

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DO SERTÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RAIANA PORFIRIO DE LIMA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA
PINUS PARA CONSTRUÇÃO DE BLOCOS DE BIO-CONCRETO PARA
ALVENARIA DE VEDAÇÃO**

Delmiro Gouveia

2024

RAIANA PORFIRIO DE LIMA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA
PINUS PARA CONSTRUÇÃO DE BLOCOS DE BIO-CONCRETO PARA
ALVENARIA DE VEDAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Msc. Alexandre Nascimento de Lima.

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Felisberto de Lima.

Delmiro Gouveia

2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza CRB-4 2209

L732a Lima, Raiana Porfírio de

Análise de viabilidade da utilização de resíduos de *pinus* para construção de blocos de bio-concreto para alvenaria de vedação / Raiana Porfírio de Lima. – 2024.

109 f. : il.

Orientação: Alexandre Nascimento de Lima.

Coorientação: Marcelo Felisberto de Lima.

Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2024.

1. Construção civil. 2. Serragem de *pinus*. 3. Bio-agregado. 4. Bio-Bloco. 5. Bio-concreto de madeira. 6. Reaproveitamento. I. Lima, Alexandre Nascimento de. II. Lima, Marcelo Felisberto de. III. Título.

CDU: 624.157.8

Folha de Aprovação

RAIANA PORFIRIO DE LIMA

ANÁLISE DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA *PINUS* PARA CONSTRUÇÃO DE BLOCOS DE BIO-CONCRETO PARA ALVENARIA DE VEDAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à banca examinadora do curso de Engenharia
Civil da Universidade Federal de Alagoas e
aprovada em 24 de janeiro de 2024.

Documento assinado digitalmente
 ALEXANDRE NASCIMENTO DE LIMA
Data: 06/02/2024 13:00:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador

Prof. Msc. Alexandre Nascimento de Lima, Universidade Federal de Alagoas

Documento assinado digitalmente
 MARCELO FELISBERTO DE LIMA
Data: 03/02/2024 09:18:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientador

Prof. Dr. Marcelo Felisberto de Lima, Universidade Federal de Alagoas

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 JESSICA BEATRIZ DA SILVA
Data: 30/01/2024 12:57:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinadora Externa

Msc. Jéssica Beatriz da Silva



Examinador Interno

Prof. Dr. Odair Barbosa de Moraes, Universidade Federal de
Alagoas

Dedico este trabalho à Deus e a todas as
pessoas que Ele gentilmente colocou no meu
caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, e por todas as oportunidades que me trouxeram até aqui, que gradativamente vão me moldando na pessoa que Ele vislumbra. Nem sempre nos vemos capazes de lidar com algumas circunstâncias, nem entendemos seus propósitos, mas ao passar por elas nos tornamos mais fortes e cada vez mais próximos do que o Senhor vê em nós. A graduação tem sido uma das experiências mais transformadoras que já experimentei, não só como profissional, mas principalmente como indivíduo.

Agradeço a Universidade Federal de Alagoas e ao ensino público gratuito de forma geral pela oportunidade de cursar o ensino superior e me encontrar como profissional. Nesses anos tive a honra de aprender com professores excelentes, contando com espaços confortáveis, até então fora da minha realidade.

À minha família por todo apoio. Ao meu pai, Raimundo Lima, (*in memoriam*) por apesar de não ser bom com palavras, ter demonstrado com exemplos a importância do trabalho duro e de dedicar-se àquilo que se ama. A minha mãe, Edivânia Lima, por acreditar na educação como ferramenta transformadora e nunca medir esforços para que eu e meus irmãos pudessemos estudar. A minha irmã Vanessa Lima, por seu entusiasmo em me apoiar em mais essa fase de minha vida, pelos livros de cálculo e pelos esquadros e escalímetro antes mesmo de eu saber para que serviriam. Agradeço a minha amiga e irmã Mariana Batista, pelos anos de parceria, por todo apoio e confiança que sempre depositou em mim, por sempre acreditar em meus sonhos e torcer por eles.

Ao meu companheiro de caminhada e de vida, Marcos Lins, pela motivação e companheirismo desde o início da graduação, por ter tornado o processo mais leve, as dificuldades mais enfrentáveis e ter sido desde então um dos meus maiores exemplos de dedicação, excelência, entrega e esforço. Apesar dos quilômetros de distância durante o processo de desenvolvimento da presente pesquisa, sua ajuda foi crucial nas inúmeras leituras e sugestões e principalmente por sempre acreditar em mim. Muito obrigada.

Agradeço ao meu Orientador, Prof. Msc. Alexandre Nascimento de Lima, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Marcelo Felisberto de Lima, por todos os ensinamentos, direcionamentos, confiança, disponibilidade e oportunidade de desenvolver este trabalho.

A todo corpo técnico e estagiários do laboratório de materiais, em especial ao técnico Arnon, que dedicou horas assíduas moldando blocos comigo e as estagiárias Karol e Evely pelo apoio na execução dos processos desenvolvidos na pesquisa.

Ao professor e amigo Mrs. Rogério de Jesus por não me deixar devanear na pesquisa e torna-la exequível em menos de 10 anos.

RESUMO

A presente pesquisa avaliou a utilização de serragem de madeira *Pinus* como bio-agregado em bio-blocos de concreto, sem função estrutural, visando reduzir o consumo de areia. Foram comparados três métodos de tratamento para remover extrativos da biomassa e reduzir incompatibilidades com a matriz cimentícia. Os métodos incluíram imersão em solução de hidróxido de sódio (NaOH), ciclos de molhagem e secagem, e ciclos de imersão em água aquecida a 80° C. Cada método foi aplicado a dois percentuais de substituição da massa de areia por serragem, resultando em sete traços distintos, incluindo o traço referencial sem serragem. Os blocos foram produzidos mantendo constante o fator a/c (água-cimento) em 0,6, com proporções finais de 1:4:0,6 para o traço referencial, 1:3,92:0,08:0,6 e 1:3,98:0,02:0,6 para os traços com 2% e 0,5% de substituição, respectivamente. Os bio-blocos foram avaliados quanto à resistência à compressão, absorção de água e condutividade térmica, atendendo aos requisitos da norma NBR 6136 (ABNT, 2016). Os bio-blocos com 0,5% de substituição para os três tratamentos apresentaram conformidade em resistência, com destaque para os tratados com NaOH, que obtiveram resistência média superior ao traço referencial. Todos os traços atenderam aos limites normatizados para absorção de água, e os bio-blocos mostraram melhoria na capacidade de isolamento térmico com o aumento do percentual de substituição de areia pelo bio-agregado.

Palavras-chave: bio-bloco; *Pinus*; bio-agregado; reaproveitamento.

ABSTRACT

This research assessed the use of *Pinus* wood sawdust as a bio-aggregate in non-structural bio-concrete blocks with the aim of reducing sand consumption. Three treatment methods were compared to remove biomass extractives and mitigate incompatibilities with the cement matrix. The methods included immersion in a sodium hydroxide (NaOH) solution, wetting and drying cycles, and immersion in water heated to 80° C. Each method was applied to two substitution percentages of sand mass with sawdust, resulting in seven distinct mixes, including the reference mix without sawdust. The blocks were produced with a constant water-to-cement ratio (w/c) of 0.6, resulting in final proportions of 1:4:0.6 for the reference mix, 1:3.92:0.08:0.6 and 1:3.98:0.02:0.6 for the mixes with 2% and 0.5% substitution, respectively. The bio-blocks were evaluated for compressive strength, water absorption, and thermal conductivity, meeting the requirements of the NBR 6136 standard (ABNT, 2016). The bio-blocks with 0.5% substitution for all three treatments showed compliance in strength, with the NaOH-treated bio-blocks exhibiting an average strength superior to the reference mix. All mixes met the standardized limits for water absorption, and the bio-blocks demonstrated improved thermal insulation capability with increasing substitution percentage of sand with the bio-aggregate.

Keywords: bio-block; *Pinus*; bio-aggregate; reuse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Bloco vazado de concreto simples	17
Figura 2	Paredes celulares das plantas	22
Figura 3	Cadeias moleculares de celulose	26
Figura 4	Representação esquemática da formação e hidratação do cimento Portland	30
Figura 5	Imagens geradas após três dias de hidratação da pasta de cimento. a) Partícula de cânhamo com os pontos de amostragem para análise FT-IR indicadas pelas setas 1 e 2 e b) A pelota de linho	32
Figura 6	Seção transversal das fibras mostrando detalhes das fibro-células. a) e b) <i>in natura</i> e c) e d) Pós-tratamento de molhagem e secagem	36
Figura 7	Plantação de cânhamo	40
Figura 8	ECObloco®	40
Figura 9	Painéis aplicados a áreas internas	41
Figura 10	Painéis aplicados a áreas externas	42
Figura 11	Cartela de cores dos painéis Viroc com acabamentos bruto e lixado. a) Preto, b) Vermelho, c) Ocre, d) Amarelo, e) Cinza e f) Branco	42
Figura 12	Fluxograma dos procedimentos experimentais do bio-agregado	44
Figura 13	Resíduo bruto sem nenhum tipo de processamento	45
Figura 14	Processo de peneiramento e separação do material que seria utilizado	46
Figura 15	Disposição do material em uma pilha alongada. a) Espalhamento do material na pilha, b) Processo de espalhamento finalizado, c) Separação das extremidades para espalhamento na crista da pilha e d) Finalização do processo de homogeneização por pilha alongada	47
Figura 16	Redução do material homogeneizado para armazenamento	48
Figura 17	Procedimentos laboratoriais para definição da massa específica do cimento. a) Pesagem do cimento, b) Adição de querosene aos frascos de <i>Le Chantelier</i> , c) Adição das amostras de cimento aos frascos de <i>Le Chantelier</i> com querosene até a marca entre 0 e 1 ml e d) Frascos com querosene e as amostras de cimento	49
Figura 18	Ensaio de granulometria da areia. a) Pesagem da amostra A, b) Pesagem da amostra B e c) Jogo de peneiras empregado no ensaio	51
Figura 19	Procedimentos laboratoriais para definição da massa unitária da areia. a) Materiais utilizados, b) Enchimento do recipiente e c) Nivelamento do recipiente	52

Figura 20	Verificação do estado de saturação superfície seca do material. a) Amostra de areia ainda com água superficial e b) Partículas saturadas superfície seca	53
Figura 21	Ensaio de massa específica e massa específica aparente. a) Pesagem das amostras saturada superfície seca, b) Pesagem do conjunto frasco e areia, c) Banho maria do conjunto frasco, areia e água, d) Pesagem do conjunto frasco, areia e água, e) Secagem em estufa das amostras de areia e f) Pesagem do conjunto areia e cápsula	54
Figura 22	Granulometria da serragem. a) Amostra A, b) Amostra B e c) Jogo de peneiras utilizado no ensaio de granulometria dos resíduos de <i>Pinus</i> após homogeneização	56
Figura 23	a) Saturação do bio-agregado e b) Secagem ao ar	57
Figura 24	Ensaio de massa específica e massa específica aparente. a) Pesagem de 3 amostras saturadas superfície seca, b) Pesagem dos frascos com as amostras de serragem, c) Imersão dos frascos com serragem e água até a marca de 500 ml, d) Pesagem dos frascos com serragem e água e e) Pesagem das amostras após serem secas em estufa	58
Figura 25	Ensaio de massa unitária. a) e b) Preenchimento do becker com o material e c) Pesagem	59
Figura 26	Tratamento do bio-agregado por imersão em água a 80°C durante 1 hora. a) Imersão do bio-agregado em água a 80°C e b) Secagem do bio-agregado ao ar após ser submetido a 3 ciclos de imersão	61
Figura 27	Amostras da água na qual o bio-agregado foi imerso durante 1 hora. a) Água de imersão no primeiro ciclo, b) Água de imersão no segundo ciclo e c) Água de imersão no terceiro ciclo	61
Figura 28	Tratamento do bio-agregado por ciclos de molhagem e secagem. a) Imersão do bio-agregado em água em temperatura ambiente por 3 horas, b) Secagem do bio-agregado ao ar	62
Figura 29	Amostras da água na qual o bio-agregado foi imerso durante 3 horas. a) Água de imersão no primeiro ciclo de molhagem e secagem, b) Água de imersão no segundo ciclo de molhagem e secagem e c) Água de imersão no terceiro ciclo de molhagem e secagem	63
Figura 30	Tratamento do bio-agregado por imersão em solução de água e soda caustica. a) Diluição, b) Serragem imersa em solução, c) Secagem do material ao ar e d) solução pós imersão	64

Figura 31	Estudo do traço do bio-bloco com substituição de 2% de areia por serragem. a) Separação dos materiais, b) Mistura da areia com cimento e c) Adição da serragem saturada, d) Adição de água, e) Homogeneização dos componentes, f) Verificação tátil da consistência da mistura, g) Preenchimento da forma com compactação manual em camadas e h) desforma do bio- bloco	66
Figura 32	Separação dos materiais para produção dos bio-blocos com substituição de 2% da massa de areia por serragem tratada com ciclos de cozimento em água a 80°C	69
Figura 33	Mistura da areia, cimento e serragem no preparo do traço 6. a) Mistura do cimento e areia até homogeneização e b) Adição da serragem	69
Figura 34	Preparo da serragem para utilização no bio-bloco. a) Remoção do excesso de água da serragem após saturação de 24 horas e b) Secagem do excesso de água	70
Figura 35	Moldagem dos blocos. a) Preenchimento da forma, b) Nivelamento e c) Desforma	70
Figura 36	Blocos produzidos	71
Figura 37	Capeamento dos blocos. a) Mistura da pasta de cimento, b) Espalhamento da pasta na bancada e c) Posicionamento e nivelamento do bloco sobre a pasta	72
Figura 38	Bloco capeado	73
Figura 39	Ensaio de compressão axial. a) Posicionamento do bloco na prensa e b) Bloco rompido	73
Figura 40	Secagem dos blocos para determinação da absorção de água. a) Secagem e b) Pesagem das amostras	75
Figura 41	Ensaio de absorção de água. a) Saturação, b) Remoção do excesso de água e c) Pesagem das amostras	76
Figura 42	Aferição da temperatura das paredes com câmera térmica	77

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Composição química média das madeiras macias (coníferas).....	23
Gráfico 1	Composição química média das madeiras duras (folhosas).....	23
Gráfico 3	Curva granulométrica acumulada da areia.....	79
Gráfico 4	Curva granulométrica acumulada da serragem de <i>Pinus</i>	81
Gráfico 5	Aplicação do critério Z-score nos blocos do traço 0.....	85
Gráfico 6	Aplicação dos limites do intervalo de confiança nos blocos do traço 0.....	86
Gráfico 7	Absorção de água das amostras.....	89
Gráfico 8	Variação da temperatura nas faces dos prismas.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração ..	18
Tabela 2	Dimensões nominais	19
Tabela 3	Designação por classe, largura e espessura mínima das paredes dos blocos ...	20
Tabela 4	Composição química dos bio-agregados, em %, conforme literatura.....	24
Tabela 5	Caracterização química da madeira de <i>Pinus elliottii</i>	24
Tabela 6	Caracterização física da madeira de <i>Pinus elliottii</i>	24
Tabela 7	Composição química da madeira de <i>Pinus oocarpa</i>	25
Tabela 8	Principais compostos do cimento Portland.....	30
Tabela 9	Insumos para produção de 1 bloco.....	68
Tabela 10	Produção de blocos.....	68
Tabela 11	Composição granulométrica da areia.....	79
Tabela 12	Massa específica e massa específica aparente da areia.....	80
Tabela 13	Absorção de água da areia.....	80
Tabela 14	Composição granulométrica da serragem.....	81
Tabela 15	Massa unitária da serragem.....	82
Tabela 16	Massa específica e massa específica aparente da serragem.....	82
Tabela 17	Absorção de água do bio-agregado.....	82
Tabela 18	Resistência individual dos blocos.....	84
Tabela 19	Resistência média dos blocos.....	87
Tabela 20	Absorção de água.....	89
Tabela 21	Temperaturas dos prismas durante ensaio.....	90
Tabela 22	Variação de temperatura nos prismas de traço 0, 1, 3 e 5.....	91
Tabela 23	Variação de temperatura nos prismas de traço 2, 4 e 6.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFAL	Universidade Federal de Alagoas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$f_{bk,est}$	Resistência Característica Estimada
f_b	Resistência individual a Compressão
mm	Milímetros
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
NFC	Nanofibra de Celulose
SVVIE	Sistemas de Vedações Verticais e Externas
FT - IR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
BCM	Bio-concreto de Madeira
EAF	Escória de Alto Forno
CV	Cinza Volante
RC	Resistência a Compressão
RT	Resistência a Tração
THC	Tetra-hidrocanabiodiol
Pnuma	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
NBR	Norma Técnica Brasileira
NM	Norma Mercosul
UV	Radiação Ultravioleta
PH	Potencial Hidrogeniônico
ONU	Organização das Nações Unidas
LDA	Sociedades por Quotas
CP	Cimento Portland
ABS	Absorção
TS	Temperatura na Face que Recebe Calor
TO	Temperatura na Face Oposta a aplicação de Calor
<i>et al</i>	E Outros
<i>apud</i>	Citação indireta
μm	Micrômetro
mm	Milímetros
cm	Centímetros

L	Litros
ml	Mililitros
g	grama
Kg	Quilograma
MPa	Megapascal
GtCO ₂	Gigatoneladas de Dióxido de Carbono
g/cm ³	Gramas Por Metro Cúbico
m/s ²	Metros Por Segundo ao Quadrado
a/c	Fator água Cimento
m _A	Massa Seca
m _B	Massa Saturada Superfície Seca
D _{máx}	Dimensão Máxima
D _{Mín}	Dimensão Mínima

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
®	Marca Registrada
β	<i>Beta</i>
°C	Graus Celsius
$\pm$	Para mais ou para menos
<i>z</i>	Pontuação Z-Score
Ψ	Coefficiente de Ponderação
μ	Valor Médio
σ	Desvio Padrão
<i>n</i>	Número de Dados da Amostra
$\times$	Resistência Individual a Compressão
ΔT	Variação de Temperatura
CO ₂	Dióxido de Carbono
H ₂ O	Água
H ₂ CO	Metanal
O ₂	Oxigênio
Ca ²⁺	Íons de Cálcio
Ca	Cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
NaOH	Hidróxido de sódio
H ₂ CO ₃	Ácido Carbônico
CaCl ₂ .2H ₂ O	Cloreto de Cálcio Bi Hidratado
CaCl ₂	Cloreto de Cálcio
CaO	Óxido de Cálcio
C	Óxido de Cálcio
SiO ₂	Dióxido de Silício
S	Dióxido de Silício
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
A	Óxido de Alumínio
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro
F	Óxido de Ferro

C_3S	Silicato Tricálcico
C_2S	Silicato Dicálcico
C_3A	Aluminato Tricálcico
C_4AF	Ferroaluminato Tetracálcico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo geral.....	15
1.2	Objetivos específicos.....	15
1.3	Justificativa	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Blocos de concreto de vedação.....	17
2.2	Características da madeira <i>Pinus</i> e extrativos a serem eliminados	21
2.2.1	Celulose	25
2.2.2	Hemicelulose	26
2.2.3	Lignina.....	27
2.2.4	Extrativos.....	27
2.2.5	Cinzas	28
2.2.6	Água	28
2.3	Composição do cimento.....	29
2.4	Trabalhos base e seus resultados	31
2.4.1	Compatibilidade química entre bio-agregados e cimento	31
2.4.2	Processos adotados para redução de incompatibilidade químicas entre biomassas e matrizes cimentícias.....	33
2.4.3	Uso de aditivos	36
2.4.4	Vantagens do bio-concreto de madeira (BCM)	37
2.4.5	Desvantagens do BCM	38
2.5	Painéis e blocos existentes no mercado	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS UTILIZADOS.....	44
3.1	Materiais utilizados	45
3.1.1	Bio-agregado	45
3.1.2	Cimento Portland.....	48
3.1.2.1	Massa específica do cimento Portland CP V ARI	48

3.1.3	Água	49
3.1.4	Aditivos.....	49
3.1.5	Areia	50
3.1.5.1	Granulometria da areia	50
3.1.5.2	Massa unitária.....	51
3.1.5.3	Massa específica e massa específica aparente	52
3.1.5.4	Absorção de água da areia	55
3.2	Caracterização da serragem de madeira <i>Pinus in natura</i>.....	56
3.2.1	Granulometria do bio-agregado.....	56
3.2.2	Massa específica e massa específica aparente do bio-agregado.....	57
3.2.3	Massa unitária do bio-agregado no estado solto.....	59
3.3	Programa experimental	60
3.3.1	Aplicação de tratamentos ao bio-agregado de <i>Pinus</i>	60
3.3.1.1	Tratamento por imersão em água a 80° C durante 1 hora.....	60
3.3.1.2	Tratamento por ciclos de molhagem e secagem	62
3.3.1.3	Tratamento por imersão em solução de água e hidróxido de sódio (NaOH).....	63
3.3.2	Dosagem do bio-concreto	64
3.3.3	Produção dos bio-blocos.....	68
3.3.4	Avaliação físico-mecânica dos bio-blocos.....	71
3.3.4.1	Ensaio de resistência à compressão	72
3.3.4.2	Ensaio de absorção de água	75
3.3.4.3	Condutividade térmica.....	76
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
4.1	Caracterização dos insumos	78
4.1.1	Cimento	78
4.1.2	Areia	78
4.1.2.1	Granulometria.....	78

4.1.2.2	Massa unitária.....	79
4.1.2.3	Massa específica e massa específica aparente.....	80
4.1.2.4	Absorção de água.....	80
4.1.3	Serragem.....	80
4.1.3.1	Granulometria.....	80
4.1.3.2	Massa unitária.....	81
4.1.3.3	Massa específica e massa específica aparente.....	82
4.1.3.4	Absorção de água.....	82
4.2	Resistência a compressão axial.....	83
4.3	Absorção de água.....	88
4.4	Condutividade Térmica	90
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	93
5.1	Sugestão para trabalhos futuros	95
6	REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

A substituição parcial ou total de agregados na produção de blocos de concreto por resíduos como, por exemplo, os gerados pela própria construção civil, tem ganhado notoriedade, dada a maior preocupação com os impactos ambientais gerados pelo setor e a disponibilidade dos recursos naturais. Entretanto, ainda é difícil encontrar disponível no mercado produtos alternativos com adição de resíduos, como bio-blocos, que venham reduzir a demanda de blocos de concreto convencionais.

Como sintetizado por Lins (2023), a construção está estritamente interligada as atividades humanas, que desde os primórdios modificam o meio em prol de sua preservação e qualidade de vida dos indivíduos, sendo um setor de grande importância para a economia e sinalizador do desenvolvimento de uma nação. Entretanto, é também uma atividade de grandes impactos ambientais, como a exploração de recursos naturais, consumo de energias, mudança no meio e geração de resíduos. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014), em 2010, o setor da construção civil foi responsável pela utilização final de 32% da energia gerada e pela emissão direta e indireta de 8,8 Gt de CO₂.

A exploração descontrolada e a dependência de recursos naturais, que levam milhares de anos para se formar, como é o caso da areia, contradizem a continuidade das práticas construtivas como as conhecemos. Segundo informações do The New York Times (2014), a areia é, depois da água e do ar, o recurso natural mais demandado em todo o mundo, sendo que 80% dessa matéria-prima é consumida na produção de concreto. O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2022) destaca que, anualmente, são utilizadas impressionantes 50 bilhões de toneladas de areia e cascalho no mundo e enfatiza que a areia deve ser reconhecida como um recurso estratégico, uma vez que, além de ser um material essencial no setor da construção, desempenha múltiplas funções no meio ambiente. A exploração excessiva desse recurso pode acarretar uma série de problemas, tais como erosão, salinização de aquíferos, impactos na biodiversidade, entre outros danos ambientais.

A substituição parcial da areia na composição de blocos de concreto por serragem de madeira *Pinus* permitiria não só a redução da utilização da areia, como também incorporaria um resíduo subproduto do setor moveleiro. Associando a isso a redução do uso de uma matéria prima essencial, a incorporação de um resíduo que, ao invés de ser descartado, receberia uma destinação adequada.

O texto do presente trabalho nos capítulos subsequentes foi dividido e organizado para apresentar ao leitor a serragem de madeira *Pinus* como um bio-agregado, as problemáticas de trabalhar com um material orgânico associado a um elemento construtivo que exige durabilidade, respeitando a vida útil que uma edificação deve garantir, sendo crucial, para isso, o emprego de tratamentos da serragem a fim de remover parte de seus extrativos e melhorar sua compatibilidade com a matriz cimentícia. Ao final, com o compósito visionado, não só se almejava um bio-bloco que reduza o consumo de areia pela incorporação de um resíduo, mas um produto com características intrínsecas que validam sua aplicação, como leveza e melhor isolamento térmico, atendendo os requisitos normativos para o elemento construtivo em questão.

1.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade técnica da incorporação de resíduos de madeira *Pinus* como bio-agregado na produção de blocos de concreto de vedação, estudando e identificando as características decorrentes.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Identificar a melhor maneira de tratar a serragem de *Pinus* para remoção dos extratos do material, conciliando necessidade e viabilidade, ecologia e economia, imaginando uma adoção em escala industrial;
- Definir o melhor traço para produção dos bio-blocos;
- Produzir blocos de bio-concreto que atendam os requisitos normativos para o devido fim (vedação);
- Analisar e identificar as características adquiridas pelo bloco com a adição da serragem.

1.3 Justificativa

Dada a dependência de recursos naturais e sua exploração predatória no cenário atual da construção civil, a continuidade de tal *modus operandi* é inviabilizado por tratar-se de bens findáveis, instigando a idealização de métodos construtivos mais sustentáveis no sentido

mais amplo da palavra, não só por uma questão de responsabilidade ambiental, mas pela própria continuidade do ato de construir.

