utilization*. TZ Verlagsgesellschaft.
- LIESE, W., 1992, “The structure of bamboo in relation to its properties and utilization”. In: *Zhu, S., Li, W., Zhang, X. Wang, Z. ed., Bamboo and its use. Proceedings of the International symposium on Industrial Use of Bamboo, Beijing, China*, pp. 7–11.
- LIESE, W., 1998, *The anatomy of bamboo culms*, v. 18. Brill.
- LIMA, M. D., 2005, *Influência de três tipos de tratamentos físicos na resistência à compressão de compósitos cimento-madeira à base de resíduos de serraria*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal do Pará, Belém.
- LIMA, P., 2004, *Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- LOPEZ, O. H., 2003, *Bamboo: The gift of the gods*. O. Hidalgo-Lopez.
- MACÊDO, A. N., SOUZA, A. A. C., NETO, P., BORGES, B., 2012, “Chapas de cimento - madeira com resíduos da indústria madeireira da Região Amazônica”, *Ambiente Construído*, v. 12, n. 2, pp. 131–150.
- MANZATTO, C. V., DE FREITAS JUNIOR, E., PERES, J. R. R., 2002, *Uso agrícola dos solos brasileiros*. Embrapa.
- MARANGON, E., 2006, *Desenvolvimento e caracterização de concretos auto-adensáveis reforçados com fibras de aço*. Tese de Mestrado, Programa de Pós graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- MARINHO, N. P., 2013, “Características das fibras do bambu (*Dendrocalamus Giganteus*) e potencial de aplicação em painéis de fibra de média densidade”, .
- MARTINS, S. C. F., 2002, *Pisos de argamassa reforçada com partículas de bambu*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

- MARZUKI, A., RAHIM, S., HAMIDAH, M., RUSLAN, R. A., 2011, “Effects of wood: cement ratio on mechanical and physical properties of three-layered cement - bonded particleboards from *Leucaena leucocephala*”, *Journal of Tropical Forest Science*, pp. 67–72.
- MATOSKI, A., 2005, *Utilização de pó de madeira com granulometria controlada na produção de painéis de cimento - madeira*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- MENDES, L. M., LOSCHI, F. A. P. L., DE RAMOS, L. E., PAULA, P., MENDES, R. F., JÚNIOR, J. B. G., MORI, F. A., 2015, “Potencial de utilização da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla* na produção de painéis cimento–madeira”, *Cerne*, v. 17, n. 1, pp. 69–75.
- MOIZÉS, F. A., 2007, *Painéis de Bambu, uso e aplicações: uma experiência didática nos cursos de Design em Bauru, São Paulo*. Tese de Mestrado, Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação – Universidade Estadual Paulista, São Paulo.
- MOSLEMI, A., 1999, “Emerging technologies in mineral - bonded wood and fiber composites”, *Advanced Performance Materials*, v. 6, n. 2, pp. 161–179.
- MURAD, J. R. D. L., 2011, *Estudo experimental das propriedades físicas, mecânicas e aplicações estruturais do bambu *Guadua spp* de Assis Brasil - AC*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal Fluminense, RJ.
- NAVARRO, E. H. A., 2002, *Estudo teórico-experimental à flexão de lajes de concreto reforçadas com forma permanente de bambu*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ.
- NOGUEIRA, C. D. L., 2008, *Painel de bambu laminado colado estrutural*. Tese de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- NOH, M. M., AHMAD, Z., IBRAHIM, A., WALKER, P., 2016, “Development of New Prefabricated Wall Constructed Using Wood - wool Cement Composite Panel”, *Procedia Environmental Sciences*, v. 34, pp. 298–308.
- OHRNBERGER, D., 1999, *The bamboos of the world: annotated nomenclature and literature of the species and the higher and lower taxa*. Elsevier.

- PADOVAN, R. B., 2010, “O bambu na arquitetura: design de conexões estruturais”, .
- PARCHEN, C. F. A., 2013, *Compósito madeira cimento de baixa densidade produzido com compactação vibro dinâmica*. Tese de Doutorado, Departamento de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná.
- PEREIRA, M., 2006, “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 (2003/04323-7)*.
- PEREIRA, M. A. R., BERHALDO, A. L., 2007, *Bambu de corpo e alma*.
- PEREIRA, M. A. D. R., 2001, “Bambu: espécies, características e aplicações”, *Bauru: UNESP*.
- PEREIRA, M. A. D. R., 2012, “Projeto Bambu: Introdução de espécies, manejo, caracterização e aplicações”, .
- PIMENTA, M. T. B., 2005, *Utilização de fluidos no estado sub/supercrítico na polpação de Eucalyptus grandis e Pinus taeda*. Tese de Doutorado, Instituto de Química de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- PIMIENTA, P., 1994, *Étude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois*. CSTB.
- RILEM, L., 1978, “Functional classification of lightweight concrete”, *Springer journal collection*, v. 11, n. 64, pp. 281–283.
- ROWELL, R. M., PETERSEN, R., HAN, J. S., ROWELL, J. S., TSHABALALA, M. A., 2005, “3 Cell Wall Chemistry”, *Handbook of wood chemistry and wood composites*, p. 35.
- SANTOS, F. A., QUEIRÓZ, J. D., COLODETTE, J. L., FERNANDES, S. A., GUIMARÃES, V. M., REZENDE, S. T., 2012, “Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol”, *Química Nova*, v. 35, n. 5, pp. 1004–1010.
- SARMIENTO, C., 1996, *Argamassa de Cimento Reforçada com Fibras de Bagaço de Cana de Açúcar e sua Utilização como Material de Construção*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

- SAVASTANO JUNIOR, H., 2000, *Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Construção Civil – Universidade de São Paulo.
- SILVA, F. D. A., 2009, *Durabilidade e propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados por fibras de sisal*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SOUZA, A. A. C., 2006, *Utilização de resíduos da indústria madeireira para fabricação de chapas cimento-madeira*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Federal do Pará, Belém.
- TOLEDO FILHO, R. D., 1997, *Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- TOLEDO FILHO, R. D., SCRIVENER, K., ENGLAND, G. L., GHAVAMI, K., 2000, “Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites”, *Cement and Concrete composites*, v. 22, n. 2, pp. 127–143.
- TOLEDO FILHO, R. D., GHAVAMI, K., SANJUÁN, M. A., ENGLAND, G. L., 2005, “Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres”, *Cement and Concrete Composites*, v. 27, n. 5, pp. 537–546.
- VILLEGAS, M., 2005, *Guadua: arquitectura y diseño*. Villegas Asociados.
- WOLFE, R., GJINOLLI, A., 2006, “Assessment of cement - bonded wood composites as means of using low-valued wood for engineered applications”, *International Wood Engineering Conference*, v. 3, pp. 74–81.
- WOLFE, R. W., GJINOLLI, A., 1999, “Durability and strength of cement-bonded wood particle composites made from construction waste”, *Forest Products Journal*, v. 49, n. 2, pp. 24.
- ZUCCO, L. L., 1999, *Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.