A presente pesquisa está estruturada em muitas problemáticas atuais no que tange o uso de recursos naturais de forma geral, o gasto energético e o reaproveitamento de resíduos sólidos produzidos pela própria construção civil. A construção de blocos de concreto de vedação, sendo bloco um dos elementos mais utilizados pela construção civil, envolve a exploração de muitos recursos, como água, cimento e areia. A redução do consumo de cimento e de areia pela substituição parcial da areia por um resíduo sólido, no presente caso a serragem de madeira *Pinus*, nos conduz à um consumo mais consciente dos recursos naturais e, o mais importante, desenvolve-se uma nova forma de fabricar, que incorpora os resíduos gerados pelas atividades humanas, entendendo que somos responsáveis pelo meio que ocupamos e que se as formas de construir atuais não são sustentáveis, devem ser repensadas para passarem a ser.

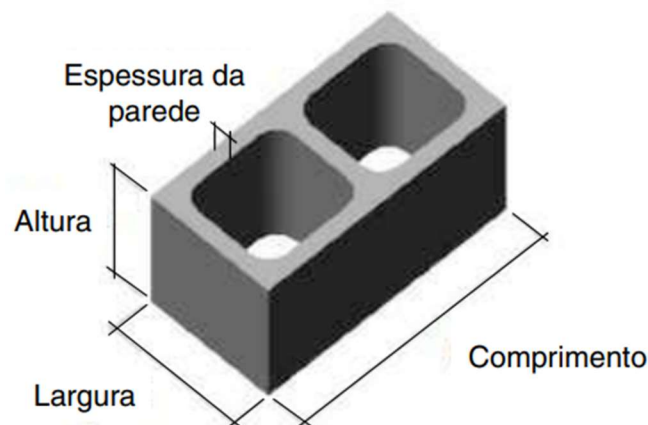
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Blocos de concreto de vedação

Para analisar a viabilidade de incorporação de resíduos de madeira *Pinus* na produção de bio-blocos de vedação de concreto, nos quais a serragem de *Pinus* substituiria o agregado, é imprescindível identificar quais os requisitos que um bloco de vedação deve atender e as características que o definem.

A NBR 6136 (ABNT, 2016) define bloco vazado de concreto simples como "[...] componente para execução de alvenaria, com ou sem função estrutural, vazado nas faces superior e inferior, cuja área líquida é igual ou inferior a 75% da área bruta" (ABNT NBR 6136, 2016, p.1), como ilustrado na Figura 1. A norma em questão define os componentes básicos que compõem os blocos prescritos como cimento Portland, agregados e água, onde os agregados englobam agregados graúdos e miúdos, escória de alto forno, argila expandida, cinzas volantes, entre outros agregados, leves ou não, e que atendam a limitação dimensional onde as partículas devem ser menores que a metade da menor espessura das paredes do bloco.

Figura 1 – Bloco vazado de concreto simples.



Fonte: ABNT NBR 6136 (2016).

O uso de aditivos, segundo as normas NBR 6136 (ABNT, 2016) e NBR 11768 (ABNT, 2011), é permitido desde que não contenham substâncias que possam provocar a deterioração do concreto ou outro componente da mistura, e que as adições não interfiram nas características físico-mecânicas do produto. Esta é a principal problemática da pesquisa em questão, onde, como agregado tem-se uma biomassa que, por si só, possui substâncias que interferem na hidratação do cimento, necessitando, portanto, de um tratamento prévio eficaz na

eliminação ou redução de tais substâncias prejudiciais às reações do processo e gerando a necessidade da adição de aditivos que possam vir a melhorar o produto.

A NBR 6136 (ABNT, 2016) define como requisitos físico-mecânicos os limites de resistência, absorção e retração linear por secagem, de acordo com os limites apresentados na Tabela 1. Define também as dimensões dos blocos (Tabela 2) e as espessuras de suas paredes (Tabela 3). Os ensaios para a análise físico-mecânica do bloco são prescritos pela NBR 12118 (ABNT, 2013), que define os procedimentos para verificação da resistência a compressão, a análise dimensional do bloco, sua absorção, área líquida (área média referente a seção perpendicular ao eixo dos furos do bloco desconsiderando a área referente aos furos do bloco) e retração linear por secagem.

Tabela 1 – Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração.

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial ^a MPa	Absorção %				Retração ^d %
			Agregado normal ^b		Agregado leve ^c		
			Individual	Média	Individual	Média	
Com função estrutural	A	$f_{bk} \geq 8,0$	$\leq 9,0$	$\leq 8,0$	$\leq 16,0$	$\leq 13,0$	$\leq 0,065$
	B	$4,0 \leq f_{bk} < 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 9,0$			
Com ou sem função estrutural	C	$f_{bk} \geq 3,0$	$\leq 11,0$	$\leq 10,0$			

^a Resistência característica à compressão axial obtida aos 28 dias.

^b Blocos fabricados com agregado normal (ver definição na ABNT NBR 9935).

^c Blocos fabricados com agregado leve (ver definição na ABNT NBR 9935).

^d Ensaio facultativo.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6136 (2016).

Tabela 2 – Dimensões nominais.

Família		20x 40	15x40	15x30	12,5x 40	12,5x 25	12,5x 37,5	10x40	10x30	7,5x 40	
Medida Nominal mm	Largura	190	140		115			90		65	
	Altura	190	190	190	190	190	190	190	190	190	
	Comprimento	Inteiro	390	390	290	390	240	365	390	290	390
		Meio	190	190	140	190	115	-	190	140	190
		2/3	-	-	-	-	-	240	-	190	-
		1/3	-	-	-	-	-	115	-	90	-
		Amarração “L”	-	340	-	-	-	-	-	-	-
		Amarração “T”	-	540	440	-	365	-	-	290	-
		Compensador A	90	90	-	90	-	-	90	-	90
		Compensador B	40	40	-	40	-	-	40	-	40
		Canaleta inteira	390	390	290	390	240	365	390	290	-
	Meia canaleta	190	190	140	190	115	-	190	140	-	

NOTA 1 As tolerâncias permitidas nas dimensões dos blocos indicados nesta Tabela são de $\pm 2,0$ mm para a largura e $\pm 3,0$ mm para o comprimento.

NOTA 2 Os componentes das famílias de blocos de concreto têm sua modulação determinada de acordo com a ABNT NBR 15873.

NOTA 3 As dimensões da canaleta *J* devem ser definidas mediante acordo entre fornecedor e comprador, em função do projeto.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6136 (2016).

Tabela 3 – Designação por classe, largura e espessura mínima das paredes dos blocos.

Classe	Largura nominal mm	Paredes longitudinais ^a mm	Paredes transversais	
			Paredes ^a mm	Espessura equivalente ^b mm/m
A	190	32	25	188
	140	25	25	188
B	190	32	25	188
	140	25	25	188
C	190	18	18	135
	140	18	18	135
	115	18	18	135
	90	18	18	135
	65	15	15	113

^a Média das medidas das paredes tomadas no ponto mais estreito.

^b Soma das espessuras de todas as paredes transversais aos blocos (em milímetros) dividida pelo comprimento nominal do bloco (em metros).

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6136 (2016).

Sendo agregado leve, de acordo com a NBR 9935 (ABNT, 2011), agregados de baixa densidade como a escória siderúrgica, vermiculita, expandidos de argila, resíduos de esgoto sintetizado etc., e agregados de densidade normal sendo agregados com densidades entre 2000 kg/m³ e 3000 kg/m³.

A NBR 15575-4 (ABNT, 2013) aborda ainda questões acerca do desempenho das edificações habitacionais que os sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE) devem atender. Embora seja uma análise que considere a edificação como um todo, pós finalização, as propriedades dos blocos da alvenaria de vedação podem vir a contribuir de alguma forma com o resultado. A norma em questão estabelece critérios para o desempenho acústico, térmico, lumínico e de segurança ao fogo, exigindo a avaliação do bio-bloco de vedação (blocos com biomassa para alvenarias de vedação de concreto sem função estrutural) para identificar se seu emprego e gerar benefícios nesses e em outros campos, como impacto ambiental, economia de matéria prima não renovável, entre outros.

As análises necessárias incluem condutividade térmica e acústica, proliferação de fogo, permeabilidade e resistência mecânica, buscando criar um produto que, quando utilizado na construção, atenda às demandas prescritas e se comporte adequadamente em relação a

estanqueidade à água, suporte de esforços de uso, isolamento térmico e acústico, fixação e suporte de peças suspensas, bem como à contenção e prevenção da propagação de incêndios.

Diante disso, para se chegar ao produto final desejado, um compósito durável a ser empregado na construção civil, é importante entender o bio-agregado em questão e as interações e reações químicas envolvidas, para termos propriedade para definir quais os métodos de tratamento mais eficazes para o tratamento da serragem de madeira *Pinus*, sendo crucial conhecer sua composição físico/química e como cada componente interage com a matriz cimentícia da mistura, identificando reações negativas ou positivas que devem ser evitadas ou intensificadas respectivamente.

2.2 Características da madeira *Pinus* e extrativos a serem eliminados

Segundo Embrapa (2020), o gênero *Pinus* inclui mais de 100 espécies com alto valor de exploração devido as suas inúmeras qualidades, tais como a coloração mais clara da madeira, possuir fibras longas que lhe confere grande resistência, viabilidade de extração de resina, que possui um alto valor comercial para produção de diversos produtos, aplicabilidade em paisagismo e tolerância ao plantio em solos marginais. Dentre as inúmeras espécies existentes do gênero, as que melhor se destacaram pela facilidade de cultivo e trato no Sul e Sudeste do Brasil foram as *Pinus elliotii* e a *Pinus taeda* (BALLONI, 2009), sendo a *Pinus elliotii* amplamente explorada no Brasil para extração de resina e processamento mecânico. A madeira *Pinus* está incluída em uma categoria conhecida como madeiras macias. Segundo Pfeil e Pfeil (2003), as madeiras empregadas na construção civil podem ser divididas em duas categorias:

Madeiras duras – provenientes de árvores frondosas (dicotiledôneas, da classe Angiosperma, com folhas achatadas e largas), de crescimento lento, como peroba, ipê, aroeira, carvalho etc.; as madeiras duras de melhor qualidade são também chamadas madeiras de lei. Madeiras macias – provenientes em geral das árvores coníferas (da classe Gimnosperma, com folhas em forma de agulhas ou escamas, e sementes agrupadas em forma de cones), de crescimento rápido, como pinheiro-do-paraná e pinheiro-bravo, ou pinheirinho, pinheiros europeus, norte-americanos etc. (PFEIL; PFEIL, 2003, p. 1).

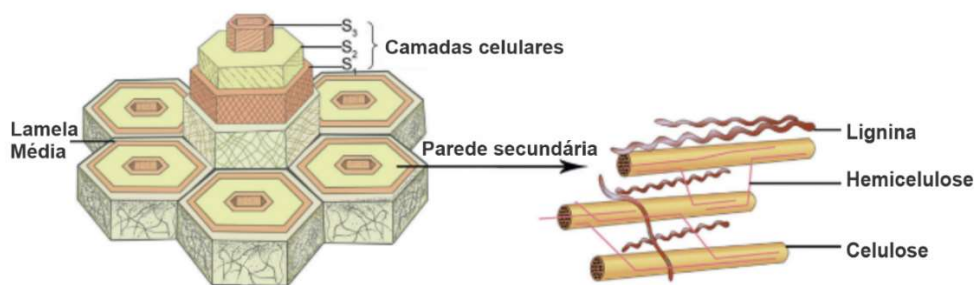
Na presente pesquisa será utilizado resíduos de *Pinus* proveniente de trabalhos de marcenaria. A matéria orgânica de origem vegetal tem por composição carbono, hidrogênio e oxigênio, combinando a água retirada do solo (H₂O) com o gás carbônico (CO₂) que, com a

ação dos raios solares, forma o Metanal (H_2CO) e devolve oxigênio (O_2) para o ambiente, sendo o H_2CO um elemento base na formação de açúcares (GONZAGA, 2006).

O resíduo de madeira ou biomassa é constituída por um complexo químico que pode ser subdividido em dois grupos, um majoritariamente referente as propriedades físicas da biomassa (de elevada massa molecular) composto por celulose, hemicelulose e lignina e uma parcela de baixa massa molecular formada por substâncias inorgânicas e extrativos, gorduras, ceras, pectinas e outras substâncias solúveis em água (LOAN; NAVARD, 2016). Esta composição polimérica não segue uma distribuição uniforme, variando em função da espécie, tipo de tecido, solo, período de colheita da amostra e na própria planta, a depender da parte da planta, caule e folhas, por exemplo, o que influi diretamente na sua estrutura (SAKA, 2000).

Para Loan e Navard (2016), antes de entender e viabilizar a interação entre cimento e fibra de madeira, é importante compreender o que são as fibras, e como os componentes químicos que a compõem interagem. Ainda segundo Loan e Navard (2016), pode-se definir as plantas como um aglomerado de milhões de células, divididas por paredes celulares, compostas por celulose, hemicelulose e outros compostos, sendo a celulose o componente polimérico de maior força e resistência estrutural da planta. As células, por sua vez, são unidas umas às outras por lignina (ver Figura 2).

Figura 2 – Paredes celulares das plantas.

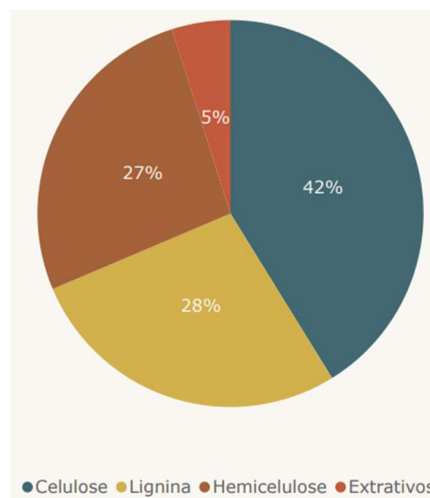


Fonte: Adaptado de Zhao et al. (2019).

A Figura 5 permite a visualização da estrutura e interação entre células das plantas, onde as células são separadas pela lamela média, uma membrana que contem pectina, responsável por manter as células unidas entre si; logo após ela, tem-se a parede primária (S1), composta basicamente por celulose, hemicelulose e pectinas, e logo após a parede primária, tem-se a parede secundária (S2), composta por celulose, hemicelulose e lignina, ligadas por ligações de hidrogênio, e mais ao centro da célula há o lúmen central (S3), responsável por

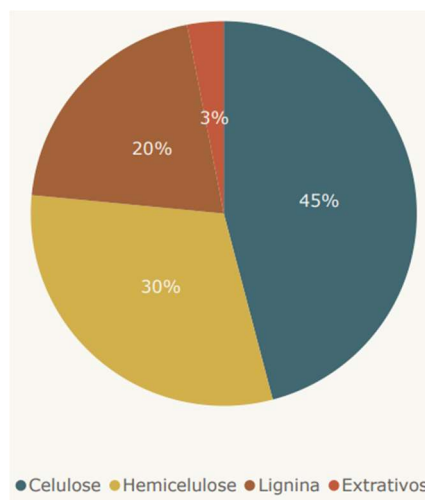
inúmeras funções, entre elas suporte estrutural para a planta e armazenamento de substâncias (ZHAO *et al.*, 2019). O percentual médio de cada componente das madeiras, independente de um tipo específico de madeira, apresenta uma variação quantitativa entre seus componentes químicos; todavia, segue-se uma hierarquia de composição, na qual a celulose é o componente predominante, como é constatável comparando os Gráficos 1 e 2, referentes a madeiras macias e duras respectivamente (BALLONI, 2009).

Gráfico 1 – Composição química média das madeiras macias (coníferas).



Fonte: Adaptado de Balloni (2009).

Gráfico 2 – Composição química média das madeiras duras (folhosas).



Fonte: Adaptado de Balloni (2009).

Esse padrão proporcional é comum em materiais de origem vegetal, como pode ser constatado na Tabela 4, sintetizada por Andreola (2021).

Tabela 4 – Composição química dos bio-agregados, em %, conforme literatura.

Referência	Bio-agregado	Celulose	Lignina	Hemicelulose	Extrativo
LI <i>et al.</i> (2016)	Bambu	37 - 39	26 - 28	19 - 20	5,0 - 5,5
RICHTER <i>et al.</i> (2019)	Madeira	44 - 47	22 - 29	21 - 25	2,9 - 4,2
CHABANNES (2015)	Casca de Arroz	25 - 35	26 - 31	18 - 21	2,0 - 5,0

Fonte: ANDREOLA (2021).

Em se tratando da madeira *Pinus*, mais especificamente a *Pinus elliottii*, Balloni (2009) realizou um trabalho de caracterização química (Tabela 5) e caracterização física (Tabela 6) do material.

Tabela 5 – Caracterização química da madeira de *Pinus elliottii*.

Caracterização Química		
	Média	Valores da Literatura
Teor de seco (%)	89,60	-
Holocelulose (%)	68,80	68,00
Lignina insolúvel (%)	28,00	25,00 – 30,00
Lignina Solúvel (%)	0,22	-
Teor de extrativos (%)	3,00	2,00 – 10,00
Teor de cinzas (%)	0,41	0,10 – 1,00
Poder calorífico superior (Kcal/Kg)	4.323,00	4.460,00

Fonte: Balloni (2009).

Tabela 6 – Caracterização física da madeira de *Pinus elliottii*.

Caracterização Física		
	Média	Valores da Literatura
Densidade básica (g/cm³)	0,47	0,48
Contração volumétrica (%)	9,82	10,50
Inchamento volumétrico (%)	10,89	-
Contração tangencial (%)	5,78	6,30
Contração radial (%)	4,35	3,40
Coefficiente de anisotropia	1,33	1,85

Fonte: Balloni (2009).

Um trabalho similar de caracterização foi desenvolvido por Moraes *et al* (2005), onde foi estudada a constituição da madeira *Pinus oocarpa*, obtendo-se os resultados sintetizados na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição química da madeira de *Pinus oocarpa*.

Holocelulose (%)	80,27
Lignina insolúvel (%)	25,18
Lignina Solúvel (%)	0
Teor de extrativos (utilizando como solvente Etanol: tolueno (1:2, v/v)) (%)	4,38
Teor de cinzas (%)	1,26

Fonte: Adaptado de Morais *et al* (2005).

Comparando-se os dois trabalhos é possível observar que há uma variação nos teores percentuais dos componentes químicos da madeira *Pinus*, a depender da espécie analisada, entre outros fatores, como a idade da madeira, por exemplo. Os resultados mantiveram uma certa hierarquia proporcional, onde o componente de maior predominância são a celulose e a hemicelulose (Holocelulose).

No presente trabalho, onde busca-se analisar e viabilizar o uso dos resíduos de *Pinus* como bio-agregado na confecção de bio-blocos de vedação de concreto sem função estrutural, é imprescindível entender qual a composição físico-química da madeira e quais as consequências provenientes da interação entre a pasta do cimento com cada componente da biomassa, a fim de identificar quais devem ser eliminados e como o proceder.

2.2.1 Celulose

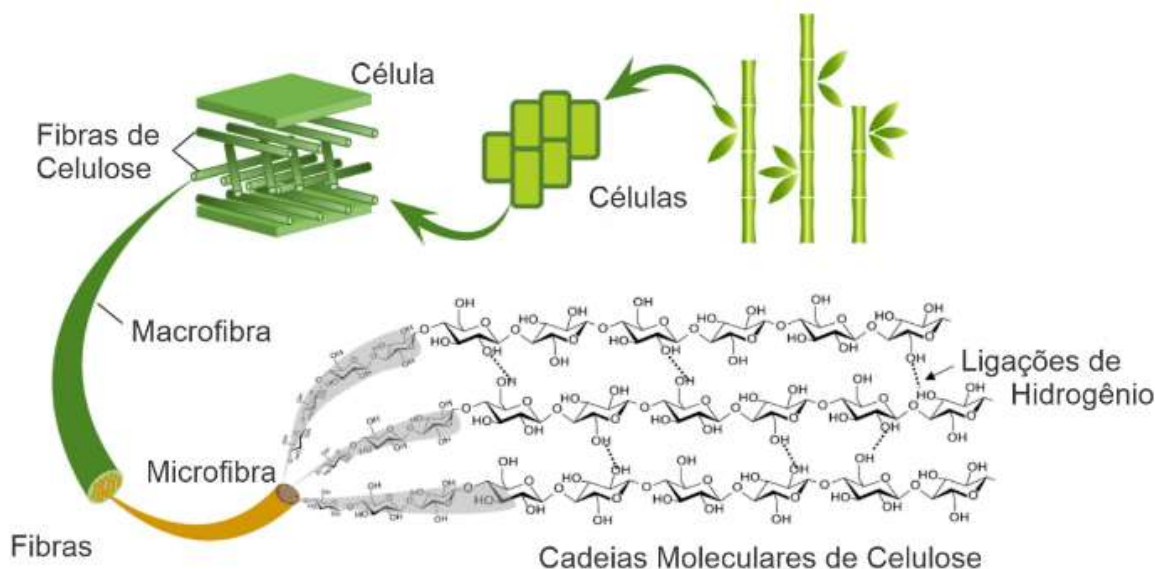
Segundo Balloni (2009), além de a celulose ser a substância majoritária das madeiras em geral, é também a mais importante no que tange a massa e características da madeira, sendo o componente da biomassa responsável pela resistência estrutural das plantas (KLEMM *et al.*, 1998). A celulose é um polissacarídeo linear composto por unidades de glicose unidas por ligações do tipo β (1-4) glicosídicas, que formam longas cadeias com elevado grau de polimerização. É o principal componente da parede celular das plantas, sendo sintetizada pela enzima celulose sintase.

A celulose possui uma estrutura cristalina complexa, composta por microfibrilas que se organizam em fibrilas maiores, formando um arranjo paralelo e helicoidal. É considerada um importante recurso renovável para a produção de biomateriais, biocombustíveis e outros produtos de interesse industrial (KLEMM *et al.*, 2005; MOON *et al.*, 2011; THAKUR; KESSLER, 2015). A sua produção dá-se em forma de pequenos e longos filamentos na membrana plasmática das células. Estes filamentos, que também poderiam ser chamados de fibra, são compostos por cadeias de celulose; o agrupamento dos filamentos, por sua vez, dá origem a parede celular. Esses filamentos maiores, que formam a parede celular, podem ser

chamados de nanofibra de celulose (NFC). A NFC, combinada com a hemicelulose e a lignina, formam a parede celular secundária em torno da membrana celular. Vale ressaltar que as fibras da parede celular primária e da parede celular secundária terão propriedades, e, conseqüentemente, aplicabilidades diferentes (LOAN; NAVARD, 2016).

A estrutura química da celulose é caracterizada por seu alto grau de cristalinidade e uma disposição regular de cadeias de glicose empilhadas em fibrilas, que são mantidas por ligações de hidrogênio intra-cadeia e inter-cadeia (NISHIYAMA; LANGAN; CHANZY, 2002). Essa organização tridimensional confere à celulose propriedades físicas e mecânicas únicas, incluindo alta rigidez, resistência à tração, baixa solubilidade em solventes orgânicos e alta capacidade de absorção de água (HUBBE *et al.*, 2017), o que pode ocasionar inchaço dessas fibras, uma das problemáticas quando se pensa em utilizar resíduos de madeira como agregado em concreto. Uma outra problemática, dado o caráter orgânico do material, é a degradação pela ação de fungos ou bactérias por clivagem das ligações glicosídicas (LOAN; NAVARD, 2016). A Figura 3 esquematiza como as cadeias de celulose vão gradativamente se agrupando até formar as fibras de celulose, evidenciando a sua importância estrutural para as plantas.

Figura 3 – Cadeias moleculares de celulose.



Fonte: Adaptado de HAN (2019).

2.2.2 Hemicelulose

As hemiceluloses são polissacarídeos compostos por diferentes unidades monoméricas, tais como xilose, arabinose, manose, galactose, glucurônico e 4-O-

metilglucurônico; em suma, açúcares, ácidos e grupos acetilas. Elas são geralmente associadas à celulose e lignina na parede celular de plantas lenhosas e herbáceas, e podem ser extraídas por tratamento alcalino ou enzimático. As hemiceluloses são solúveis em água e suas propriedades físicas e químicas variam de acordo com a composição e proporção de suas unidades monoméricas (PENG *et al.*, 2009; SCHELLER; ULVSKOV, 2010; WILLFÖR *et al.*, 2017).

2.2.3 Lignina

A lignina é definida por Ralph e Landucci (2010) como um biopolímero tridimensional de alta massa molecular, composto por unidades fenólicas, principalmente o monômero p-hidroxifenila, unidades guaiacila e unidades siringila, que são unidas por ligações éter e carbono-carbono, formando uma rede complexa e heterogênea na parede celular das plantas. A sua estrutura química varia entre as espécies vegetais e dentro da mesma planta. A lignina é sintetizada a partir da via do ácido cinâmico e é importante para a estabilidade e rigidez da parede celular, bem como para a defesa contra patógenos e fatores abióticos, como a radiação ultravioleta. A sua degradação é complexa e envolve diversos microrganismos e enzimas, sendo fundamental para o ciclo global do carbono e para a produção de biocombustíveis a partir da biomassa vegetal.

2.2.4 Extrativos

Segundo Vargas-Mendoza *et al.* (2017), os extrativos vegetais são compostos orgânicos complexos encontrados em diferentes partes das plantas que desempenham diversas funções, como proteção contra herbívoros e patógenos, atração de polinizadores e adaptação da planta a condições ambientais adversas. Esses compostos são formados por uma ampla variedade de moléculas, como terpenos, fenóis, alcaloides, flavonoides, ácidos graxos e outros. Entre as características perceptíveis na madeira pela presença dos extrativos, pode-se destacar a coloração típica de algumas madeiras, o cheiro e os produtos necessários ao tratamento de algumas madeiras para usos específicos (BALLONI, 2009).

Os terpenos são um grupo importante de extrativos vegetais que apresentam grande diversidade estrutural e desempenham diversas funções na planta, como proteção contra herbívoros e patógenos, além de contribuir para a adaptação da planta ao ambiente. Esses

compostos são sintetizados a partir do isopreno e podem ser encontrados em diferentes partes da planta, como folhas, caules, flores e frutos (LORETO; SCHNITZLER, 2010).

Os flavonoides são outro grupo comum de extrativos vegetais que apresentam propriedades antioxidantes e podem ajudar a proteger a planta contra danos causados pela radiação UV. Além disso, eles atuam na defesa contra herbívoros e patógenos e contribuem para a regulação do crescimento e desenvolvimento da planta (HARBORNE, 1988). Os flavonoides apresentam grande variedade estrutural e podem ser encontrados em diferentes partes da planta, como folhas, caules, flores e frutos.

2.2.5 Cinzas

As cinzas, também conhecidas como fração inorgânica da biomassa, são compostas por minerais e oligoelementos que permanecem após a queima da matéria vegetal. Segundo Sluiter *et al.* (2008), esses componentes podem ser estruturais, quando fazem parte da matriz da biomassa, ou extrativos, quando podem ser removidos por lavagem ou extração. O teor de cinzas varia consideravelmente entre diferentes espécies vegetais, podendo ser influenciado por diversos fatores, como genética, meio ambiente e manejo. Em geral, o teor de cinzas é relativamente baixo, mas em algumas espécies pode ser mais elevado. Além de conferir resistência estrutural à planta, as cinzas têm um papel importante no fornecimento de nutrientes essenciais para o seu desenvolvimento.

Vassilev, Baxter e Andersen (2010) relatam que as cinzas são compostas por uma grande variedade de elementos minerais, como cálcio, potássio, magnésio, fósforo, ferro e outros micronutrientes, que são necessários para a síntese de clorofila, produção de energia e formação de estruturas celulares. Ademais, as cinzas podem ainda contribuir para a regulação do PH do solo, além de melhorar sua qualidade e fornecer nutrientes importantes para o crescimento das plantas. Contudo, é importante salientar que a presença de elementos tóxicos em algumas cinzas, como metais pesados, pode apresentar riscos para a saúde humana e animal, e deve ser cuidadosamente avaliada em aplicações agrícolas e ambientais (VASSILEV; BAXTER; ANDERSEN, 2010).

2.2.6 Água

De acordo com Khanna (2008), a água é um componente essencial presente na biomassa, podendo corresponder a uma grande proporção de seu peso total. O teor de umidade

da biomassa pode variar de acordo com a espécie, podendo chegar a valores muito elevados em algumas delas, além de estar susceptível a variações, dependendo das estações do ano e tempo de corte da madeira.

Segundo Pfeil e Pfeil (2003), a faixa de variação de umidade das madeiras verdes chega a 130% para madeiras macias e a 30% para madeiras mais resistentes. A umidade das madeiras acontece de duas formas: água no interior da cavidade das células ocas (fibras) e a água absorvida nas paredes das fibras.

A presença de água pode influenciar algumas propriedades da biomassa, como a flexibilidade e a compressibilidade de suas estruturas. Por isso, é importante considerar o teor de umidade da biomassa em aplicações onde suas propriedades macroscópicas são relevantes, como em compósitos e materiais de construção, sendo válido destacar que, assim como o teor de água presente na biomassa influencia algumas de suas propriedades, como citado anteriormente, sua aplicação como bio-agregado influenciará também nas características do compósito gerado, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

O ponto de saturação das fibras é atingido pela evaporação da água existente nas células ocas. Nesse ponto, as paredes celulares ainda estão saturadas, configurando a madeira como meio seca. O próximo estágio de secagem é o ponto de equilíbrio com o ar, ponto esse dependente da umidade atmosférica, variando entre 10 % e 20% para umidades do ar de 60% e 90%, respectivamente, e temperatura do ar de 20° C (KARLSEN *et al.*, 1967 *apud* PFEIL; PFEIL, 2003). Visto que a madeira é um material higroscópico, ou seja, capaz de absorver água do ar, sua umidade é um teor bastante variável.

A propriedade de retração da madeira está diretamente associada a propriedade anteriormente citada, ou as madeiras retraem ou incham, a depender do percentual de umidade ao seu redor.

2.3 Composição do cimento

Os principais componentes do cimento, segundo Neville (2013), podem ser vistos na Tabela 8, sendo sua matéria prima base o calcário, a sílica, a alumina e o óxido de ferro.

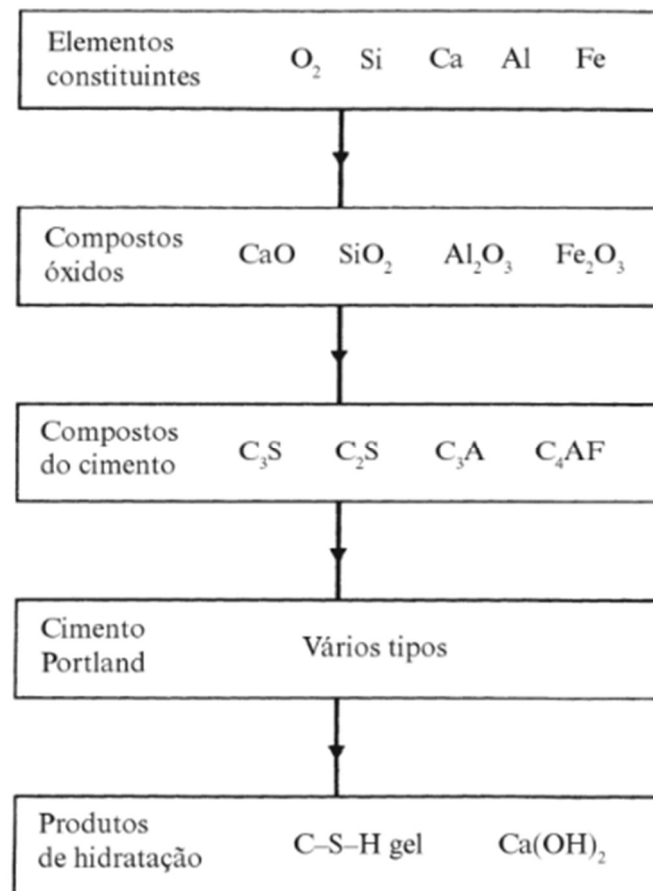
Tabela 8 – Principais compostos do cimento Portland.

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Adaptado de Neville (2013).

A coluna de abreviaturas na Tabela 8 considerou $\text{CaO} = \text{C}$, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$. Dentre os constituintes do cimento, os de maior importância são os Silicatos (C_3S e C_2S), responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada. A hidratação do C_3A resulta na pega instantânea do cimento e perda de consistência inicial. O C_4AF , presente em menor quantidade no cimento, sendo também de menor contribuição no processo de hidratação, reage com a gipsita formando o sulfoferrito de cálcio, cuja presença pode vir a acelerar o processo de hidratação dos silicatos (NEVILLE, 2013). Os componentes e produtos da reação de hidratação podem ser vistos na Figura 4.

Figura 4 –Representação esquemática da formação e hidratação do cimento Portland.



Fonte: Neville (2013).

2.4 Trabalhos base e seus resultados

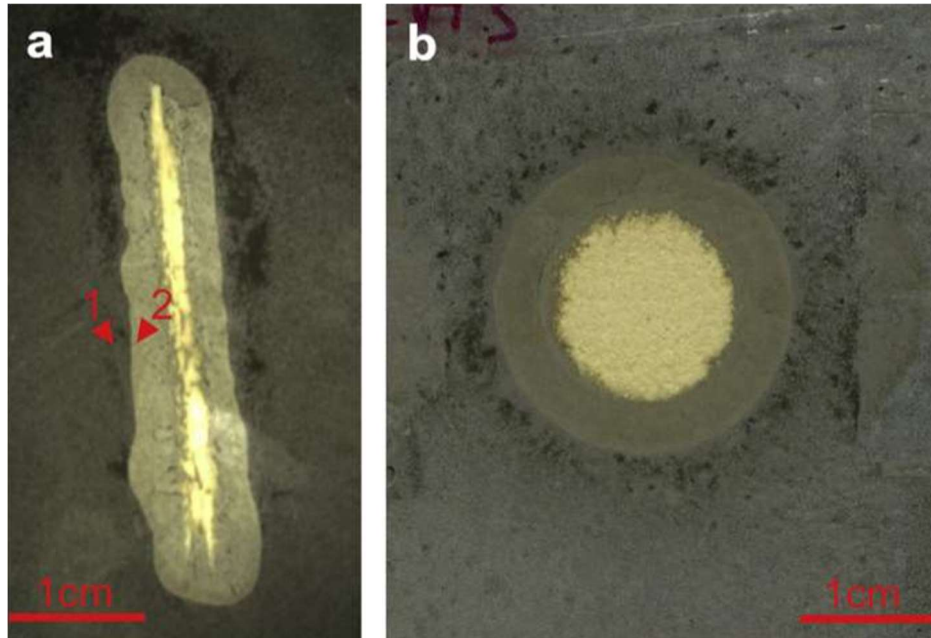
Segundo projeções da Organização das Nações Unidas – ONU (2022), a população mundial pode atingir 8,5 bilhões de habitantes em 2030. O acelerado crescimento populacional dos últimos tempos demanda um proporcional aquecimento no setor da construção civil e consequentemente, aumento da exploração de recursos naturais pelo setor, e da poluição, subproduto dos seus processos. A preocupação com tal cenário, onde a maior necessidade de matéria prima vai de encontro à sua disponibilidade na natureza, pensar em reuso e consumo consciente tem fomentado muitos trabalhos e pesquisas interessantes sobre a incorporação de resíduos e obtenção de bio-concretos, que em particular, lidam com algumas problemáticas similares.

2.4.1 Compatibilidade química entre bio-agregados e cimento

Para utilização de bio-agregados em compósitos cimentícios é importante investigar a composição heterogênea do material lignocelulósico, uma vez que sua natureza orgânica, em combinação com o cimento, pode resultar em efeitos negativos no compósito, não apenas na fase inicial da mistura, no seu endurecimento e retardo do processo de pega, mas também no pós-endurecimento, afetando as propriedades do compósito no longo prazo, onde a durabilidade seria prejudicada (MAGNIONT; ESCADEILLAS, 2017).

Um estudo bastante esclarecedor acerca dos efeitos da interação entre a madeira e o cimento nos primeiros momentos da mistura foi desenvolvido por Diquelou *et al.* (2015). Em seu estudo, os autores introduziram partículas de cânhamo em uma matriz cimentícia, e, após três dias de hidratação, observou-se que a região de contato entre a superfície da partícula de cânhamo e a pasta de cimento Portland correspondia a uma região onde não houve a hidratação do cimento. Para entender ainda mais o fenômeno, repetiu-se o processo com uma pelota de linho enriquecido com isótopo de carbono-13. Essa técnica possibilitou o monitoramento da migração de extrativos da partícula de linho para a pasta de cimento, criando uma correlação entre a presença dos extrativos e a taxa de hidratação do cimento. Com suas análises os autores conseguiram delimitar três zonas diferentes a partir do contato da partícula de linho, que podem ser vistas na Figura 5.

Figura 5 – Imagens geradas após três dias de hidratação da pasta de cimento. a) Partícula de cânhamo com os pontos de amostragem para análise FT-IR indicadas pelas setas 1 e 2 e b) A pelota de linho.



Fonte: DIQUELOU *et al.* (2015).

Na Figura 5 pode-se observar que, nos três primeiros milímetros, a partir do contato da pasta de cimento com a partícula e a pelota de linho, observou-se uma região onde não ocorria a hidratação do cimento, entre três e oito milímetros, a hidratação foi retardada e, a partir de oito milímetros da superfície da partícula, a hidratação não foi prejudicada.

Dada à presença de extrativos nos bio-agregados de origem vegetal, apesar de em menor fração na composição química das madeiras, como visto anteriormente, o tempo de pega, processo de endurecimento do cimento, é comprometido. Thomas e Birchall (1983) *apud* Andreola (2021) afirmam que concentrações de extrativos inferiores a 1% já são suficientes para retardar o endurecimento da pasta de cimento. Isso acontece devido a composição dos extrativos que possuem açúcares solúveis que inibem a hidratação do cimento por migrarem e se concentrarem na superfície, prejudicando as reações de cristalização do cimento (MOSLEMI; GARCIA; HOFSTRAND, 1983).

Na *et al.* (2014) apresentam dois possíveis mecanismos ocasionados pela interação cimento/madeira que influenciariam a hidratação do cimento Portland. Seriam eles a formação de uma barreira temporária que retardaria a hidratação do cimento, causada pelos compostos orgânicos nos grãos de cimento, e o outro fator determinante seria que, dada à composição do bio-agregado, onde os extrativos possuem diversos compostos orgânicos que reagem com íons

de cálcio (Ca^{2+}), essa reação reduz a concentração de tais íons na mistura e, por sua vez, retarda a formação de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H), sendo o C-S-H responsável pela resistência mecânica do cimento endurecido e correspondente de maior volume do sólido formado. Fica claro que sua formação retardada e prejudica o endurecimento do bio-concretos e sua resistência.

2.4.2 Processos adotados para redução da incompatibilidade químicas entre biomassas e matrizes cimentícias

Visando combater os efeitos negativos oriundos da interação serragem/cimento, em particular a problemática da hidratação do cimento e consequente retardo no tempo de pega, algumas alternativas veem sendo testadas para diferentes bio-agregados, com resíduos de bambu (ANDREOLA, 2021), *Pinus* (GLORIA, 2020), resíduos de mistura aleatória das espécies angelim pedra, cedro, cedrinho e maçaranduba (PINTO, 2019), bagaço-de-cana (CABRAL, 2016), etc. Diferentes metodologias são adotadas com esse propósito, como imersão em água fria, em água quente, em hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), em hidróxido de sódio (NaOH), mais conhecida como soda cáustica, e por vezes pela junção de diferentes técnicas (ANDREOLA, 2021).

Sabendo da usualidade e eficiência da utilização da lavagem da serragem para melhoramento de sua compatibilidade com o cimento, Gloria (2020) analisou a evolução do calor de hidratação com um calorímetro isotérmico TAM Air para diferentes tratamentos prévios da serragem de *Pinus*, sendo a não lavagem do material (utilização em seu estado natural), uma lavagem e três lavagens em água aquecida a 80° C durante uma hora, em uma proporção mássica de 10:1 de água e serragem, respectivamente. Os resultados indicaram que a não lavagem do material e apenas uma lavagem inibiram totalmente a hidratação do cimento, enquanto três lavagens, apesar de apresentar um retardo de 10 horas quando comparado a uma mistura de referência de cimento e água deionizada, apresentou uma aceleração durante a reação de hidratação. Diante disso, o autor optou por adotar o tratamento de três lavagens em seu bio-agregado.

Andreola (2021), que trabalhou com resíduos de bambu, após redução granulométrica da biomassa com triturações consecutivas, utilizou-se do processo de lavagem em água quente para tratamento do material. Similar à metodologia adotada por Gloria (2020), Andreola imergiu os resíduos de bambu durante uma hora em água aquecida a 80° C numa proporção de 1:10 de bambu e água. Para definir o número de lavagens necessárias e o impacto

da não lavagem, Andreola, utilizando um calorímetro TAM Air (TA instruments), como feito por Gloria (2020), e observar a evolução da hidratação do cimento para pastas preparadas com finos do bambu sem lavagem prévia, com uma lavagem, com três lavagens, com cinco lavagens do bio-agregado e uma amostra sem finos de bambu para utilizá-la como referência e comparar os resultados das diferentes amostras. Os resultados mostraram que a mistura mais destoante da referência (sem a serragem de bambu) foi a amostra com finos de bambu sem lavagem, conferindo ao processo um período de indução de 9,116 horas. As demais amostras (a partir de uma lavagem) apresentaram uma curva de liberação de calor muito parecida à referência. Por isso, Andreola adotou apenas uma lavagem no trato do material, mantendo-se assim a favor de um menor desperdício.

Os resultados obtidos por Andreola (2021) trazem ainda uma outra conclusão interessante e de muita relevância no estudo do emprego de biomassas às matrizes cimentícias, que é a variabilidade da eficiência de um dado tratamento, a depender do tipo de biomassa analisada. Apesar de adotar procedimentos similares à Gloria (2020), o número de lavagens necessárias no tratamento foi diferente, por utilizarem bio-agregados distintos.

Estudando a viabilidade de utilização de cascas de arroz na produção de chapas de cimento-casca, Zucco (1999) analisou o uso da biomassa em sua forma natural, tratando o material por imersão em água quente a 80° C por 2 horas numa proporção de um litro de água a cada 100 gramas de cascas e por imersão do material por 24 horas em uma solução de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) numa concentração de 5% da massa de cascas de arroz. Os resultados dos ensaios de resistência a compressão indicaram que os bio-concretos de madeira (BCMs) com biomassa tratada com cal obtiveram uma maior resistência mecânica.

Em seu trabalho, Lima e Iwakiri (2012) estudaram o uso alternativo não só dos resíduos de madeira, mas também de materiais minerais, subprodutos de siderurgias, onde o produto seria um compósito de cimento-madeira com substituição parcial do cimento por escória de alto-forno (EAF) e cinza volante (CV). Utilizando-se de resíduos de *Pinus spp.* provenientes de uma madeireira do Paraná peneirado para obtenção de um material com granulometria similar à da areia (diâmetro máximo de 4,75 mm). Para os testes do uso do *Pinus spp.*, os autores analisaram três possibilidades de utilização da serragem: *in natura*, ou seja, sem tratamentos prévios; *in natura* e com adição de 4,5% de cloreto de cálcio bi-hidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e, por fim, adotando um pré-tratamento dos resíduos de *Pinus spp.* onde o material ficaria imerso durante 48 horas em água fria, além da utilização de 4,5% de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Utilizando o critério da resistência a compressão (RC) aos 7 e 91 dias e de resistência a tração (RT) aos 28 dias, concluiu-se que todos os melhores resultados com o uso

de resíduos de *Pinus spp.* ocorreram quando o material tinha sido imerso em água fria durante 48 horas e com adição do $\text{CaCl}_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ e os piores resultados para BCM foram com o uso do material *in natura*. Logo, com o tratamento devido, os resíduos de *Pinus spp.* podem ser utilizados como um bio-agregado miúdo.

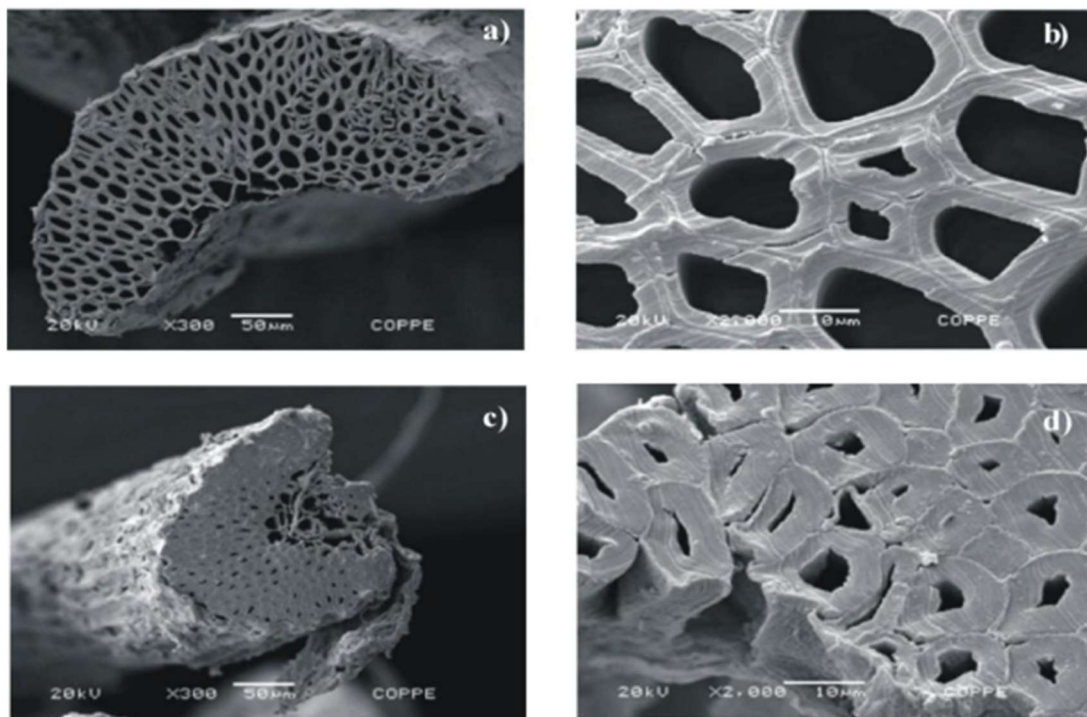
Pinto (2019) testou, em sua pesquisa, diferentes formas de tratar o material em uma única lavagem, variando a temperatura da água (entre 25 ° C e 95° C), o tempo que o material ficaria imerso (entre 0,5 e 48 horas), o uso de cloreto de cálcio (CaCl_2) em diferentes percentuais e de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. A razão entre as massas de serragem e água foi inicialmente de 1:10, mas testou-se proporções de 1:5 e 1:4. Os resultados mostraram que água aquecida solubiliza de forma mais eficaz os extrativos. A depender da temperatura da água, o tempo de imersão não é um fator determinante, sendo que os melhores resultados na extração de extrativos foram notados para temperaturas de 80° C ou superiores. Com a razão de 1:4, obteve-se uma melhor solubilização de extrativos, sinalizando a proporcionalidade entre diminuição de água e maior capacidade de solubilização de extrativos. Associado a isso, a adição de 4% de CaCl_2 ao conjunto definiu o melhor pré-tratamento dos resíduos de madeira analisados.

Cunha (2012), ao estudar as potencialidades do emprego de fibra de coco seco para produção de compósitos de gesso-fibra em forma de placas tipo sanduiche, utilizou a imersão das fibras de coco por 1 hora em uma solução de água com concentração de 4% de hidróxido de sódio (NaOH) para limpeza, removendo ceras impurezas e gorduras existentes na superfície das fibras do material, melhorando a aderência entre o bio-agregado e o gesso. Após o tempo de imersão, o material foi lavado em água corrente até atingir PH neutro. Ao final da pesquisa, chegou-se a um compósito com ganhos significativos em termos de isolamento térmico e acústico e, apesar de apresentar uma menor resistência a compressão e à flexão, quando comparados ao gesso, a adição das mantas com fibra de coco seco torna o material mais dúctil, com uma ruptura menos brusca.

Em seu trabalho, Ferreira *et al* (2012) analisaram a influência de ciclos de molhagem e secagem em fibras de sisal para melhorar a aderência entre elas e a matriz cimentícia utilizada. Para isso, os autores submeteram o material a ciclos de imersão em água à aproximadamente 23° C, durante 3 horas, seguidos de secagem em estufa por 16 horas a 80° C. Ao todo, foram realizados 10 ciclos de molhagem e secagem nas fibras de sisal, e, analisando questões como absorção, variação dimensional e aderência entre fibra e matriz cimentícia, observou-se uma diminuição significativa no índice de absorção de água pelas fibras e uma menor variação dimensional, o que garante uma melhor aderência entre as fibras e a matriz cimentícia devido a diminuição do inchamento do material. Esse comportamento ocorre porque

no processo de “hornificação”, processo de molhagem e secagem do material utilizado pela indústria de papel e celulose, pelo qual ocorre o enrijecimento da matriz polimérica das fibras, que, como consequência, reduz a capacidade de absorção de água, o que lhe confere uma maior estabilidade dimensional. Este processo fica claro na Figura 6.

Figura 6 – Seção transversal das fibras mostrando detalhes das fibro-células. a) e b) *in natura* e c) e d) Pós-tratamento de molhagem e secagem.



Fonte: FERREIRA *et al.* (2012).

A Figura 6 mostra em detalhes as fibro-células das fibras antes (Figuras a) e b)) e depois (Figuras c) e d)) da aplicação dos ciclos de molhagem e secagem e, comparando-as, pode-se vislumbrar que há uma diminuição dos vazios, reduzindo consequentemente a sua capacidade de absorção de água.

2.4.3 Uso de aditivos

Além do tratamento para melhoramento da compatibilidade entre o cimento e a biomassa e viabilização das reações, o uso de alguns aditivos pode ser empregado para melhorar ainda mais as propriedades do compósito, como redução do fator água/cimento (a/c),

melhoramento da trabalhabilidade, aceleração de pega, aumento da resistência, modificação de viscosidade etc.

Lima e Iwakiri (2012), além do tratamento do bio-agregado para remoção dos extrativos, adicionaram ao bio-concreto o acelerador de pega $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ para correção do retardo no processo de endurecimento do cimento ocasionado da associação de biomassas à matriz cimentícia.

O aditivo acelerador de pega utilizado por Zucco (1999) foi o CaCl_2 , compondo o compósito de maior resistência à compressão cujo bio-agregado, cascas de arroz, avia sido tratada por lavagem em solução de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

O uso de aditivos aceleradores de pega é empregado à produção de concretos em situações que se exija ganhar resistência inicial em menos tempo, redução do tempo para fase de desforma e redução do tempo de início de pega. A utilização de aditivos com tais funções na produção de bio-concretos compensam ou reduzem o retardo no processo de endurecimento decorrente da associação entre o cimento e bio-agregados.

2.4.4 Vantagens do bio-concreto de madeira (BCM)

Beraldo (2014), comparando os bio-concretos de madeira com os materiais cimentícios convencionais, destacou algumas características importantes que enfatizam a necessidade de pesquisa na área, para incorporação de resíduos de vegetais, não só por uma questão ambiental, mas também de melhoramento de materiais cimentícios tradicionais, adicionando propriedades e atributos da madeira. Dentre as vantagens o autor destacou:

- Reuso: sendo uma matéria-prima de grande disponibilidade, dada a possibilidade de incorporação de inúmeros resíduos vegetais, tais como bambu, serragem de madeiras de diferentes espécies, resíduos de indústrias como bagaço de cana, sementes de açaí, cascas de arroz, talos de trigo, talos de milho, bagaço de coco, entre outros, sendo, quase sempre, necessário algum tipo de tratamento prévio para utilização como bio-agregado;

- Benefícios químicos: no que tange os benefícios da associação entre um bio-agregado e uma matriz cimentícia em relação à questão química, tem-se a resistência à agentes biológicos, já que o caráter alcalino da mistura mantém a biomassa protegida de ataques de insetos e fungos. Vale destacar que a exposição do compósito a intempéries pode acarretar o surgimento de fissuras, deixando a biomassa exposta a ataques biológicos. Entretanto, em alguns casos, o ambiente alcalino pode enfraquecer a capacidade de reforço de algumas fibras;

- Características e trabalhabilidade: a leveza dos bio-concretos, com massa específica aparente entre 400 e 1500 kg/m³, os categoriza como concretos leves, o que facilita sua utilização como um bloco do compósito, por exemplo, possibilitando, inclusive, a criação de peças maiores e mais cumpridas; oferece um fácil corte, desgastando menos as ferramentas do que o concreto convencional. Alguns outros atributos vêm sendo creditados aos BCMs, como conforto térmico, dificultando a troca de calor entre os ambientes interno e externo, dada a menor condutividade térmica da madeira, dissipação acústica, resistência ao fogo, etc. Os BCMs também possuem uma boa estabilidade dimensional quando não utilizados externamente sem um tratamento prévio.

2.4.5 Desvantagens do BCM

Segundo Beraldo (2014), a incompatibilidade química entre o bio-agregado e o cimento é a principal desvantagem dos BCMs e dela surgem outras desvantagens, como um tempo mais longo para hidratação do cimento, inibição do desenvolvimento da resistência do bio-concreto e uma durabilidade menor, se adotada uma produção sem um trato mais cuidadoso com o material. E essas desvantagens, oriundas da incorporação da biomassa, advêm de seu caráter orgânico e sua incompatibilidade química com o cimento, que interagem com a matriz cimentícia, interferindo na sua hidratação e modificando características do compósito. Em seu trabalho, o autor afirma que a presença da biomassa agrega ao composto algumas características negativas quanto a sua aplicabilidade, como a fragilidade dimensional, onde a exposição do material à umidade sem um tratamento prévio resultaria em sua expansão e fissuração, além de conferir uma maior porosidade ao BCM.

A tendência a uma maior porosidade do bio-concreto facilita a entrada de dióxido de carbono (CO₂) e umidade pelos vazios e acelera o processo de carbonatação do concreto, onde o cálcio (Ca) presente no cimento é dissolvido pela água dando, origem ao Ca(OH)₂ e o CO₂ reage com a água formando ácido carbônico (H₂CO₃). Por fim, o Ca(OH)₂ reage com H₂CO₃, tendo como produto o carbonato de cálcio (CaCO₃). O consumo do Ca neste processo causa a diminuição do PH do cimento, reduzindo sua alcalinidade (CIVIL, 2023).

A constatação das problemáticas advindas da adição de biomassa à pasta de cimento, em sua forma natural, sem um tratamento prévio, destacam a necessidade de conhecer a biomassa que se deseja incorporar e sua compatibilidade com a matriz cimentícia, para identificar os produtos químicos nocivos na interação e os melhores tratamentos a serem adotados. Pensando em uma escala industrial, a escolha de uma biomassa inapropriada ou um

tratamento ineficaz pode gerar consequências catastróficas ou gerar um excelente produto, caso os estudos e tratamentos sejam realizados (BERALDO, 2014).

2.5 Painéis e blocos existentes no mercado

A Cãnhamor LDA, produtora dos ECOblocos®, que são blocos produzidos a base de cânhamo, surgiu do comprometimento em contribuir com o futuro do planeta, através da criação de um material alternativo de baixo impacto, tanto no uso quanto em seu processo produtivo, que não emitisse carbono no meio durante sua produção, além do foco em estimular a economia local e familiar, através de um processo agrícola sustentável e funcional, com benefícios, não só ecológicos, mas também com a capacidade de proteger os solos da erosão, o que torna a participação dos agricultores locais ainda mais estimulante, possibilitando ainda mais a difusão da produção.

O cânhamo, uma planta da espécie *Cannabis Sativa* (ver Figura 7), diferente da maconha, apresenta baixos teores de tetra-hidrocanabiodiol (THC), substância responsável por causar efeitos psicoativos. Ao longo dos tempos, muitos usos foram dados a esta planta, como a exploração de sua fibra na produção têxtil, tendo sido encontrados fragmentos em diversas civilizações (Cãnhamor LDA, 2023). De acordo com Cãnhamor LDA (2023), os chineses utilizavam o cânhamo na produção de cordas, papel, medicamentos e redes de pesca. As cordas que foram utilizadas para transportar as pedras na construção das pirâmides do Egito tinham, por base, o cânhamo. Sua aplicação no setor têxtil e na produção de papel fez parte de distintos povos em diferentes territórios. Em Portugal, a justificativa de seu uso na confecção de cordas e velas era a sua resistência ao sal e sua durabilidade e, considerando o desempenho português nos tempos das grandes expedições, é de se imaginar a eficácia de sua aplicação. Atualmente, diversas aplicações são dadas a essa planta, além do uso em painéis e blocos, como os ECOblocos®, algumas aplicadas pela indústria são: na produção de papel, tecidos, areia e camas para animais, diamantes industriais, biodiesel, componentes para carros, entre outros.

Figura 7 – Plantação de cânhamo.



Fonte: Adaptado de Cânhamor LDA (2023).

A IsoHemp, uma outra produtora de blocos de cânhamo define a composição base dos seus blocos como a mistura entre as partículas de cânhamo, calcário (cal aérea e/ou hidráulica) e água, sendo a proporção entre os componentes definida pela aplicabilidade dos blocos. O preparo inicia-se com a mistura da água com a cal e posteriormente adiciona-se as partículas de cânhamo gradativamente.

Os ECOblocos® oferecem diversos benefícios, como um excelente isolamento térmico, resistência ao fogo, isolamento acústico, um ambiente respirável (pois absorve a umidade), leveza, durabilidade, resistência mecânica, resistência a pestes e bolor. Quanto ao quesito aplicabilidade dos ECOblocos®, são bastante satisfatórios, por serem leves, oferecem uma montagem mais fácil do que os tijolos convencionais, podendo ser empregados na construção de novos edifícios ou reformas, seja em fechamento interno, externo, divisão de ambientes ou isolando paredes já existentes. Para tanto, a Cânhamor conta com diferentes tipos de ECOblocos®, para diferentes aplicabilidades, como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – ECOblocos®.

			
ECObloco12®	ECObloco20®	ECObloco25®	ECObloco30®
Aplicações ideais: paredes interiores, telhados, chão, e isolamento para paredes exteriores ou interiores existentes.	Aplicações ideais: paredes exteriores; paredes de divisão em apartamentos, escritórios e oficinas; paredes exteriores para habitações residenciais.	Aplicações ideais: para aqueles que querem mais isolamento do que aquele providenciado pelos de 20cm de largura, mas a um custo inferior aos de 30cm de largura	Aplicações ideais: paredes exteriores; um nível luxuoso e superior de isolamento, equivalente a um ar condicionado natural o ano inteiro.

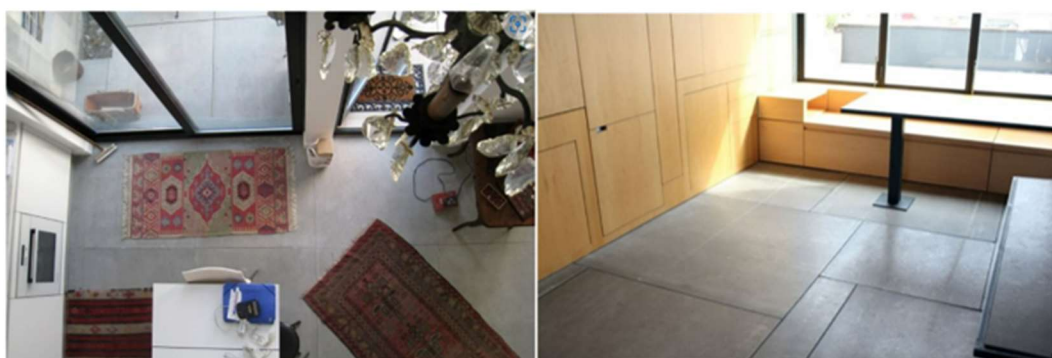
Fonte: Adaptado de Cânhamor Hemp Company (2023).

Outra vantagem desse produto é o seu o processo produtivo, onde o desperdício é quase zero, não requer a adição de aditivos químicos à mistura, apesar de isso ocasionar um maior tempo de cura, não se utiliza aquecimento em nenhuma fase do processo produtivo, não liberando gases nocivos no ambiente, configurando-o como um produto carbono negativo, ou seja, em todo ciclo de vida, desde o plantio até chegar aos ECOblocos®, consome-se mais CO₂ do que se libera no ambiente.

No seguimento de painéis prensados existentes no cenário internacional, pode-se destacar a Viroc, que trabalha com painéis cuja matéria prima é o cimento associado à madeira, unindo a resistência e durabilidade do cimento com a flexibilidade da madeira em painéis com 1250 mm x 3000 mm e 1250 mm x 2600 mm, podendo ter 8 mm, 10 mm, 12 mm, 16 mm, 19 mm, 22 mm, 25 mm, 28 mm ou 32 mm de espessura.

A composição dos painéis Viroc, em percentual de peso seco dos materiais, é de 61,8% de cimento Portland, 22,7% de aparas de madeira de pinho, 10,7% de água, 1,4% de aditivos não tóxicos e 3,4% de pigmentos, disponíveis nas cores cinza, preto, branco, amarelo, vermelho e ocre. Ao final do processo de fabricação, tem-se painéis heterogêneos, com diferentes tons em sua extensão, dada à presença de uma matéria prima natural e as reações decorrentes da mistura. Os painéis Viroc podem ser empregados internamente (ver Figura 9), como em paredes divisórias, revestimento de paredes internas, revestimento de tetos falsos e pisos, ou em áreas externas (ver Figura 10), como em fachadas, por exemplo, e é sua utilização que definirá a necessidade de tratamento ou não. Os painéis empregados em áreas externas, que estarão expostos a intempéries, como radiação solar e umidade, devem pintados ou envernizados, internamente, além de utilizá-lo com a superfície lisa, pode-se também lixar a superfície do painel, o que expõe as partículas da madeira, dando um aspecto muito interessante ao acabamento, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 9 –Painéis aplicados a áreas internas.



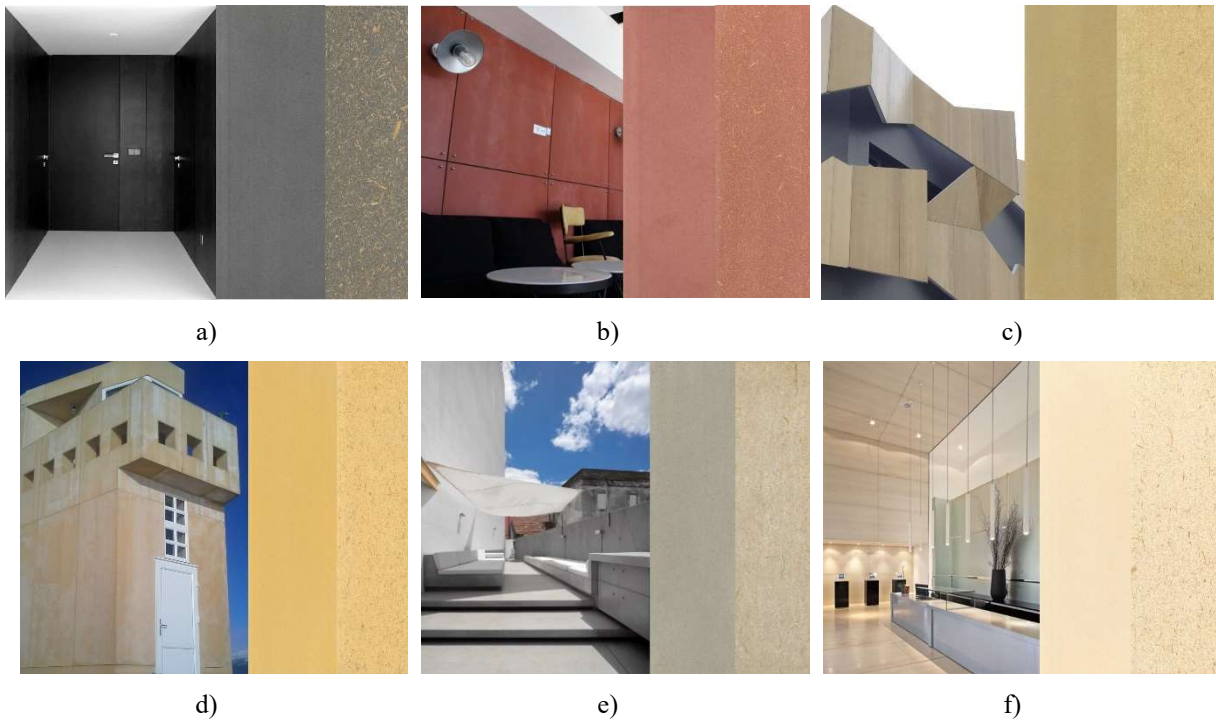
Fonte: Viroc (2023).

Figura 10 – Painéis aplicados a áreas externas.



Fonte: Viroc (2023).

Figura 11 – Cartela de cores dos painéis Viroc com acabamentos bruto e lixado. a) Preto, b) Vermelho, c) Ocre, d) Amarelo, e) Cinza e f) Branco.



Fonte: Viroc (2023)

Os painéis prensados da Viroc oferecem uma série de benefícios ambientais ao absorver resíduos, além de apresentarem diversas características favoráveis para uso na construção civil. Esses painéis são não tóxicos, proporcionam isolamento térmico e acústico, possuem alta resistência ao suporte de cargas e são fáceis de instalar. Além disso, são resistentes

a impactos, fungos e insetos, e são hidrófugos, resistentes ao gelo e ao fogo. Essas propriedades destacam que produtos com base de biomassa possuem uma variedade de qualidades relevantes para sua aplicação na construção civil, indo além da simples redução de resíduos no meio ambiente.

Essas características tornam os painéis prensados da Viroc uma opção atrativa para a construção civil, fornecendo, não apenas um método eficiente de lidar com resíduos, mas também garantem propriedades essenciais para o desempenho e a durabilidade das estruturas. O uso de biomassa como base para esses produtos evidencia a importância de considerar soluções sustentáveis na indústria da construção, buscando benefícios ambientais sem comprometer a qualidade e a eficiência das edificações.

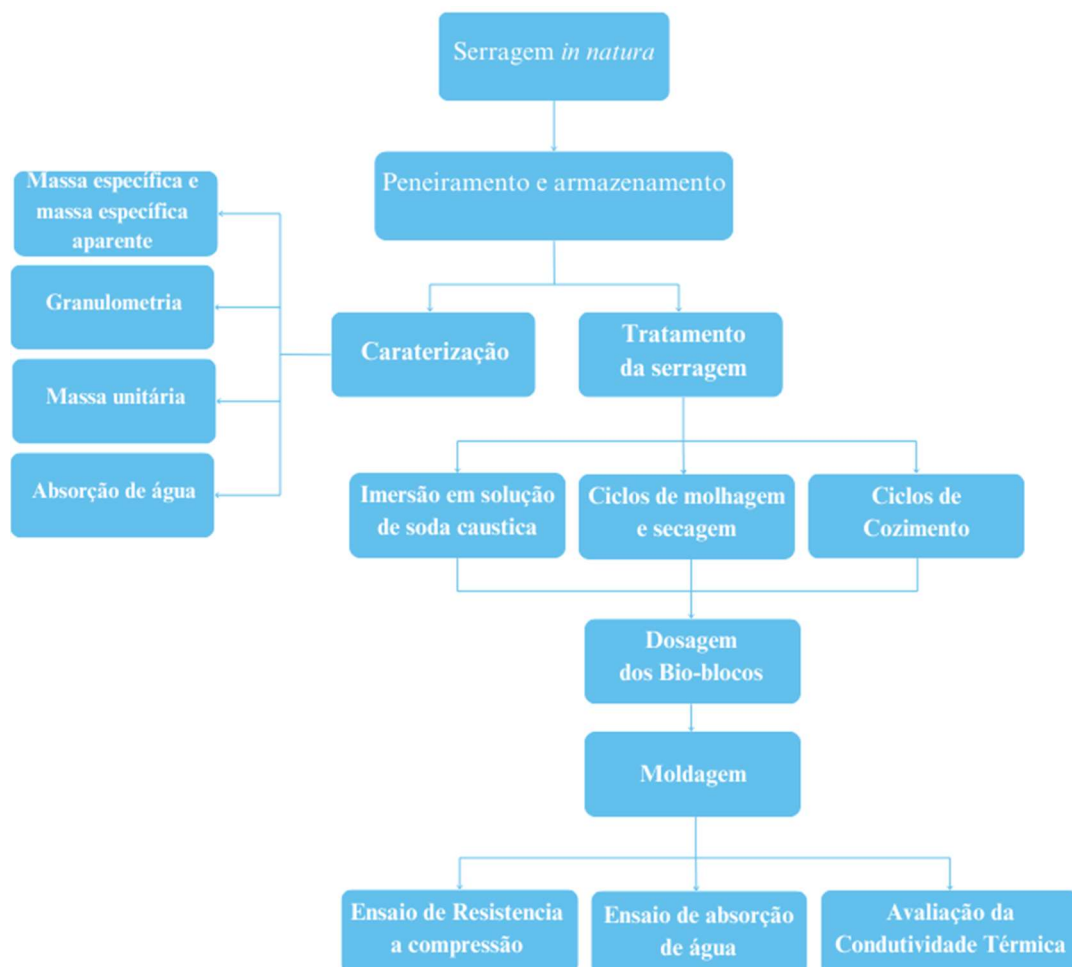
No presente capítulo fica claro que a incorporação de biomassas em insumos para construção civil é uma atividade que enfrenta muitas problemáticas advindas do caráter orgânico dos bio-agregados, que demandam estudos e emprego de tratamentos adequadas para sua utilização e obtenção dos benefícios como redução da exploração de matérias primas, como areia e cimento, por exemplo, reuso de resíduos, leveza e isolamento térmico. Já existem alguns produtos no mercado com a adição de bio-agregados, mas ainda há muito a se estudar para tornar tais produtos uma opção em comparação aos produtos convencionais existentes no mercado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS UTILIZADOS

Neste capítulo, serão descritos todos os materiais e procedimentos adotados rumo ao objetivo final: um BCM que atenda aos critérios normativos descritos anteriormente para blocos de vedação de concreto, atentando-se à adoção de atividades exequíveis dentro das disponibilidades do Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus do Sertão.

O presente estudo apresenta uma abordagem qualitativa e quantitativa, do tipo experimental, onde, por meio de vários testes e análises, fez-se a avaliação da viabilidade do emprego de resíduos de madeira *Pinus* como agregado miúdo na produção de bio-blocos de vedação, da sua caracterização e tratamento até sua aplicação como bio-agregado. O fluxograma da Figura 12 mostra os procedimentos no manuseio da serragem na presente pesquisa, de sua forma *in natura* até sua aplicação nos bio-blocos.

Figura 12 – Fluxograma dos procedimentos experimentais do bio-agregado.



Fonte: Autor (2023).

3.1 Materiais utilizados

Dentre os materiais utilizados que serão listados, estão detalhados não só os que compõe o bio-bloco ao final da pesquisa, mas todos os materiais que foram testados rumo a esse objetivo, que foram submetidos a análises e seu uso mostrou-se interessante ou não através de parâmetros como qualidade, economia, sustentabilidade e disponibilidade, ou pela viabilidade a partir de uma perspectiva de produção em larga escala, supondo um produto comerciável.

3.1.1 Bio-agregado

Neste trabalho, utilizou-se resíduos de madeira *Pinus* mista, não se sabendo ao certo quais espécies compõem o material estudado. A biomassa empregada na pesquisa foi adquirida em uma marcenaria na cidade de Paulo Afonso/BA, subproduto do corte e raspagem de tábuas de *Pinus* para construção de móveis por métodos artesanais, sendo composta por partículas de diferentes tamanhos e formatos, como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 –Resíduo bruto sem nenhum tipo de processamento.



Fonte: Autor (2023).

Inicialmente, fez-se necessário delimitar uma faixa de granulometria na qual se iria trabalhar. Como o intuito da pesquisa era a utilização da serragem de *Pinus* como agregado miúdo, substituindo parcialmente a fração de areia da composição do bloco, agregado miúdo definido pela NBR 7211 (ABNT, 2022) como agregados passantes pela peneira de abertura de malha 4,75 mm, a dimensão máxima característica ($D_{m\acute{a}x}$) utilizada foi de 4,8 mm.

Por se tratar de um material higroscópico, ou seja, dotado da capacidade de absorver ou perder água para de atingir equilíbrio com a umidade do ar e, como consequência, inchar ou retrair respectivamente, partículas muito pequenas poderiam comprometer a integridade dimensional dos bio-blocos, dada a sua maior superfície de contato e, conseqüentemente, maior capacidade de absorção e inchaço. Por isso, a dimensão mínima característica ($D_{mín}$) admitida para as partículas foi de 1,2 mm, próxima à adotada por Gloria (2015), que utilizou 1,18 mm como $D_{mín}$.

Fez-se, assim, o peneiramento do material, separando para uso da serragem passante pela peneira de 4,8 mm e retida na peneira de 1,2 mm de abertura (ver Figura 14).

Figura 14 – Processo de peneiramento e separação do material que seria utilizado.

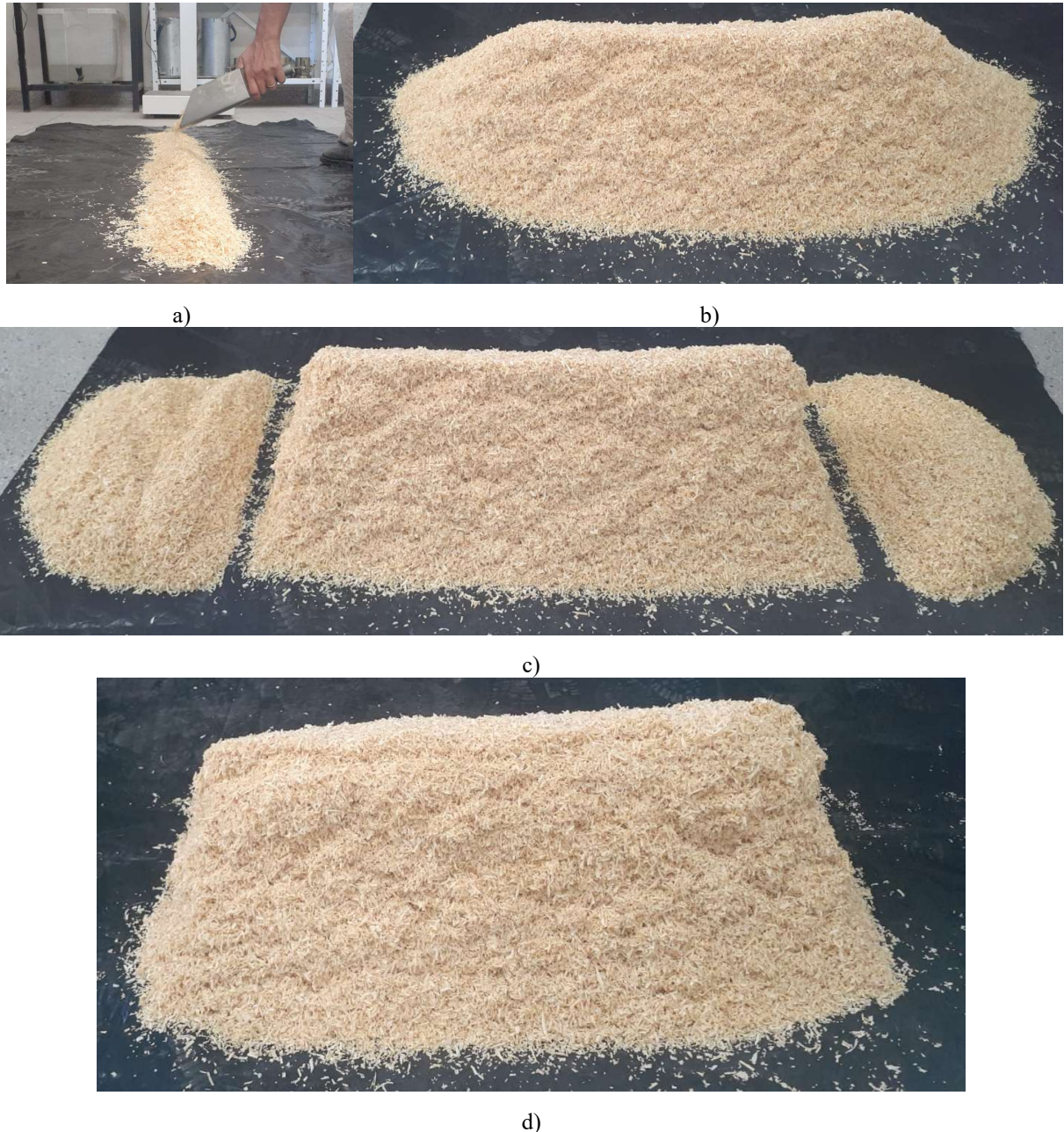


Fonte: Autor (2023).

Vale destacar uma característica do material identificada visualmente, que é a grande predominância de partículas mais alongadas, onde uma das dimensões é muito superior as outras duas. Logo, o material passar ou não em uma peneira está diretamente ligado a face da partícula que terá contato com a abertura da peneira e o tempo de peneiramento aplicado.

Após separar as partículas que seriam utilizadas, realizou-se a homogeneização do material para armazenamento, visando evitar a segregação entre as frações de maior e de menor granulometria. Este passo foi importante para gerar amostras mais uniformes e representativas quanto ao material trabalhado. Para tanto, foi utilizado o método da pilha alongada onde, pouco a pouco, o material ia sendo derramado em uma pilha alongada, como visto na Figura 15 a), obtendo a pilha vista na Figura 15 b). Ao final, o material das extremidades foi separado e lançado novamente na crista da pilha (ver Figura 15 c)). O resultado do processo de homogeneização pode ser visualizado na Figura 15 d).

Figura 15 –Disposição do material em uma pilha alongada. a) espalhamento do material na pilha, b) processo de espalhamento finalizado, c) separação das extremidades para espalhamento na crista da pilha e d) finalização do processo de homogeneização por pilha alongada.



d)
Fonte: Autor (2023).

Feito isso, o material foi repartido (ver Figura 16) e guardado em sacos pretos até o momento de sua caracterização, tratamento e aplicação, para conservar propriedades naturais, como por exemplo a umidade.

Figura 16 –Redução do material homogeneizado para armazenamento.



Fonte: Autor (2023).

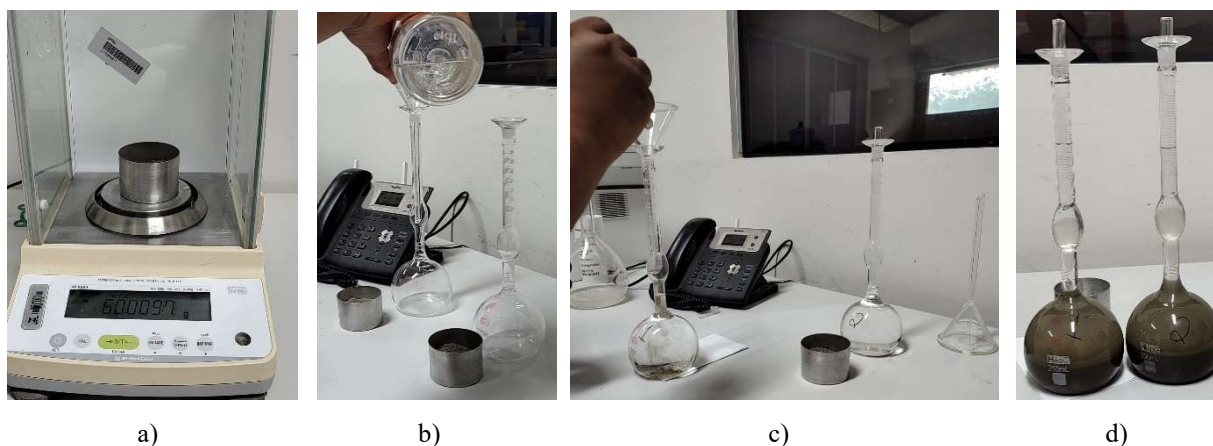
3.1.2 Cimento Portland

Para o presente estudo optou-se pela adoção, como aglomerante para produção dos bio-blocos o Cimento Portland CP V ARI da marca Poty para obras especiais e industrial, com alta resistência inicial. A composição química informada pelo fabricante na embalagem do produto engloba silicatos de cálcio, alumínio, ferro, sulfato de cálcio, filler carbonático e Pozolana.

3.1.2.1 Massa específica do cimento Portland CP V ARI

Para caracterização do material, determinou-se a massa específica do cimento Portland CP V ARI seguindo os procedimentos prescritos pela NBR 16605 (ABNT, 2017). Primeiramente, pesou-se duas amostras de cimento com 60 g cada (ver Figura 17 a)), em seguida adicionou-se querosene, um dos líquidos indicados pela norma de referência, dada a sua não reatividade com o cimento, a dois frascos volumétricos de *Le Chantelier* (Figura 17 b)) e anotou-se o volume inicial. Depois disso, adicionou-se as amostras de cimento previamente separadas com auxílio de uma pequena espátula, como visto na Figura 17 c), o resultado deste processo pode ser vislumbrado na Figura 17 d). Em prosseguimento, anotou-se o volume final e, com a massa do cimento e o volume ocupado pelo mesmo, calculou-se sua massa específica.

Figura 17 – Procedimentos laboratoriais para definição da massa específica do cimento. a) Pesagem do cimento, b) Adição de querosene aos frascos de *Le Chantelier*, c) Adição das amostras de cimento aos frascos de *Le Chantelier* com querosene até a marca entre 0 e 1 ml e d) Frascos com querosene e as amostras de cimento.



Fonte: Autor (2033).

3.1.3 Água

Para todos os procedimentos adotados na pesquisa, utilizou-se água proveniente do reservatório do Campus, fornecida pelo poço artesiano da UFAL.

3.1.4 Aditivos

O uso de aditivos precisou ser analisado tanto no processo de tratamento da biomassa quanto no traço dos bio-blocos, afim de melhorar algumas problemáticas advindas com a adição da serragem à composição, como maior tempo de pega, segregação do bio-agregado, trabalhabilidade e necessidade de um menor fator de água/cimento (a/c), já que a presença da serragem tende a reduzir a resistência do bio-bloco.

Para ajudar na remoção de extrativos, presentes em resíduos de origem vegetal, observou-se na literatura a utilização de produtos como NaOH (Cunha, 2012) e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Zucco, 1999), por exemplo. No presente trabalho, um dos três tratamentos utilizados no material para extração de extrativos foi o NaOH, mais conhecido como soda cáustica. Os outros dois tratamentos não envolveram a adição de aditivos químicos; neles foi avaliado apenas a eficiência dos tratamentos térmico e ciclos de molhagem e secagem, que serão explanados mais detalhadamente em tópicos futuros.

Na composição do bio-concreto utilizou-se a adição de CaCl_2 como acelerador de pega e um aditivo plastificante para redução da quantidade de água na mistura para uma melhor trabalhabilidade.

3.1.5 Areia

A areia empregada aos bio-blocos foi adquirida no comércio local, proveniente do povoado Alto Bonito pertencente à Delmiro Gouveia/AL, a qual submeteu-se a caracterização por meio dos ensaios de granulometria, massa unitária e massas específica e específica aparente, de acordo com as normas NBR 17054 (ABNT, 2022), NBR 16972 (ABNT, 2021) e NBR 16916 (ABNT, 2021), respectivamente.

3.1.5.1 Granulometria da areia

Como prescrito pela NBR 17054 (ABNT, 2022), para analisar a granulometria do material, separou-se duas amostras da areia previamente seca em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$, com 300 g cada, como visto nas Figuras 18 a) e b). Organizou-se um jogo de peneiras contendo em ordem decrescente de aberturas as peneiras de 9,5 mm, 6,3 mm, 4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 600 μm , 300 μm e 150 μm . Por fim, foram encaixadas ao jogo de peneiras um fundo de peneiras e uma tampa para evitar perdas de material (ver Figura 18 c)). O ensaio foi realizado com cada amostra e o resultado advém de sua média.

Após o peneiramento da areia, aferiu-se as massas do material retido em cada peneira e no fundo.

Figura 18 – Ensaio de granulometria da areia. a) Pesagem da amostra A, b) Pesagem da amostra B e c) Jogo de peneiras empregado no ensaio.



Fonte: Autor (2033).

3.1.5.2 Massa unitária

O ensaio para definição da massa unitária do material em estado solto foi prosseguido como prescrito pela NBR 16972 (ABNT, 2021), considerando o método “C”.

Para o ensaio, utilizou-se um recipiente metálico com duas alças com volume de aproximadamente 5,9 L, a areia *in natura*, uma balança de resolução de 50 g, uma pá e uma régua metálica para rasamento do recipiente (ver Figura 19 a)). O ensaio consistiu em encher o recipiente com a areia até o transbordamento, como visto na Figura 19 b), com a menor distância de queda possível do material, para evitar seu adensamento. Feito isso, fez-se o nivelamento do material para que a areia ocupasse apenas o volume interno do cilindro, como pode-se verificar na Figura 19 c) e, em seguida, o material foi pesado. Repetiu-se esse procedimento três vezes,

e a massa unitária definida para a areia, massa da areia dividida pelo volume interno do recipiente, foi a sua média.

Figura 19 – Procedimentos laboratoriais para definição da massa unitária da areia. a) Materiais utilizados, b) Enchimento do recipiente e c) Nivelamento do recipiente.



a)

b)

c)

Fonte: Autor (2033).

3.1.5.3 Massa específica e massa específica aparente

Os procedimentos para caracterização da areia quanto à sua massa específica e massa específica aparente foi realizado de acordo com a NBR 16916 (ABNT, 2021). Segundo a mesma, a massa específica é a relação entre a massa da amostra do agregado e seu volume, desconsiderando os vazios internos e externos às partículas do material. A massa específica aparente é a mesma relação, mas dessa vez sem excluir os vazios do volume da amostra.

Após imersão em água durante 24 horas, o material foi exposto ao ar até atingir a condição saturada superfície seca, na qual as partículas do agregado atingem sua condição de máxima absorção, mas apresentam superfície seca. Para verificar se o agregado estava saturado superfície seca utilizou-se um molde tronco de cone como prescrito pela norma; nesta fase do processo, o molde foi preenchido pela areia e aplicou-se 25 golpes com uma haste metálica; o estado é atingido quando, ao remover o molde, a areia apresenta um pequeno desmoronamento (ver Figura 20 b)); quando não (ver Figura 20 a)), indica que ainda há água na superfície do material e o mesmo deve ser um pouco mais revolvido para evaporação da água superficial e o processo repetido.

Figura 20 – Verificação do estado de saturação superfície seca do material. a) Amostra de areia ainda com água superficial e b) Partículas saturadas superfície seca.



a)

b)

Fonte: Autor (2023).

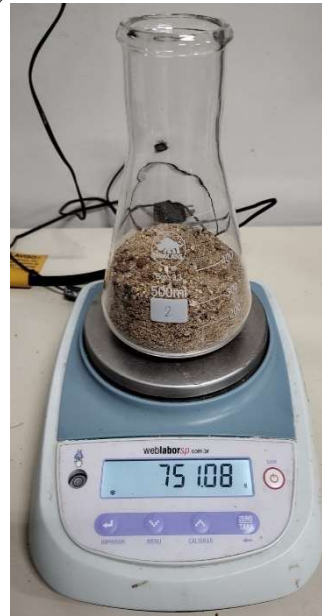
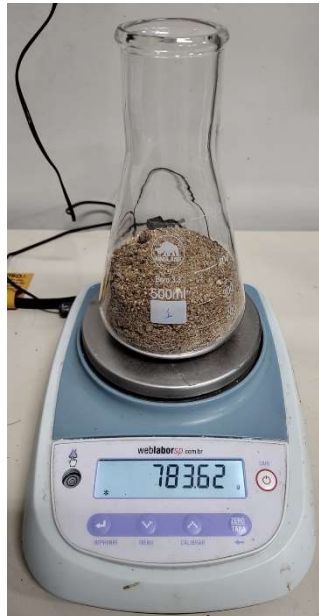
Subsequentemente, duas amostras com 500 g de areia saturada superfície seca foram separadas (Figura 21 a)) e colocadas em frascos de *Erlenmeyer* e a massa do conjunto (frasco e areia) foram aferidas e registras (Figura 21 b)). Depois disso, água foi adicionada aos frascos até a marca de 500 mL e, após um descanso em banho maria dos conjuntos (frasco, areia e água) em água em temperatura ambiente durante 1 hora (Figura 21 c)), o conjunto foi pesado (Figura 21 d)).

Em seguida as amostras de areia foram removidas e levadas à estufa a $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas (Figura 21 e)). Por fim, aferiu-se a massa das amostras de areia seca (Figura 21 f)).

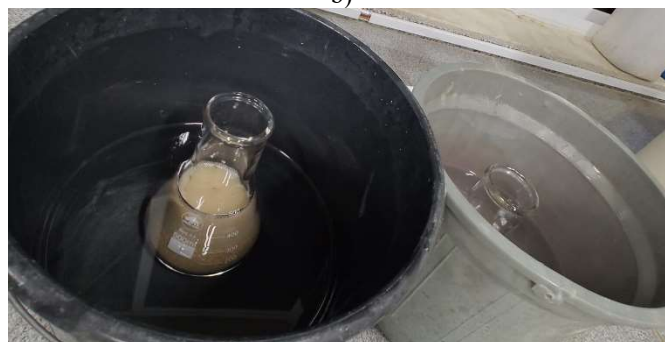
Figura 21 – Ensaio de massa específica e massa específica aparente. a) Pesagem das amostras saturada superfície seca, b) Pesagem do conjunto frasco e areia, c) Banho maria do conjunto frasco, areia e água, d) Pesagem do conjunto frasco, areia e água, e) Secagem em estufa das amostras de areia e f) Pesagem do conjunto areia e cápsula.



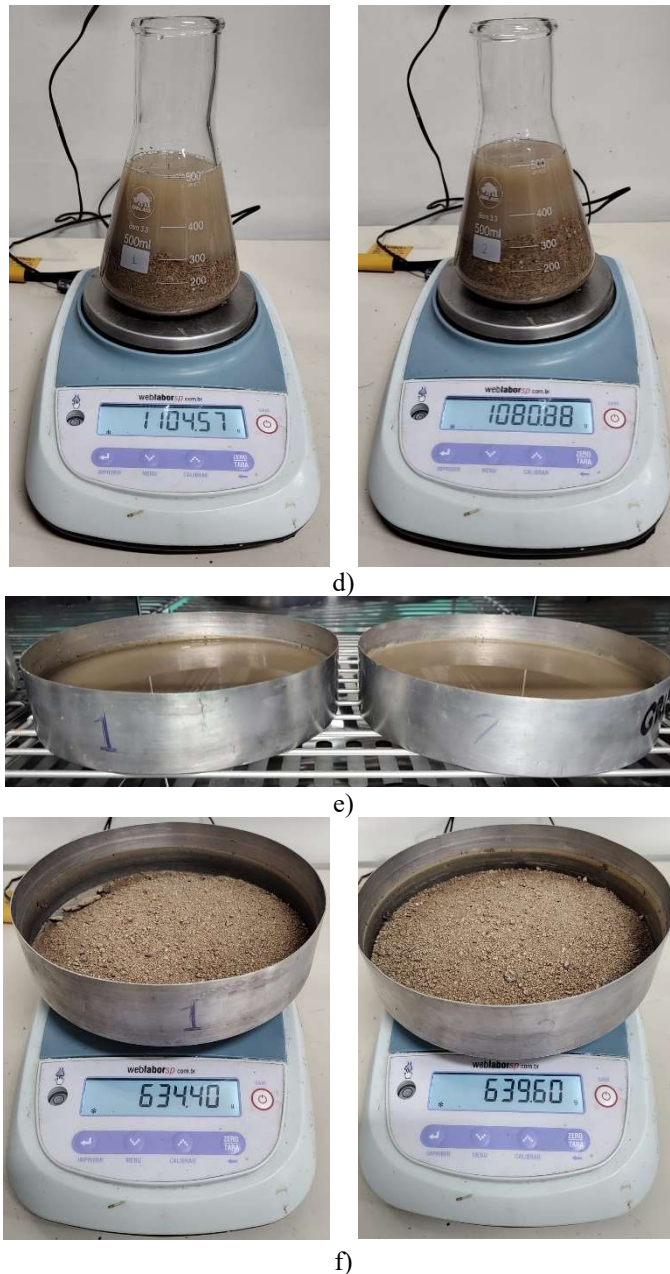
a)



b)



c)



Fonte: Autor (2023).

3.1.5.4 Absorção de água da areia

A determinação da capacidade de absorção de água do material foi realizada utilizando-se os dados do ensaio de massa específica e massa específica aparente com os cálculos prescritos pela NBR 16916 (ABNT, 2021), onde a absorção é expressa em porcentagem, matematicamente dada pela Equação 1:

$$Abs = ((m_B - m_A)/m_A) \cdot 100 \quad (1)$$

Sendo Abs a absorção, m_A a massa seca da amostra e m_B a sua massa saturada superfície seca.

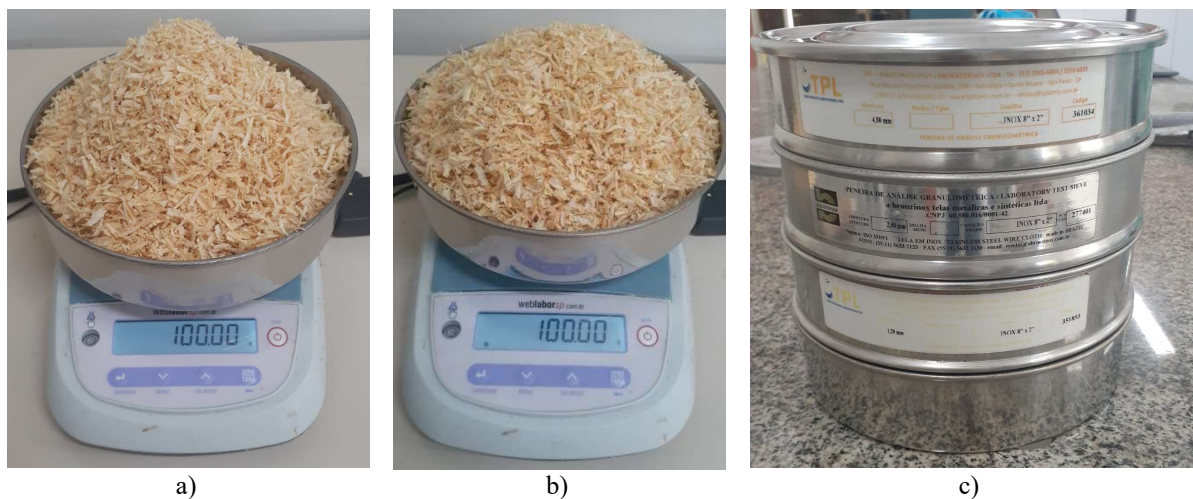
3.2 Caracterização da serragem de madeira *Pinus in natura*

3.2.1 Granulometria do bio-agregado

Os critérios e procedimentos que foram adotados para este ensaio são os estabelecidos pela NBR 17054 (ABNT, 2022) para agregados, e o tratamento com as amostras seguiu-se em conformidade com a NBR 16915 (ABNT, 2021), que define o trato correto para coleta das amostras.

Após a separação da faixa granulométrica entre 4,8 mm e 1,2 mm da serragem de *Pinus* e sua homogeneização pelo método da pilha alongada, 2 amostras do material com 100 g foram separadas para realização do ensaio de granulometria, como visto na Figura 22 a) e b). Para este ensaio utilizou-se as peneiras de abertura 4,8 mm, 2,4 mm e 1,2 mm, compondo o kit com uma tampa e um fundo, como visto na Figura 22 c).

Figura 22 – Granulometria da serragem. a) Amostra A, b) Amostra B e c) Jogo de peneiras utilizado no ensaio de granulometria dos resíduos de *Pinus* após homogeneização.



Fonte: Autor (2033).

Findado o peneiramento, definiu-se as massas de cada fração da composição das amostras.

3.2.2 Massa específica e massa específica aparente do bio-agregado

Para determinação da massa específica e massa específica aparente, seguiu-se a preconização da NBR 16916 (ABNT, 2021).

Inicialmente, o material foi imerso em água durante 24 horas e posteriormente seco (ver Figura 23) até as partículas apresentarem a condição de saturada superfície seca, na qual o material apresentou-se num estado de máxima absorção de água, porém com a superfície das partículas secas.

Figura 23 – a) Saturação do bio-agregado e b) secagem ao ar.



Fonte: Autor (2023).

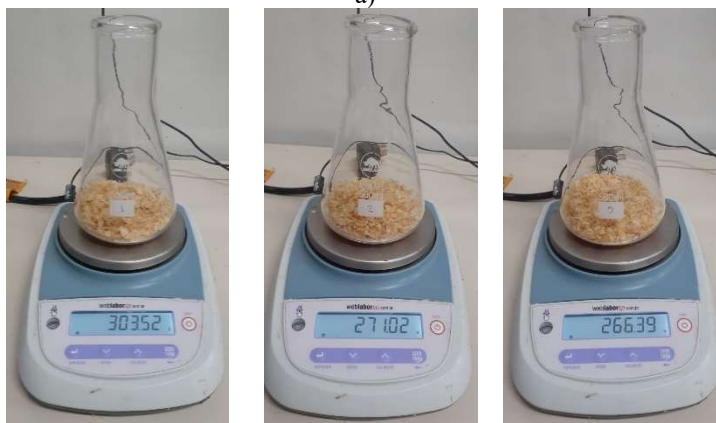
Por se tratar de um material com superfície bastante irregular e com muitos vazios entre eles, o procedimento para verificação da condição saturada superfície seca não pôde ser verificada como prescrito pela NBR 16916 (ABNT, 2021), utilizando o tronco de cone, já que o material saturado e seco apresentam o mesmo comportamento, não havendo desmoronamento. O estado de saturada superfície seca foi então definido pelo toque como recomendado por Andreola (2017).

Posteriormente, pesou-se 3 amostras, com 20 g cada, da serragem saturada superfície seca (Figura 24 a)), que foram colocadas num frasco *Erlenmeyer* de boca larga e a massa dos conjuntos (frasco e serragem) foram aferidas, como visto na Figura 24 b). Em seguida, adicionou-se água aos frascos até a marca de 500 ml e foram colocados em banho em água a temperatura ambiente (Figura 24 c)). Passado uma hora de imersão, adicionou-se água aos frascos afim de manter o volume do conjunto igual a 500 ml e em seguida pesou-se novamente os conjuntos (frasco, serragem e água) como visto na Figura 24 d). Feito isso, as 3 amostras de serragem foram removidas dos frascos e levadas a estufa por 24 horas, pesando-as foi definida a massa seca das amostras (Figura 24 e)).

Figura 24 – Ensaio de massa específica e massa específica aparente. a) Pesagem de 3 amostras saturadas superfície seca, b) Pesagem dos frascos com as amostras de serragem, c) Imersão dos frascos com serragem e água até a marca de 500 ml, d) Pesagem dos frascos com serragem e água e e) Pesagem das amostras após serem secas em estufa.



a)



b)



c)



d)



e)

Fonte: Autor (2023).

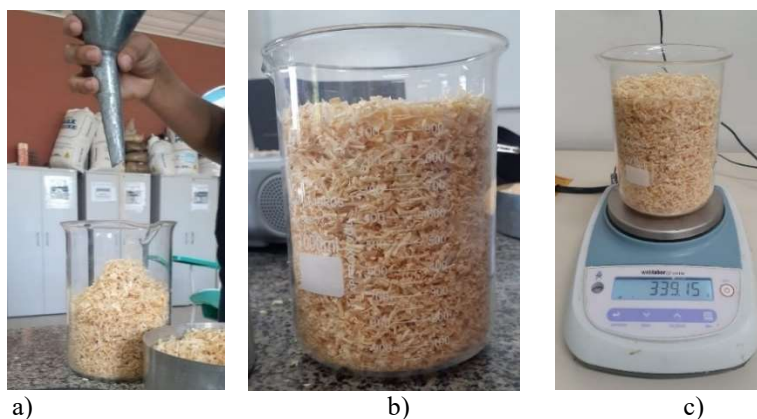
3.2.3 Massa unitária do bio-agregado no estado solto

Para definir a massa unitária do material, procedeu-se adaptando os procedimentos prescritos pela NBR 16972 (ABNT, 2021) para agregados, optando-se por seguir os procedimentos descritos para o “método C” para determinação da massa unitária do material no estado solto.

Nesse ensaio, utilizou-se 3 amostras, onde para cada uma foi calculada a massa unitária, sendo o valor da massa unitária definida para o material o resultado da média das massas unitárias das 3 amostras, visando uma característica mais precisa.

Adaptando as recomendações da norma, a serragem *Pinus* seca em estufa foi colocada em um *becker* até a marcação de 1000 mL, com auxílio de um funil, a fim de que todo o volume do corpo cilíndrico fosse preenchido pelo bio-agregado (Figuras 25 a) e b)). Posteriormente, pesou-se o conjunto *becker* e serragem, como visto na Figura 25 c). O mesmo procedimento foi seguido para as amostras 2 e 3.

Figura 25 – Ensaio de massa unitária. a) e b) Preenchimento do *becker* com o material e c) pesagem.



a)

b)

c)

Fonte: Autor (2023).

3.2.4 Absorção de água do material *in natura*

Assim como para a areia, a determinação da absorção de água da serragem foi definida de acordo com a NBR 16916 (ABNT, 2021), utilizando a Equação (1).

3.3 Programa experimental

3.3.1 Aplicação de tratamentos ao bio-agregado de *Pinus*

Como visto anteriormente, distintos métodos são empregados com êxito no tratamento de resíduos de madeira para reduzir sua incompatibilidade com a matriz cimentícia. Vale ressaltar que a eficiência de um método de tratamento está diretamente relacionada com o tipo da biomassa. No presente trabalho, foram analisados três diferentes tratamentos, a utilização de ciclos de molhagem e secagem, a imersão do material por 1 hora em água aquecida a $80 \pm 5^\circ \text{C}$ e a imersão do material por 1 hora em uma solução de água com concentração de 4% de soda caustica.

3.3.1.1 Tratamento por imersão em água a 80°C durante 1 hora

A escolha da temperatura da água onde o material seria imerso baseou-se no trabalho de Pinto (2019), no qual verificou-se que, após a temperatura de 80°C , considerando um mesmo tempo de imersão, não haveria melhoria significativa na remoção de extrativos da serragem.

Para este tratamento, utilizou-se o equipamento Banho Maria, no qual foi adicionado água em uma proporção volumétrica de 1:1 (água:serragem *Pinus*). Quando a água atingia a temperatura de 80°C , a serragem foi adicionada e mantida em imersão durante 1 hora (Figura 26 a)). A serragem foi submetida a um total de 3 ciclos de imersão e, depois disso, seca ao ar livre (Figura 26 b)).

Figura 26 – Tratamento do bio-agregado por imersão em água a 80° C durante 1 hora. a) Imersão do bio-agregado em água a 80° C e b) Secagem do bio-agregado ao ar após ser submetido a 3 ciclos de imersão.



a)



b)

Fonte: Autor (2023).

Após cada ciclo de imersão, uma amostra da água foi coletada e fotografada, a fim de verificar visualmente se haveria alteração na coloração entre elas (ver Figura 27), sinalizando uma possível remoção de substâncias presentes na superfície do material.

Figura 27 – Amostras da água na qual o bio-agregado foi imerso durante 1 hora. a) Água de imersão no primeiro ciclo, b) Água de imersão no segundo ciclo e c) Água de imersão no terceiro ciclo.



a)



b)



c)

Fonte: Autor (2023).

Como pode ser constatado na Figura 30, houve um gradativo clareamento da água no qual o material esteve imerso por 1 hora, sinalizando uma possível redução na concentração de extrativos e sujeiras superficiais no material.

3.3.1.2 Tratamento por ciclos de molhagem e secagem

Para este tratamento utilizou-se a mesma proporção volumétrica de 1:1 de água e serragem adotada no tratamento descrito no tópico anterior. No presente tratamento, a imersão da serragem foi feita em água à temperatura ambiente durante um período de 3 horas (Figura 28 a)). Passado o tempo de imersão, o bio-agregado foi seco ao ar para remoção do excesso de água (Figura 28 b)) e, depois disso, foi levado à estufa pré-aquecida a 65° C, na qual permaneceu por 20 horas. O processo de imersão e secagem em estufa foi repetido por 3 vezes.

Figura 28 –Tratamento do bio-agregado por ciclos de molhagem e secagem. a) Imersão do bio-agregado em água em temperatura ambiente por 3 horas, b) Secagem do bio-agregado ao ar.



a)

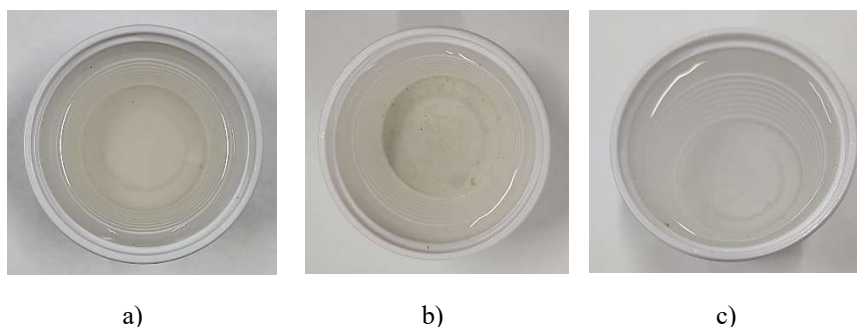


b)

Fonte: Autor (2023).

Na Figura 29, é possível verificar a coloração da água após o tratamento da serragem. Assim como no tratamento de imersão em água aquecida, o clareamento da água é perceptível, sendo neste menos destoante entre os ciclos com variação mais sutil.

Figura 29 – Amostras da água na qual o bio-agregado foi imerso durante 3 horas. a) Água de imersão no primeiro ciclo, b) Água de imersão no segundo ciclo e c) Água de imersão no terceiro ciclo de molhagem secagem.



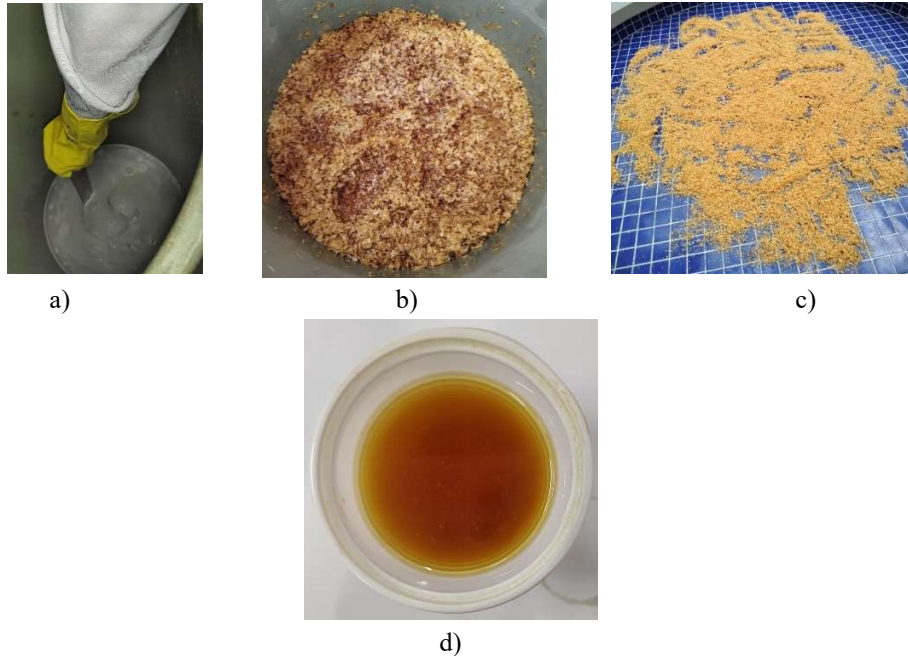
Fonte: Autor (2023).

3.3.1.3 Tratamento por imersão em solução de água e hidróxido de sódio (NaOH)

Como desenvolvido por Cunha (2012), o terceiro tratamento que foi avaliado para remoção de extrativos superficiais e sujeiras no material, consistiu na imersão da serragem durante 1 hora em uma solução de água com concentração de 4% de hidróxido de sódio (NaOH), popularmente conhecida como soda cáustica.

Inicialmente, para facilitar a diluição da soda caustica do tipo escama, adicionou-se os 2 kg de soda caustica a 1/5 da água total que seria utilizada (Figura 30 a)), sendo utilizado no tratamento um volume total de 50 L de água e, diferente dos tratamentos descritos nos tópicos anteriores, a proporção volumétrica entre água e serragem foi de 1:2. Após dissolver toda soda caustica na água, adicionou-se o restante da água e a serragem na sequência (Figura 30 b)). Uma hora depois, iniciou-se a lavagem no material, revolvendo-o de um balde para outro, escorrendo e adicionando água limpa até o material atingir um pH de 11,6. Feito isso, o material foi seco ao ar (Figura 30 c)) e guardado para fases seguintes. A Figura 30 d) traz uma amostra do líquido após a imersão da serragem, apresentando uma coloração marrom alaranjado bastante escura, originada da reação química com as substâncias presentes no bio-agregado e a solução.

Figura 30 – Tratamento do bio-agregado por imersão em solução de água e soda caustica. a) Diluição, b) Serragem imersa em solução, c) Secagem do material ao ar e d) solução pós imersão.



Fonte: Autor (2023).

3.3.2 Dosagem do bio-concreto

Para a dosagem dos materiais e escolha dos traços que seriam utilizados na produção dos bio-blocos, definiu-se inicialmente alguns parâmetros que induziram os procedimentos seguintes:

Adoção de um mesmo fator a/c para o bloco de referência (sem adição de serragem) e os bio-blocos com diferentes tratamentos e percentuais de serragem na composição. Uma característica do bio-agregado é a sua alta capacidade de absorção, sendo ela uma problemática a ser considerada na mistura dos componentes do bio-bloco por atrapalhar a hidratação do cimento. Gloria (2020) calculou e adicionou à mistura a água de compensação, parcela que seria absorvida pela serragem. Neste caso, a água utilizada no traço do seu bio-concreto era composta pela água de hidratação do cimento e pela água de compensação. No presente trabalho, considerando que para a produção dos blocos é necessário um desmolde imediato e, por isso, optou-se por trabalhar com uma argamassa seca, a serragem seria adicionada no seu estado saturado, dispensando assim a necessidade de adição de água de compensação à mistura;

A definição dos percentuais de substituição da massa de areia por serragem. Como definiu-se trabalhar com um mesmo fator a/c para os diferentes traços, o volume total da mistura tornou-se um fator determinante na qualidade da argamassa, já que, quanto maior a superfície de contato, maior a necessidade de água. Com a caracterização dos materiais, constatou-se que a areia que seria utilizada possuía uma massa específica de $2,56 \text{ g/cm}^3$, quase três vezes a massa específica calculada para a serragem que foi de $0,90 \text{ g/cm}^3$, ou seja, mesmo pequenas substituições em massa de areia por serragem corresponderiam a uma grande substituição em volume de material. Diante disso, adotou-se dois percentuais de substituição por tratamento, sendo eles 0,5% e 2% em massa de areia.

A base dos blocos foi de argamassa com areia média previamente peneirada na peneira de abertura de 9,5 mm. O uso da areia com um diâmetro máximo de 9,5 mm foi adotado por uma questão de economia dos materiais componentes, evitando assim o desperdício, reduzindo o consumo de cimento.

O processo de dosagem da argamassa que seria empregada na produção dos blocos foi iniciado com o referencial (sem serragem), tendo sido adotado o traço 1:4 (proporção entre a massa de cimento e de agregado), proporção intermediária às utilizadas por Garcez *et al* (2018) e Mozer *et al* (2019), que adotaram em seus trabalhos os traços de 1:3 e 1:6 respectivamente.

A definição do fator a/c deu-se de forma empírica após a realização de testes com fatores a/c de 0,4, 0,45, 0,6 e 0,75, com os quais constatou-se que a argamassa que apresentou uma textura ótima, trabalhável e coesa, foi a preparada com fator a/c de 0,6. Feito isso, definiu-se o traço referencial, 1:4:0,6 (cimento: areia: a/c).

Tendo o traço referencial, foi verificado se ele atenderia aos blocos com adição de serragem. Para esta verificação, utilizou-se a pior hipótese, a maior substituição de areia por serragem de *Pinus* (2% em massa), por apresentar um maior volume. Este processo pode ser visualizado na Figura 31.

Figura 31 –Estudo do traço do bio-bloco com substituição de 2% de areia por serragem. a) Separação dos materiais, b) Mistura da areia com cimento e c) Adição da serragem saturada, d) Adição de água, e) Homogeneização dos componentes, f) Verificação tátil da consistência da mistura, g) Preenchimento da forma com compactação manual em camadas e h) desforma do bio-bloco.



Fonte: Autor (2023).

Primeiramente separou-se os materiais, como visto na Figura 34 a), em seguida misturou-se a areia, cimento e serragem saturada superfície úmida (Figuras 34 b) e c)) e a água foi adicionada à mistura e homogeneizada (Figuras 34 d) e e)). A textura da mistura apresentou boa coesão com o fator a/c de 0,6, como vislumbrado na Figura 34 f). Após isso, a argamassa foi colocada em camadas no molde, sendo devidamente adensada com auxílio de uma haste metálica (ver Figura 34 g)) e desenformada em seguida, apresentando boa aparência (ver Figura 34 h)). A serragem utilizada no teste de traço foi tratada previamente por ciclos de molhagem e secagem e a massa adicionada à mistura foi pesada antes de ser saturada, apresentando neste momento uma umidade de 0,5%.

Uma ressalva acerca do estado da umidade da serragem na hora da mistura deve ser feita. Em uma tentativa anterior, tentou-se trabalhar com a serragem no estado saturada superfície seca, não se obtendo êxito. A argamassa ficou muito seca e sem coesão, sinalizando

que mesmo saturada a serragem “roubava” água da hidratação do cimento. Testou-se utilizar 2% de plastificante em relação a massa de cimento (como indicado pelo fabricante), para corrigir e melhorar a trabalhabilidade do material, sem adicionar mais água à mistura. Entretanto, a argamassa, apesar de mais trabalhável, não apresentava a coesão necessária para o processo de produção de blocos, que consiste na forma e desforma imediata dos mesmos. A solução encontrada foi utilizar a serragem saturada com a superfície úmida com uma umidade de 308,16%.

Para o cálculo do consumo de materiais a partir do traço definido anteriormente, sendo 1:4:0,6 o traço referencial (sem adição de serragem), 1:3,92:0,08:0,6 (cimento, areia, serragem e fator a/c) o traço referente a substituição de 2% da massa de areia por serragem e 1:3,98:0,02:0,6 para a substituição de 0,5%, utilizou-se a expressão (2), que relaciona o traço utilizado e as massas específicas de seus componentes para definir o consumo de cimento (C_c) para produção de 1 m³ de concreto.

$$C_c = \frac{1}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{s}{\gamma_s} + \frac{q}{\gamma_q} + \frac{a/c}{\gamma_a}} \quad (2)$$

A equação (3) foi utilizada para definir o consumo de areia (C_q) e, de forma similar, a expressão (4) para definir o consumo de serragem (C_s) necessária para compor 1 m³ de concreto e, por fim, a equação (5) foi empregada para calcular o consumo de água (C_a).

$$C_q = C_c \times q \quad (3)$$

$$C_s = C_c \times s \quad (4)$$

$$C_a = C_c \times a/c \quad (5)$$

Sendo q o traço de areia, s o traço de serragem, a/c o fator água cimento, γ_c a massa específica do cimento, γ_s a massa específica da serragem, γ_q a massa específica da areia e γ_a a massa específica da água.

Ao final do estudo de dosagem, com as massas calculadas para 1 m³ de concreto, multiplicou-se a massa de todos os insumos pelo volume da forma que seria utilizada na

produção dos blocos, chegando-se aos traços em massa que podem ser vistos na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 – Insumos para produção de 1 bloco.

Adição de serragem (%)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Serragem (kg)	CaCl ₂ (kg)	Água (L)
0	2,261	9,043	0	0	1,356
0,5	2,248	8,946	0,045	0,022	1,349
2	2,210	8,662	0,177	0,022	1,326

Fonte: Autor (2023).

A adição de 1% de CaCl₂ em relação a massa de cimento foi utilizada para melhorar a pega do cimento.

3.3.3 Produção dos bio-blocos

Com base nas análises físico-mecânicas às quais os blocos deveriam ser submetidos, estimou-se uma produção de 10 blocos por traço, sendo 6 blocos destinados ao ensaio de resistência a compressão e os 4 restantes seriam submetidos à ensaios de absorção e de condutividade térmica. Ao todo foram produzidos 72 blocos como simplificado na Tabela 10 a seguir.

Tabela 10 – Produção de blocos.

Traço	Descrição	Percentual de substituição da massa de areia por serragem (%)	Quantidade de blocos
0	Referencial	0	10
1	Adição de serragem tratada por imersão em solução com soda cáustica	0,5	10
2	Adição de serragem tratada por imersão em solução com soda cáustica	2	11
3	Adição de serragem tratada por ciclos de molhagem e secagem	0,5	9
4	Adição de serragem tratada por ciclos de molhagem e secagem	2	11
5	Adição de serragem tratada por ciclos de cozimento em água a 80°C	0,5	10
6	Adição de serragem tratada por ciclos de cozimento em água a 80°C	2	11

Fonte: Autor (2023).

Para todos os traços, o processo de produção dos blocos tinha início com a separação dos materiais, como visto na Figura 32.

Figura 32 – Separação dos materiais para produção dos bio-blocos com substituição de 2% da massa de areia por serragem tratada com ciclos de cozimento em água a 80°C.



Fonte: Autor (2023).

Em seguida foi executada a mistura da areia e do cimento em uma betoneira Motomil® (ver Figura 33 a)), até atingir a homogeneidade entre os grãos. Em seguida, a serragem saturada superfície úmida foi adicionada como visto na Figura 33 b).

Figura 33 – Mistura da areia, cimento e serragem no preparo do traço 6. a) Mistura do cimento e areia até homogeneização e b) Adição da serragem.



a)



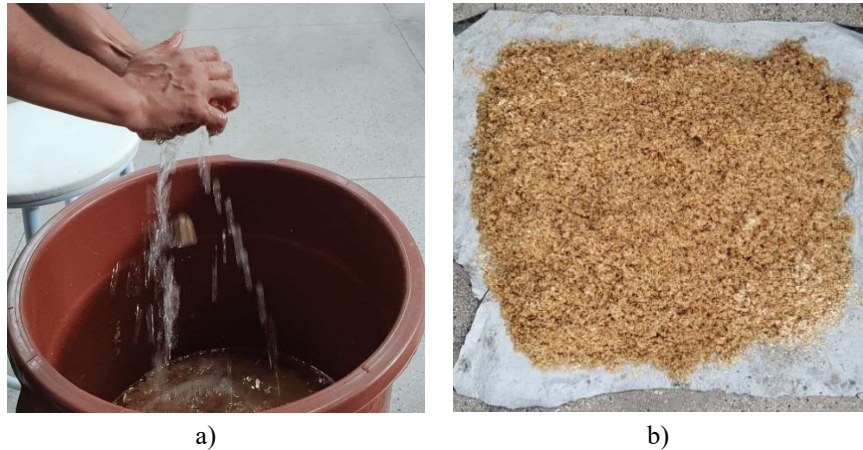
b)

Fonte: Autor (2023).

Para o preparo da serragem adicionada, foi feita a saturação por imersão em água durante 24 horas, remoção do excesso de água manualmente e deposição do material sobre uma

lona, exposta a correntes de ar durante 4 horas, antes do início do preparo, para que o excesso de água da superfície fosse removido, o processo pode ser visto na Figura 34.

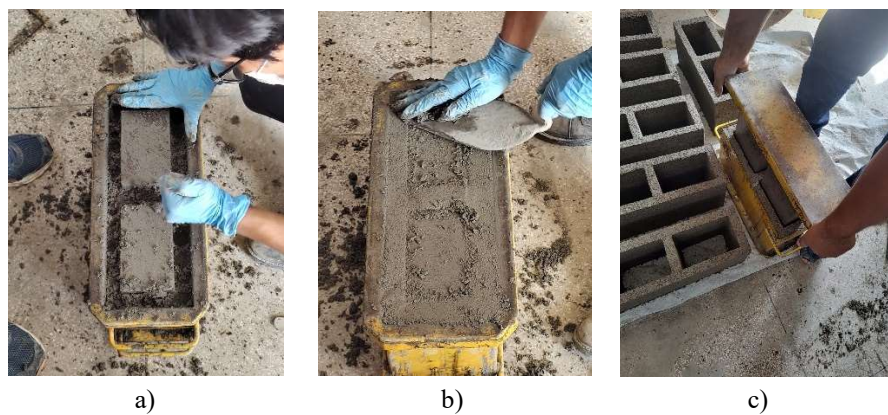
Figura 34 –Preparo da serragem para utilização no bio-bloco. a) remoção do excesso de água da serragem após saturação de 24 horas e b) secagem do excesso de água.



Fonte: Autor (2023).

Após misturar bem a areia, o cimento e a serragem, adicionou-se à betoneira a água e o CaCl_2 dissolvido em parte da água da mistura, batendo tudo até obter uma mistura homogênea. Em seguida foi feita a moldagem dos blocos como visto na Figura 35.

Figura 35 – Moldagem dos blocos. a) Preenchimento da forma, b) Nivelamento e c) Desforma.



Fonte: Autor (2023).

O preenchimento da forma deu-se por camadas (3 camadas) que iam sendo compactadas manualmente com auxílio de uma haste metálica (ver Figura 35 a)), depois disso a forma era nivelada como visto na Figura 35 b) e o bloco desenhado (ver Figura 35 c)).

Apesar dos traços terem sido definidos para produção de 10 unidades de cada, na moldagem do traço 3 (bio-blocos com adição de 0,5% de serragem tratada por ciclos de

molhagem e secagem) parte do material grudou nas paredes da betoneira e apenas 9 blocos foram moldados. Na produção dos traços com adição de 2% de serragem obteve-se uma produção de 11 blocos de cada traço. Os blocos produzidos podem ser vistos na Figura a seguir.

Figura 36 – Blocos produzidos.



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 36 é possível visualizar os blocos organizados após o terceiro dia da produção do último traço, tendo sido toda a produção realizada em 4 dias consecutivos. Após 24 horas de suas respectivas moldagens, os blocos foram submetidos a cura por molhagem durante 7 dias.

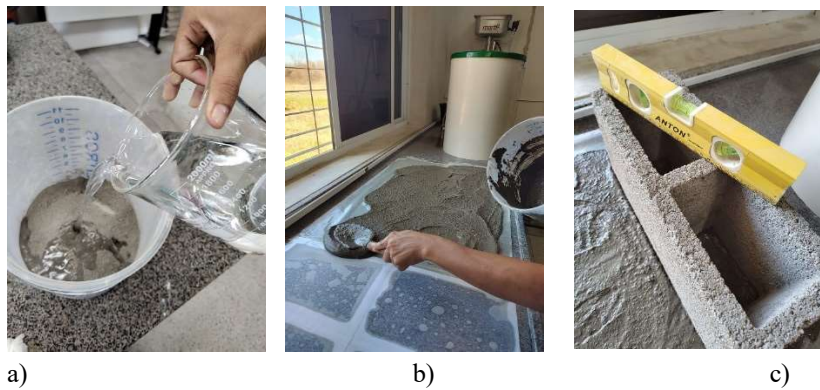
3.3.4 Avaliação físico-mecânica dos bio-blocos

Para a análise de viabilidade do emprego da serragem de madeira *Pinus* com bio-agregado na produção de blocos de cimento sem função estrutural e a identificação de quais seriam as implicações que tal substituição parcial da areia trariam para os compósitos, os 7 traços produzidos, incluindo o traço referência, foram submetidos a avaliações quanto a sua absorção de água, resistência a compressão e condutividade térmica. Os limites mínimos aceitáveis para absorção e resistência dos blocos são definidos pela NBR 6136 (ABNT, 2016) e os métodos de ensaio para sua verificação são descritos pela NBR 12118 (ABNT, 2013).

3.3.4.1 Ensaio de resistência à compressão

Os procedimentos para caracterização dos blocos quanto a sua resistência à compressão foram seguidos em conformidade com a NBR 12118 (ABNT, 2013). Após um período entre 23 e 26 dias após suas moldagens, 6 blocos por traço tiveram suas faces (superior e inferior) regularizadas com uma fina camada (inferior a 3 mm) de pasta de cimento reaproveitado (cimento submetido à peneiramento na peneira de abertura 600 μm devido à presença de sólidos). O processo pode ser visto na Figura 37.

Figura 37 – Capeamento dos blocos. a) Preparo da pasta de cimento, b) Espalhamento da pasta na bancada e c) Posicionamento e nivelamento do bloco sobre a pasta.



Fonte: Autor (2023).

Após separar e identificar 6 amostras de blocos por traço, preparou-se a pasta de cimento, como visto na Figura 37 a). Depois disso a pasta foi colocada sobre uma bancada plana previamente forrada com uma folha de papel manteiga untado com óleo (Figura 37 b)). Em seguida, os corpos de prova foram comprimidos sobre a pasta de cimento e nivelados com auxílio de um nível de bolha, como pode ser vislumbrado na Figura 37 c), a fim de obter uma fina camada com espessura inferior a 3 mm, como prescrito pela norma referência, para que todo o carregamento seja uniformemente transferido ao bloco durante o ensaio. No dia seguinte, a face superior foi também capeada, obtendo-se blocos com ambas as faces niveladas, como visto na Figura 38 abaixo. Passadas 24 horas do capeamento da última face, as amostras foram rompidas.

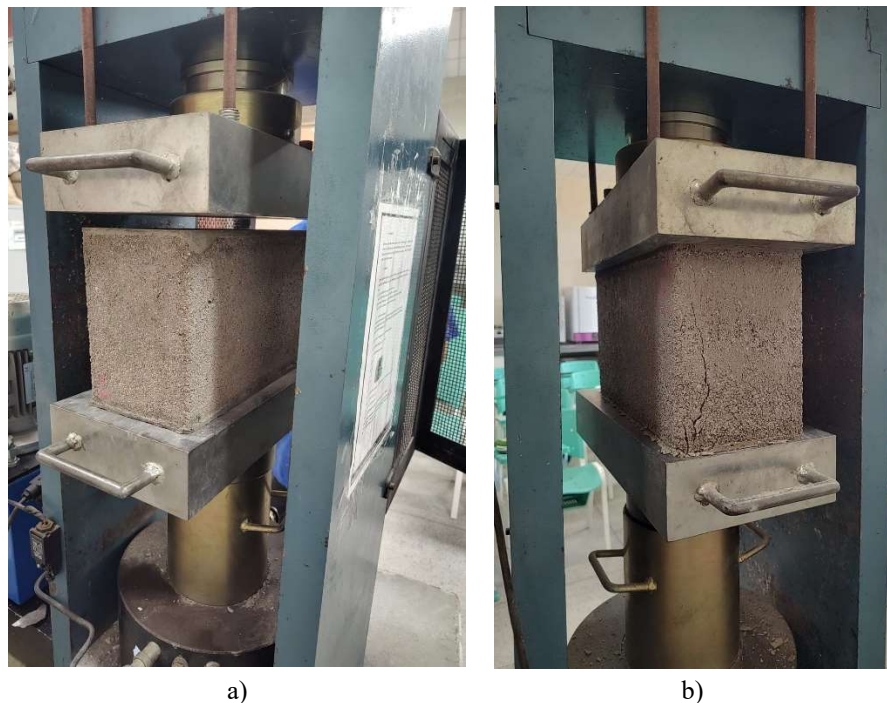
Figura 38 – Bloco capeado.



Fonte: Autor (2023).

Para o ensaio, utilizou-se uma prensa hidráulica elétrica da marca Fortest® com capacidade de 200 toneladas, onde determinou-se a resistência dos 42 blocos que compunham a amostragem referente a 7 traços distintos, pela aplicação de cargas de compressão axial aplicadas na direção paralela ao eixo dos furos dos blocos, até atingirem a ruptura. O processo pode ser visto na Figura 39.

Figura 39 – Ensaio de compressão axial. a) Posicionamento do bloco na prensa e b) Bloco rompido.



Fonte: Autor (2023).

Os blocos foram posicionados entre duas placas de aço (ver Figura 39 a)), para que o carregamento aplicado fosse distribuído sobre toda a face do bloco e não apenas no eixo de

aplicação da carga. A aplicação do carregamento se seguiu até a ruptura dos blocos (ver Figura 39 b)).

Segundo a NBR 6136 (ABNT, 2016) a determinação da resistência característica de uma amostragem é expressa matematicamente pela seguinte fórmula:

$$f_{bk,est} = 2 \left[\frac{f_{b(1)} + f_{b(2)} + \dots + f_{b(i-1)}}{i - 1} \right] - f_{bi} \quad (6)$$

Sendo i igual ao número de amostras dividido por dois ($i=3$); $f_{bk,est}$ a resistência característica estimada da amostra, dada em megapascals (MPa), e $f_{b(1)}, f_{b(2)}, \dots, f_{bi}$ são as resistências à compressão individuais das amostras em ordem crescente.

Quando há uma grande variabilidade entre os resultados individuais ($f_{b(1)}, f_{b(2)}, \dots, f_{bi}$) que inviabilizam a aplicação da expressão 6, pode-se aplicar métodos de normalização, como por exemplo o Z-Score e a determinação de um intervalo de confiança.

O Z-Score, descrito matematicamente pela razão entre a diferença do valor a ser normalizado e a média e o desvio padrão da amostragem (expressão 7), nos sinaliza qual o grau de dispersão do valor a ser normalizado em números de desvio padrão, ou seja, a quantos desvios padrão um determinado valor se encontra da média. Valores negativos para pontuação Z-Score estão abaixo da média e os maiores que 0 estão acima da média.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (7)$$

Sendo z a pontuação Z-Score, x o valor a ser normalizado, μ a média e σ o desvio padrão.

O intervalo de confiança, por sua vez, delimita uma faixa de valores com um percentual de precisão de conter o valor médio verdadeiro. Para isso, por meio das expressões 8 e 9, define-se os limites inferior e superior do intervalo respectivamente. Para sua aplicação deve-se definir o nível de confiança com o qual pretende-se trabalhar que terá um Z-Score pré-determinado, por exemplo, adotando um nível de confiança de 95%, o valor correspondente para o z é de 1,96, sendo comumente utilizados os níveis de confiança de 90%, 95% e 99%.

$$Limite inferior = \mu - z \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

$$\text{Limite superior} = \mu + z \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

Nas expressões acima, n é igual ao número de dados da amostra que, no caso presente, é 6 unidades.

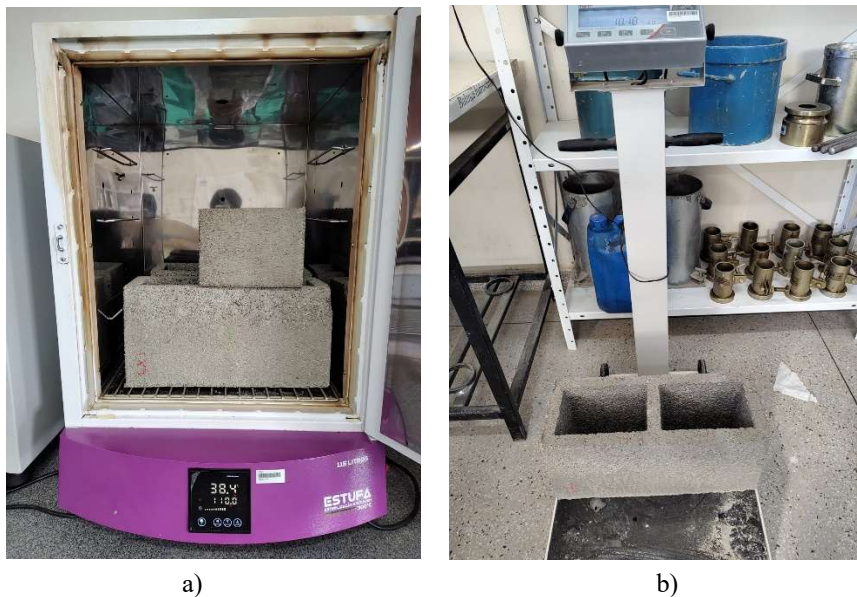
Com os valores normalizados pode-se então determinar a resistência média.

3.3.4.2 Ensaio de absorção de água

A execução do ensaio para determinação da absorção de água dos blocos, que devem atender a NBR 6136 (ABNT, 2016) são prescritos pela NBR 12118 (ABNT, 2013). Foram ensaiados 3 blocos por traço como, definido pela NBR 6136 (ABNT, 2016), totalizando uma amostragem de 21 blocos.

O processo de ensaio teve início com a secagem dos blocos em estufa a uma temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ durante um período de 24 horas, como visto na Figura 40 a) e aferição de suas massas na sequência, como vislumbrado na Figura 40 b).

Figura 40 – Secagem dos blocos para determinação da absorção de água. a) Secagem e b) Pesagem das amostras.

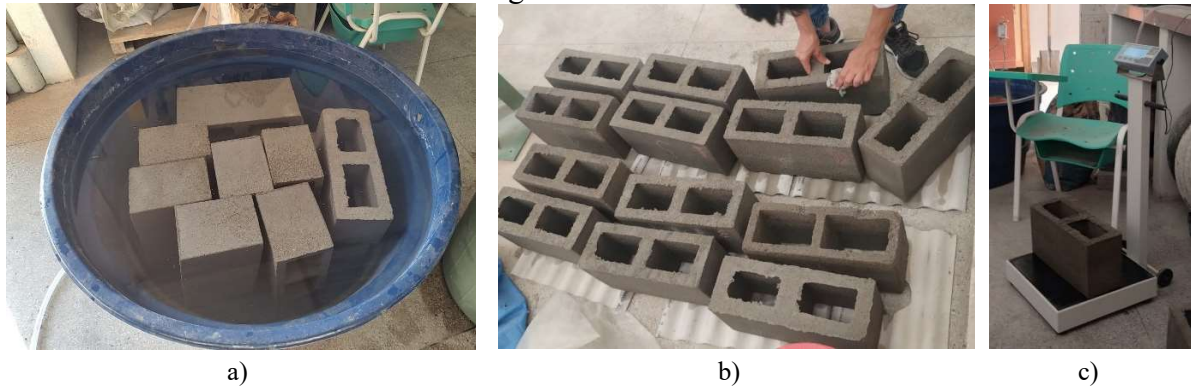


Fonte: Autor (2023).

Passados um período de 72 horas dos blocos da estufa, eles foram retirados e foi iniciado o processo de saturação, no qual os blocos foram mantidos em imersão durante um

período de 24 horas em água a temperatura ambiente, como visto na Figura 41 a). Após as 24 horas de imersão os blocos foram retirados da água e posicionados para drenagem da água superficial (Figura 41 b)) e a realização da remoção da água visível com auxílio de um pano úmido (Figura 41 b)) para obtenção da condição saturado superfície seca dos blocos. Feito isso, as massas dos blocos foram aferidas como visto na Figura 41 c).

Figura 41 – Ensaio de absorção de água. a) Saturação, b) Remoção do excesso de água e c) Pesagem das amostras.



Fonte: Autor (2023).

3.3.4.3 Condutividade térmica

Para avaliar a eficiência dos blocos quanto ao isolamento térmico, adotou-se metodologia similar a seguida por Romão (2020), construindo prismas de 3 blocos com os traços a serem analisados, incluindo o traço referencial, e analisando a transferência de calor pelas paredes, pela exposição a uma fonte de calor constante (soprador térmico da marca Worker® modelo STW 2000) em uma das faces da parede e medição da temperatura na face oposto à aplicação de calor, a cada minuto, por um período de 20 minutos, com auxílio de uma câmera térmica da Testo® modelo testo 868. O esquema do ensaio para aferições pode ser visto na Figura 42.

Afim de analisar o fluxo de calor através de cada parede, foram coletadas as temperaturas na face de aplicação do jato de calor nos tempos 0, 5, 10, 15 e 20 minutos também com a câmera térmica.

Figura 42 – Aferição da temperatura das paredes com câmera térmica.



Fonte: Autor (2023).

Para a execução da coleta das temperaturas como visto na Figura 42, o soprador foi posicionado para que o bico de lançamento do jato ficasse a uma distância de 30 cm do prisma, apontado para seu centro, e a aferição da temperatura no centro oposto do prisma coletado a uma distância de aproximadamente 15 cm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados advindos da caracterização dos insumos, estudos e análises dos blocos quanto a sua resistência a compressão, absorção de água e condutividade térmica, assim como as discussões sobre a conformidade dos mesmos às normativas de referência citadas no presente trabalho.

4.1 Caracterização dos insumos

A seguir estão dispostos os resultados dos ensaios de caracterização dos insumos que foram utilizados para produção dos blocos.

4.1.1 Cimento

Na caracterização do cimento Portland CP V ARI foi realizado o ensaio de massa específica, para o qual obteve-se um valor médio de 3,01 g/cm³.

4.1.2 Areia

Para a areia utilizada, a qual analisou-se sua granulometria, massa unitária, massa específica e massa específica aparente e absorção de água, os resultados dos ensaios podem ser vistos a seguir.

4.1.2.1 Granulometria

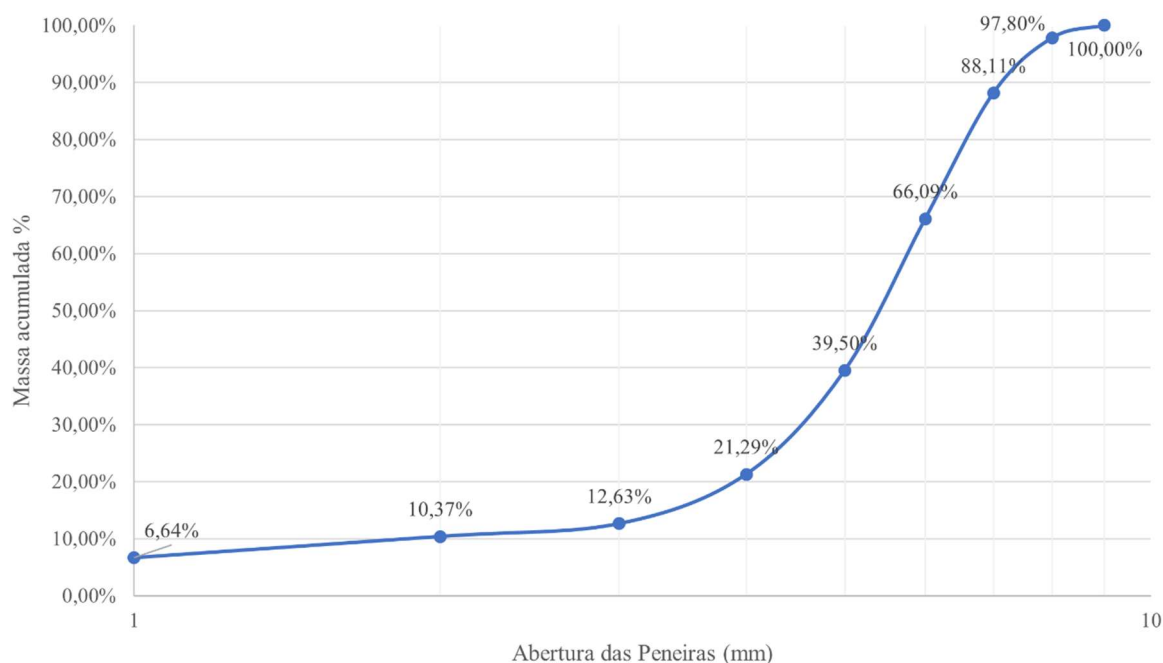
Os resultados das aferições das massas retidas em cada peneira para as amostras A e B podem ser vistas nas colunas 2 e 3 da Tabela 11 respectivamente. Cruzando os dados da média acumulada por peneiras plotou-se o gráfico 3.

Tabela 11 – Composição granulométrica da areia.

Abertura das peneiras	Amostra A (g)	Amostra B (g)	Amostra A (%)	Amostra B (%)	Variação (%)	Média (%)	Média Acumulada (%)
9,5 mm	26,77	13,06	8,93%	4,35%	4,58%	6,64%	6,64%
6,3 mm	8,79	13,56	2,93%	4,52%	1,59%	3,73%	10,37%
4,8 mm	7,95	5,59	2,65%	1,86%	0,79%	2,26%	12,63%
2,4 mm	28,32	23,61	9,45%	7,87%	1,58%	8,66%	21,29%
1,2 mm	59,72	49,49	19,92%	16,50%	3,42%	18,21%	39,50%
600 µm	76,49	82,99	25,52%	27,67%	2,15%	26,59%	66,09%
300 µm	58,78	73,30	19,61%	24,44%	4,83%	22,02%	88,11%
150 µm	26,22	31,88	8,75%	10,63%	1,88%	9,69%	97,80%
Fundo	6,73	6,48	2,25%	2,16%	0,08%	2,20%	100,00%

Fonte: Autor (2023).

Gráfico 3 – Curva granulométrica acumulada da areia.



Fonte: Autor (2023).

O módulo de finura calculado para o material foi de 2,21, estando este valor dentro do limite definido pela NBR 7211 (ABNT, 2022) para a zona ótima e a dimensão máxima característica foi de 9,5 mm. Vale destacar que o ensaio foi feito com material *in natura* antes do peneiramento para utilização nos blocos.

4.1.2.2 Massa unitária

Com os resultados das aferições do ensaio, e seguindo os procedimentos de cálculo da norma referência, obteve-se a massa unitária de 1,51 g/cm³ para a areia.

4.1.2.3 Massa específica e massa específica aparente

Seguindo os procedimentos de cálculo prescritos pela NBR 16916 (ABNT, 2021) com os dados das aferições, obteve-se os resultados vistos na Tabela 12, sendo os valores médios para massas específica e específica aparente da areia $2,56 \text{ g/cm}^3$ e $2,53 \text{ g/cm}^3$ respectivamente, caracterizando-a como uma areia média.

Tabela 12 – Massa específica e massa específica aparente da areia.

Amostra	Massa específica (g/cm^3)	Massa específica aparente da areia saturada superfície seca (g/cm^3)
1	2,57	2,54
2	2,56	2,53
Média	2,56	2,53

Fonte: Autor (2023).

4.1.2.4 Absorção de água

Aplicando a expressão 1, de acordo com a NBR 16916 (ABNT, 2021), obteve-se os valores expostos na Tabela 13, na qual é possível verificar a absorção de cada amostra e o valor médio de 0,72%.

Tabela 13 – Absorção de água da areia.

Amostra	Absorção %
1	0,73
2	0,71
Média	0,72

Fonte: Autor (2023).

4.1.3 Serragem

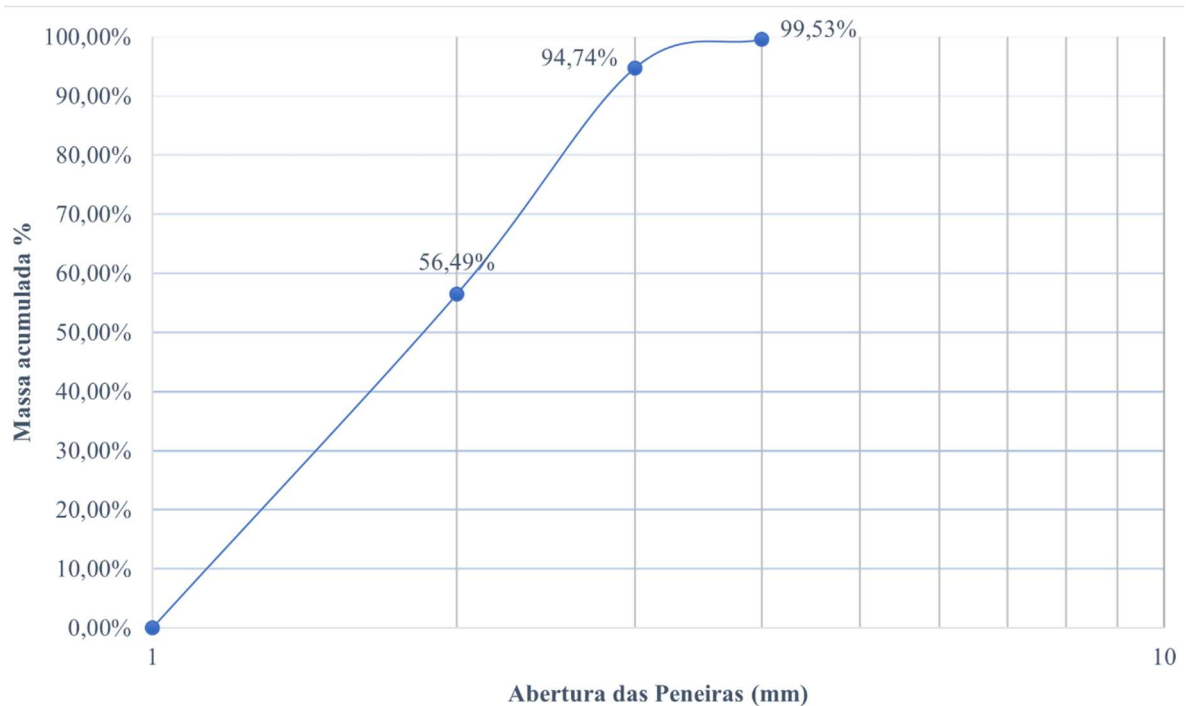
4.1.3.1 Granulometria

A Tabela 14 traz os resultados do ensaio de granulométrica da biomassa de madeira *Pinus* que possibilitou a plotagem do Gráfico 4. Neste ensaio, utilizou-se as peneiras de abertura de malha indicadas na coluna 1 da Tabela 14, e os valores retidos em ambas as amostras, assim como a variação entre a massa retida entre as amostras, a média entre elas e o percentual acumulado da média retida podem ser vistos nas colunas da sequência.

Tabela 14 – Composição granulométrica da serragem.

Abertura das peneiras (mm)	Amostra A (g)	Amostra B (g)	Amostra A (%)	Amostra B (%)	Variação (%)	Média (%)	Média Acumulada (%)
4,8	0,02	0,04	0,02	0,04	0,02	0,03	0,03
2,4	57,16	55,81	57,18	55,85	1,33	56,52	56,55
1,2	37,66	38,84	37,66	38,84	1,18	38,25	94,77
Fundo	4,85	4,74	4,85	4,74	0,11	4,8	99,56

Fonte: Autor (2023).

Gráfico 4 – Curva granulométrica acumulada da serragem de *Pinus*.

Fonte: Autor (2023).

Pode-se dizer que a dimensão máxima característica do material é de 4,8 mm e o módulo de finura não pode ser definido dada a limitação de peneiras utilizadas, com aberturas entre 1,2 mm e 4,8 mm, configurando o material como mal graduado.

4.1.3.2 Massa unitária

A massa unitária, resultante da massa da serragem seca que ocupa o recipiente, dividida pelo volume do recipiente, pode ser constatada na Tabela 15.

Tabela 15 – Massa unitária da serragem.

Amostra	Massa unitária do material solto (g/cm ³)
1	0,05
2	0,06
3	0,06
Média	0,06

Fonte: Autor (2023).

4.1.3.3 Massa específica e massa específica aparente

Com os resultados das aferições do ensaio e seguindo os procedimentos descritos pela NBR 16916 (ABNT, 2021), determinou-se as massas específica e específica aparente da serragem *Pinus in natura* peneirada, os valores médios encontrados foram 0,90 g/cm³ e 0,96 g/cm³ respectivamente (ver Tabela 16).

Tabela 16 – Massa específica e massa específica aparente da serragem.

Amostra	Massa específica (g/cm ³)	Massa específica aparente do bio-agregado saturado superfície seca (g/cm ³)
1	0,77	0,91
2	0,93	0,97
3	1,00	1,00
Média	0,90	0,96

Fonte: Autor (2023).

4.1.3.4 Absorção de água

Aplicando a expressão 1 e utilizando alguns dos dados do ensaio de massa específica e massa específica aparente, obteve-se uma absorção média de 199% da serragem peneirada sem tratamento prévio, sinalizando uma alta capacidade de absorção de água do material.

Tabela 17 – Absorção de água do bio-agregado.

Amostra	Absorção %
1	199
2	202
3	197
Média	199

Fonte: Autor (2023).

Sabendo que em 24 horas de imersão a serragem atinge quase 200% de absorção, analisou-se quais os teores de umidade absorvidos num período de 1, 2, 3, e 4 horas de imersão.

Observou-se que em uma hora o teor de absorção foi de 175% e a partir de 2 horas os valores foram superiores a 190%, evidenciando que o material não só tem uma elevada capacidade de absorção, mas que o processo é também muito rápido.

A umidade *in natura* calculada do material após peneiramento e homogeneização foi de 11%, o que deixa claro o seu alto potencial de absorção de água, vale destacar que tal característica está diretamente ligada a temperatura do dia da aferição e armazenamento do material.

4.2 Resistência a compressão axial

O ensaio de resistência foi realizado passados 28 dias da moldagem dos blocos, obtendo os resultados individuais de carregamento de ruptura em toneladas registrados na coluna 4 da Tabela 18 e suas respectivas resistências na coluna 5.

As resistências de cada bloco foram calculadas dividindo a força aplicada sobre os blocos, produto do carregamento pela aceleração da gravidade, adotada como $9,8066 \text{ m/s}^2$, pela área bruta dos blocos, definida pela NBR 6136 (ABNT, 2016) como a área da seção perpendicular ao eixo dos furos dos blocos sem desconsiderar a área dos furos.

Analizando os valores de resistência de cada traço percebe-se que houve uma grande variabilidade nos resultados, o que dificulta a determinação da resistência característica de cada traço como prescrito pela NBR 6136 (ABNT, 2016), pela qual a resistência característica à compressão dos blocos seria dada pela expressão 6.

Se aplicarmos à expressão 6 os dados do traço referencial onde $f_{b(1)} = 2,13 \text{ MPa}$, $f_{b(2)} = 2,41 \text{ MPa}$ e $f_{bi} = 4,56 \text{ MPa}$ obteremos uma resistência característica estimada de $-0,02 \text{ MPa}$, valor claramente incoerente resultante da grande variabilidade entre os resultados individuais da amostragem; a NBR 6136 (ABNT, 2016) delimita ainda que não deve ser tomado valores para $f_{bk,est}$ menores que $\Psi f_{b(1)}$, sendo $\Psi = 0,89$, para uma amostragem com 6 flocos. Logo, a resistência característica para o traço analisado não poderia ser inferior a $1,8957 \text{ MPa}$. Por isso fez-se necessário a realização de uma normalização dos resultados individuais para homogeneização dos dados.

Tabela 18 – Resistência individual dos blocos.

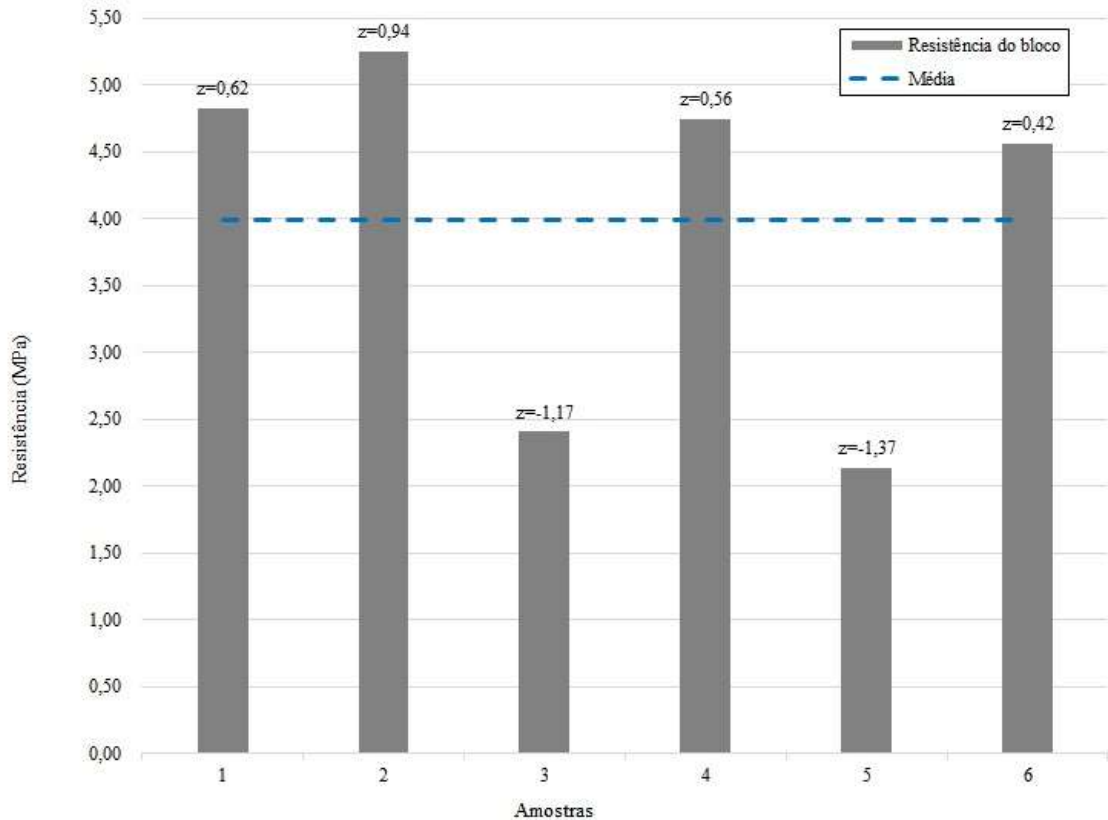
Traço	Descrição	Nº Ref.	Resistência em toneladas	Resistência do bloco em MPa
0	Referencial	1	28,76	4,82
		2	31,32	5,25
		3	14,35	2,41
		4	28,31	4,75
		5	12,72	2,13
		6	27,18	4,56
1	Bio-bloco com adição de 0,5% de serragem tratada por imersão em solução com soda cáustica	1	29,89	5,01
		2	32,01	5,37
		3	39,18	6,57
		4	30,29	5,08
		5	18,86	3,16
		6	31,29	5,25
2	Bio-bloco com adição de 2% de serragem tratada por imersão em solução com soda cáustica	1	9,36	1,57
		2	14,45	2,42
		3	18,21	3,05
		4	10,28	1,72
		5	14,61	2,45
		6	9,57	1,60
3	Bio-bloco com adição de 0,5% de serragem tratada por ciclos de molhagem e secagem	1	21,25	3,56
		2	28,25	4,74
		3	20,00	3,35
		4	36,4	6,10
		5	25,85	4,33
		6	29,65	4,97
4	Bio-bloco com adição de 2% de serragem tratada por ciclos de molhagem e secagem	1	16,50	2,77
		2	15,08	2,53
		3	17,61	2,95
		4	12,41	2,08
		5	15,38	2,58
		6	15,68	2,63
5	Bio-bloco com adição de 0,5% de serragem tratada por ciclos de cozimento em água a 80°C	1	26,72	4,48
		2	18,71	3,14
		3	25,94	4,35
		4	14,52	2,43
		5	20,57	3,45
		6	25,19	4,22
6	Bio-bloco com adição de 2% de serragem tratada por ciclos de cozimento em água a 80°C	1	13,24	2,22
		2	18,54	3,11
		3	13,56	2,27
		4	16,33	2,74
		5	19,36	3,25
		6	10,30	1,73

Fonte: Autor (2023).

A aplicação do Z-Score para definição da resistência média (coluna 5 da Tabela 19), para cada traço, ocorreu excluindo dos traços as duas amostras que apresentaram maior pontuação Z-Score em módulo, ou seja, aqueles valores que mais se desviaram do valor médio, para mais ou para menos, utilizando a expressão 7 para seu cálculo. No Gráfico 5 pode-se vislumbrar a aplicação da pontuação Z-Score para identificação das amostras que apresentaram

maior desvio da resistência média do traço 0 (referencial). O mesmo processo foi aplicado nos outros traços analisados.

Gráfico 5 –Aplicação do critério Z-score nos blocos do traço 0.

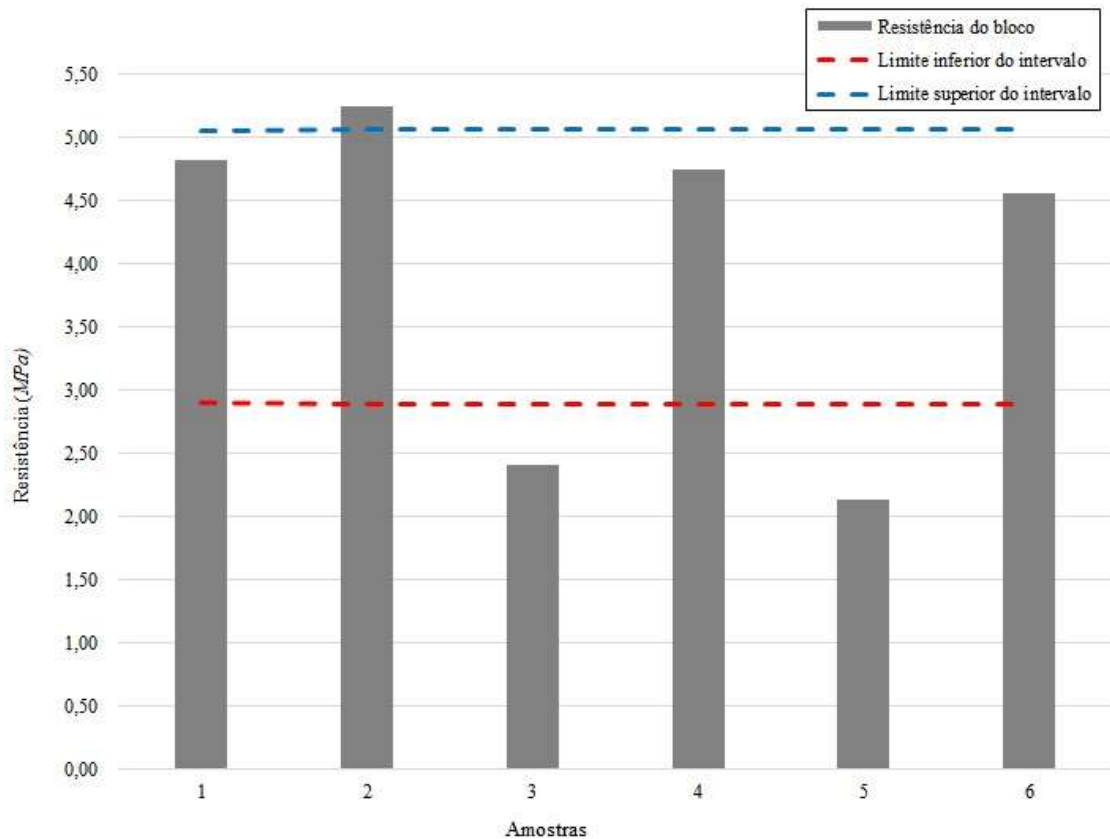


Fonte: Autor (2023).

O Gráfico 5 traz as resistências individuais apresentadas pelas amostras do traço referencial. Sendo a linha tracejada em azul a resistência média dos blocos (3,99 MPa). É possível identificar que as amostras 3 e 5 apresentaram um maior desvio do valor médio.

Aplicando também a normalização pelo intervalo de confiança, calculou-se os limites inferior e superior para cada traço, cujos resultados estão expostos nas colunas 6 e 7 da Tabela 19, utilizando as expressões 8 e 9, respectivamente. Foi calculada a média das resistências contidas dentro do intervalo delimitado. O valor médio de resistência de cada traço poder ser visualizado na coluna 8 da Tabela 19. O Gráfico 6 permite a visualização da aplicação do intervalo de confiança, tomando por exemplo as amostras do traço referencial.

Gráfico 6 –Aplicação dos limites do intervalo de confiança nos blocos do traço 0.



Fonte: Autor (2023).

No Gráfico 6 foram indicados com linhas tracejadas dos limites inferior e superior do intervalo pelas expressões 8 e 9, respectivamente, com $z=1,96$, para um nível de confiança de 95% do valor médio estar dentro do intervalo de confiança. Identifica-se que apenas as amostras 1, 4 e 6 do traço 0 encontram-se dentro do intervalo de confiança delimitado, sendo a resistência média para essa situação, pelo método do intervalo de confiança, a média destes 3 valores.

Analisando as resistências médias obtidas com os dados delimitados pela normalização com Z-Score e pelos limites do intervalo de confiança, verifica-se que os traços 0, 1, 3 e 5 atenderam ao valor mínimo de resistência exigido pela NBR 6136 (ABNT, 2016) para blocos de cimento sem função estrutural de 3,0 MPa, enquanto que os traços que receberam 2% de substituição da areia por serragem, os traços 2, 4 e 6, não atenderam a resistência mínima exigida pela norma.

A favor da segurança, os valores de resistência para cada traço que serão adotados serão os valores médios limitados pelo intervalo de segurança com 95% de confiança de representarem o valor real de resistência.

Tabela 19 – Resistência média dos blocos.

Traço	Nº Ref	Resistência do bloco (MPa)	Z-Score	Resistencia média (MPa)	Intervalo de segurança		
					Limite inferior	Limite superior	Resistenci a média (MPa)
0	1	4,82	0,62	4,84	2,90	5,07	4,71
	2	5,25	0,94				
	3	2,41	-1,17				
	4	4,75	0,56				
	5	2,13	-1,37				
	6	4,56	0,42				
1	1	5,01	-0,06	5,17	4,19	5,95	5,17
	2	5,37	0,27				
	3	6,57	1,37				
	4	5,08	0,01				
	5	3,16	-1,74				
	6	5,25	0,16				
2	1	1,57	-0,95	2,05	1,66	2,62	2,20
	2	2,42	0,48				
	3	3,05	1,53				
	4	1,72	-0,69				
	5	2,45	0,52				
	6	1,60	-0,89				
3	1	3,56	-0,94	4,40	3,70	5,31	4,68
	2	4,74	0,22				
	3	3,35	-1,15				
	4	6,10	1,58				
	5	4,33	-0,17				
	6	4,97	0,46				
4	1	2,77	0,61	2,63	2,35	2,82	2,45
	2	2,53	-0,21				
	3	2,95	1,24				
	4	2,08	-1,74				
	5	2,58	-0,04				
	6	2,63	0,14				
5	1	4,48	0,99	3,79	3,03	4,33	3,60
	2	3,14	-0,67				
	3	4,35	0,83				
	4	2,43	-1,54				
	5	3,45	-0,28				
	6	4,22	0,67				
6	1	2,22	-0,57	2,58	2,09	3,02	2,41
	2	3,11	0,96				
	3	2,27	-0,48				
	4	2,74	0,32				
	5	3,25	1,19				
	6	1,73	-1,42				

Fonte: Autor (2023).

O traço que apresentou uma maior resistência média foi o bio-bloco com adição de 0,5% de serragem tratada por imersão em solução com soda cáustica, com resistência média de 5,17 MPa, resistência superior à média do traço de referência sem adição de serragem, cuja resistência foi de 4,71 MPa. A maior alcalinidade da serragem tratada com soda caustica pode ter influenciado a maior resistência dos blocos com esse bio-agregado. Na sequência, o segundo bio-bloco mais resistente foi o traço com adição de 0,5% de serragem tratada por ciclos de molhagem e secagem com 4,68 MPa e por fim o traço com adição de 0,5% de serragem tratada por ciclos de cozimento em água a 80° C com resistência média de 3,6 MPa, ou seja, para todos os tratamentos, os traços com 0,5% de substituição tiveram resistências superior a 3MPa. A queda de resistência entre os traços com 0,5% de substituição e 2% indicam a existência de um valor ótimo de substituição, cuja identificação permitiria uma substituição máxima atendendo aos requisitos de resistência normatizados e uma maior incorporação de bio-agregado.

4.3 Absorção de água

Os resultados do ensaio de absorção, obtidos substituindo os valores de massa seca e massa saturada na expressão 1, podem ser vistos na Tabela 20. A partir deles, podemos concluir que todos os traços atenderam às recomendações da NBR 6136 (ABNT, 2016).

Os blocos do traço de referência tiveram um valor médio de 9% e o maior valor individual foi de 9,091%, sendo os limites definidos pela norma de 11% para os resultados individuais e 10% para a média da amostragem. Os traços 1 e 5 também tiveram uma absorção média de 9%, sendo o delimitado por norma para blocos com adição de agregados leves o valor de 13% para o valor médio. Os blocos de traço 3 tiveram absorção média de 10%, os traços 2, 6 e 4, com maior percentual de substituição de areia por serragem (2%), tiveram os maiores valores de absorção média, 11%, 11% e 12% respectivamente. Dada a proximidade entre os valores de absorção entre os traços de mesmo percentual de substituição, percebemos que a aplicação de apenas 3 ciclos de molhagem e secagem, um dos tratamentos avaliados, gerando os blocos de traços 3 e 4, não conferiu aos blocos uma redução na capacidade de absorção de água pela redução dos poros as partículas de serragem.

Apesar da adição de serragem de madeira *Pinus*, um material higroscópico com alta capacidade de absorção de água, como visto nos ensaios de absorção, todos os traços atenderam as especificações normativas quanto a sua absorção de água. Durante o processo de preparo da argamassa dos bio-blocos, após misturar os componentes secos (cimento e areia) e adicionou-se a serragem saturada e misturou-se bem antes de adicionar a água e o CaCl_2 . Essa mistura

prévia entre a serragem e a matriz cimentícia pode ter contribuído para uma reação entre o cimento e a água da superfície das partículas da serragem, gerando uma espécie de película, contribuindo para um melhor cobrimento e redução do contato direto com a água durante o processo de saturação das amostras.

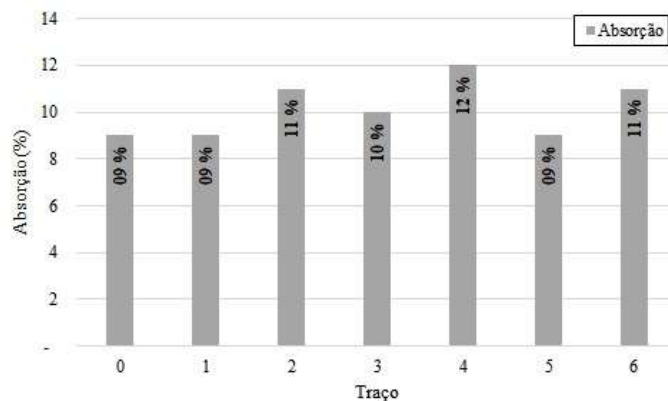
Tabela 20 – Absorção de água.

Traço	Nº Ref.	Massa seca (Kg)	Massa saturada (Kg)	Absorção (%)	Absorção média (%)
0	1	10,45	11,30	8,134	9
	2	10,00	10,90	9,000	
	3	9,90	10,80	9,091	
1	1	10,35	11,30	9,179	9
	2	10,10	11,05	9,406	
	3	10,20	11,20	9,804	
2	1	9,90	10,95	10,606	11
	2	10,05	11,10	10,448	
	3	9,90	10,95	10,606	
3	1	10,00	10,95	9,500	10
	2	10,05	11,15	10,945	
	3	10,30	11,30	9,709	
4	1	9,35	10,50	12,299	12
	2	9,25	10,30	11,351	
	3	9,35	10,40	11,230	
5	1	10,30	11,25	9,223	9
	2	10,25	11,20	9,268	
	3	10,25	11,20	9,268	
6	1	9,35	10,40	11,230	11
	2	9,25	10,30	11,351	
	3	9,45	10,55	11,640	

Fonte: Autor (2023).

O Gráfico 7 sintetiza os resultados da absorção de água dos traços analisados.

Gráfico 7 – Absorção de água das amostras.



Fonte: Autor (2023).

4.4 Condutividade Térmica

Os resultados das aferições das temperaturas nas faces opostas a aplicação de calor dos prismas estão registrados na Tabela 21.

Tabela 21 – Temperaturas dos prismas durante ensaio.

Tempo (min)	Temperatura (°C)						
	Traço 0	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4	Traço 5	Traço 6
0	31,5	30,1	30,9	31,1	35,1	34,2	34,9
1	32,1	32,8	31,9	30,4	35,1	34,3	35,2
2	32,5	30,6	31,8	31,1	34,9	34,3	34,7
3	32,5	31,5	32	30,9	34,9	34,7	34,7
4	32,1	31	32	32,7	34,6	34,7	35,1
5	32	32,8	32,5	31,5	34,2	35,3	34,7
6	32,6	32,6	30,9	31	34,2	33,9	34,2
7	32,1	32,1	31,3	32,3	35,1	34,1	34,3
8	31,3	32,3	32,5	31,4	35,1	35,3	35,4
9	31,8	31,8	31,5	31,5	34,6	34,6	35,1
10	33,6	32,8	31,8	31,8	35,5	33,7	36,2
11	32,3	32,2	32,1	31,7	34,7	34,4	33,1
12	31,3	32,6	32,1	31,6	35,4	34,5	35,1
13	33,6	33,2	32	32	35,8	34,6	35,3
14	33,3	33,6	32,5	31,8	35,8	35,5	34,7
15	35,3	33,2	32,7	32,2	35,2	35,5	34,7
16	34,3	32,9	34,4	31,8	36,6	35,5	34,3
17	34,4	33,2	32,5	32,3	35,7	35,5	35,6
18	35,3	32,7	33,9	32,8	37	35,9	35,8
19	34,7	34,1	33,8	32,9	36,2	35,6	35,7
20	35,3	34	33,8	33,3	35,7	36,6	37
ΔT (Final - Inicial)	3,8	3,9	2,9	2,2	0,6	2,4	2,1

Fonte: Autor (2023).

Observando os resultados da última linha da Tabela 21, onde estão os resultados da diferença entre a temperatura inicial e a temperatura final dos ensaios, pode-se concluir que o prisma construído com os blocos do traço 4 tiveram uma menor variação de temperatura na face oposta a aplicação do jato de calor, variando apenas 0,6° C. Comparando-o com a variação do traço referencial, tem-se uma diferença de 3,2° C. Na sequência, as menores variações foram obtidas com os traços 6, 3 e 2 com 2,1° C, 2,2° C e 2,9° C, respectivamente. Os traços 1 e 0 (referencial) apresentaram resultados muito próximos. Fica claro que a substituição parcial da

areia por serragem gera benefícios no quesito de conforto térmico mesmo com pequenas substituições, 0,5%.

Com as temperaturas de ambas as faces dos prismas nos tempos 0 min, 5 min, 10 min, 15 min e 20 min, montou-se as Tabelas 22 e 23. Na Tabela 22 estão as aferições referentes ao traço referencial e todos os traços que receberam 0,5% de substituição da areia por serragem, e, na Tabela 23, estão dispostos os resultados dos traços que receberam 2% de substituição. Em ambas as tabelas TS significa temperatura na face do prisma que recebe o jato de calor, TO refere-se a temperatura na face oposta a aplicação do jato e ΔT é a diferença de temperatura entre ambas.

Tabela 22 – Variação de temperatura nos prismas de traço 0, 1, 3 e 5.

Tempo (min)	Temperatura (°C)											
	Traço 0			Traço 1			Traço 3			Traço 5		
	TS	TO	ΔT	TS	TO	ΔT	TS	TO	ΔT	TS	TO	ΔT
0	31,5	31,5	0	30,1	30,1	0	31,1	31,1	0	34,2	34,2	0
5	102	32	70	99	32,8	66,2	106	31,5	74,5	97,3	35,3	62
10	115	33,6	81,4	111	32,8	78,2	112	31,8	80,2	112	33,7	78,3
15	123	35,3	87,7	121	33,2	87,8	114	32,2	81,8	118	35,5	82,5
20	114	35,3	78,7	122	34	88	122	33,3	88,7	120	36,6	83,4

Fonte: Autor (2023).

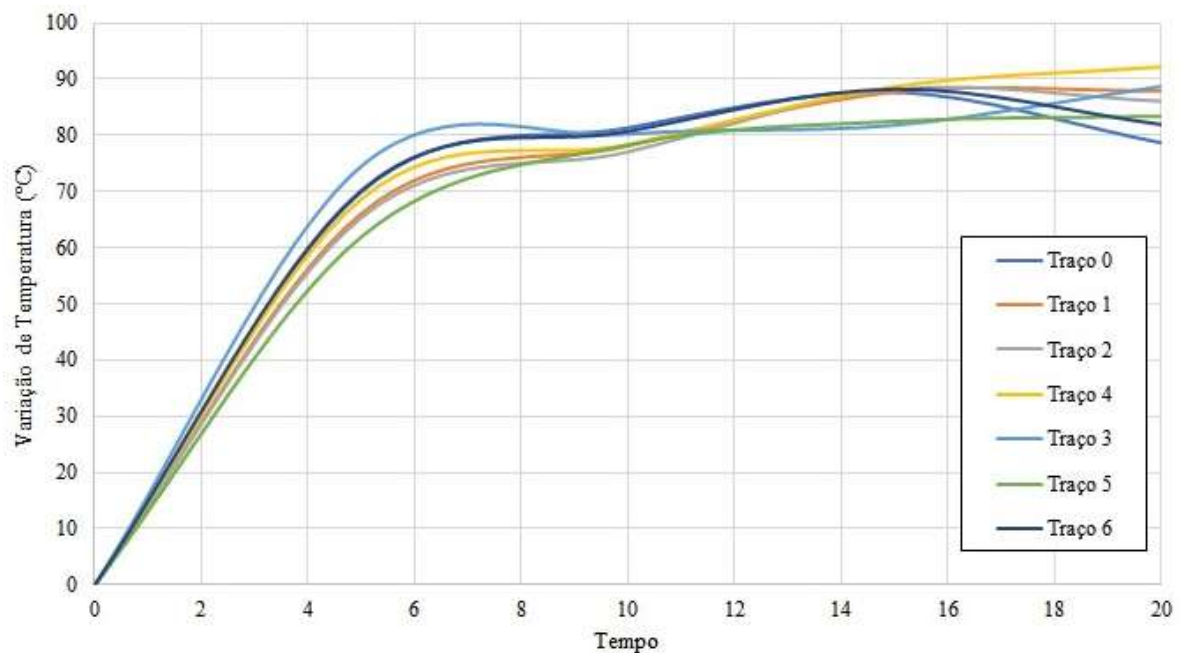
Tabela 23 – Variação de temperatura nos prismas de traço 2, 4 e 6.

Tempo (min)	Temperatura (°C)								
	Traço 2			Traço 4			Traço 6		
	TS	TO	ΔT	TS	TO	ΔT	TS	FO	ΔT
0	30,9	30,9	0	35,1	35,1	0	34,9	34,9	0
5	98	32,5	65,5	103	34,2	68,8	105	34,7	70,3
10	109	31,8	77,2	114	35,5	78,5	117	36,2	80,8
15	121	32,7	88,3	124	35,2	88,8	123	34,7	88,3
20	120	33,8	86,2	128	35,7	92,3	119	37	82

Fonte: Autor (2023).

Com base na variação de temperatura entre as faces dos prismas (ΔT), observa-se que o traço 4 apresentou maior variação, ou seja, menor transferência de calor entre as faces, denotando uma menor condutividade térmica, enfatizando o que já se havia constatado na Tabela 21. O Gráfico 8 permite uma visualização mais clara dos resultados das Tabelas 22 e 23.

Gráfico 8 – Variação da temperatura nas faces dos prismas.



Fonte: Autor (2023).

O Gráfico 8 plota o comportamento dos traços analisados quanto sua variação da temperatura nos tempos definidos no ensaio. Todas as linhas, que representam os traços estudados, apresentaram comportamento similar, partindo do tempo 0 com $\Delta T = 0$, já que ambas as faces dos prismas estavam a uma mesma temperatura no início das aferições. A variação de temperatura foi aumentando gradativamente conforme aplicava-se calor em uma das faces, e ficava mais acentuada nos prismas que ofereciam uma maior resistência à troca de calor através de suas faces. Fica evidente no Gráfico 8 que o traço 4, representado pela linha amarela, teve uma maior variação de temperatura entre as faces, sendo esse valor de $92,3^{\circ}\text{C}$.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos na presente pesquisa, cumpre-se ser viável a utilização de serragem de madeira *Pinus* para a produção de bio-blocos de vedação quanto a critérios técnicos de resistência e absorção de água em conformidade com a NBR 6136 (ABNT, 2016) com substituição de 0,5% em massa de areia. Tendo, inclusive, o bio-bloco com substituição de 0,5% de serragem tratada por imersão em solução de soda caustica obtido melhores resultados de resistência quando comparado com o traço referencial (sem adição de serragem).

Quanto aos critérios de resistência, os traços 1, 3 e 5, que receberam 0,5% de bio-agregado, apresentaram os melhores resultados, 5,17 MPa, 4,68 MPa e 3,6 MPa respectivamente, valores acima do limite mínimo de 3,0 MPa.

Todos os traços respeitaram os limites normativos quanto a absorção de água.

Na produção do bio-concreto observou-se que trabalhar com a serragem em seu estado saturada superfície úmida foi uma boa solução para que a mesma não roubasse água da hidratação do cimento, o que permitiu a adoção de um mesmo fator a/c para todos os traços independente do percentual de substituição.

Em relação a condutividade térmica, verificou-se que a adição de serragem aos blocos conferiu-lhes um melhor isolamento térmico. O traço 1 e o referencial (traço 0) tiveram valores de variação de temperatura muito próximos, entretanto, nos demais traços observou-se uma redução na variação da temperatura passados os vinte minutos de aplicação de calor. O traço 2 apresentou 0,9° C a menos que a traço referencial, no traço 3 essa diferença foi de 1,6° C, de 3,2° C para o traço 4, de 1,4° C para o traço 5 e 1,7° C quando comparada ao traço 6. Ou seja, com exceção do traço 1, todos os blocos apresentaram melhor desempenho térmico quando comparados com o referencial, dada a baixa condutividade térmica da madeira componente do compósito.

Outra inferência que se pode realizar, com base nos dados de massa seca coletados no ensaio de absorção de água (coluna 3 da Tabela 21), é a menor massa dos bio-blocos com substituição de 2% de areia por serragem. Observou-se também um maior rendimento na produção dos blocos com esse percentual de substituição, onde para cada 10 blocos produzido produziu-se 1 a mais, o que permitiria uma economia nos demais insumos além da areia.

Um fator que pode ter afetado os resultados obtidos, especialmente a resistência dos blocos, foi o seu capeamento. Considerando a grande dimensão e massa dos blocos e o capeamento ter sido executado sem nenhum tipo de forma, observou-se um certo desnível em

sua superfície que no momento do rompimento ocasionou que o carregamento se desse de forma não distribuída sobre os blocos, se concentrando em uma de suas extremidades. A maioria dos blocos apresentaram rompimento apenas em um dos cantos, enquanto a parede central e o canto oposto ficavam intactos ao final do processo.

Comparando os 3 tratamentos utilizados, apesar de ter-se uma maior resistência para os bio-blocos com serragem tratada solução de soda caustica, a necessidade da aplicação de vários ciclos de lavagem para remoção da solução do bio-agregado mostrou-se um método com um considerável desperdício de água, além de gerar um resíduo cuja destinação e impactos ao meio não devem ser ignorados, logo, nos quesitos aplicabilidade, desperdício de água e geração de resíduo com potencial impacto ao meio ambiente, se mostrou o tratamento menos eficiente. Os tratamentos de molhagem e secagem e imersão em água aquecida tem a vantagem de usarem apenas a água e a temperatura como agentes na remoção dos extrativos, sem adição de produtos químicos no processo, o que poderá facilitar inclusive o tratamento e reutilização das águas do processo. Como em ambos os tratamentos se utilizou a proporção volumétrica de 1:1 de água e serragem e foram aplicados o mesmo número de ciclos de tratamento, o consumo de água foi o mesmo. Analisando os resultados de resistência, absorção de água e isolamento térmico o tratamento por ciclos de molhagem e secagem se mostra mais eficiente tecnicamente e ecologicamente quando comparado aos demais tratamentos.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros seriam interessantes avaliar:

- Avaliar outros percentuais de substituição de areia pelo bio-agregado;
- Qual seria o impacto da utilização da serragem *Pinus* como bio-agregado sem adoção de um tratamento prévio;
- Avaliar os bio-blocos quanto a sua durabilidade, quanto a exposição a intempéries e ao tempo, definindo a sua vida útil;
- Avaliar a sua aplicabilidade na construção civil e quais as variações advindas quando comparados aos blocos convencionais;
- Avaliar os impactos da produção dos bio-blocos em escala industrial;
- Avaliar o aspecto financeiro decorrente da substituição da utilização da serragem na produção de bio-blocos.

6 REFERÊNCIAS

ANDREOLA, V. M. **Caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos de bambu**. 2017. Tese de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

ANDREOLA, V. M. **Durabilidade ao intemperismo natural e ao ataque biológico de bio-concretos de bambu**. 2021. Tese de Doutorado. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: Agregados - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12118: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4: Edificações habitacionais - desempenho parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16915: Agregados - Amostragem**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022.

BALLONI, CARLOS JOSÉ VESPÚCIO. **Caracterização física e química da madeira de Pinus elliottii**. Trabalho de Graduação apresentado no Campus Experimental de Itapeva- Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira, 2009.

BERALDO, A. L. **Compuestos de biomasa vegetal y cemento**. Borrás, VA, Savastano, JR, H., Arjona, S. D., Ramirez, AM, (Org.). Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción. 1ª ed. Valencia, España–Universitat Politècnica de València, v. 1, p. 301-326, 2011.

CABRAL, Matheus Roberto. **Painéis de partículas homogêneas cimento-bagaço de cana-de-açúcar curados por carbonatação acelerada**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CANHAMOR HEMP COMPANY. **Cânhamor Hemp Company**. Disponível em: <https://canhamorhemp.com/>. Acesso em: 2 jun. 2023.

CIVIL, I. **Manifestações Patológicas nas Estruturas de Concreto**. 2023. Disponível em: <https://www.inovacivil.com.br/manifestacoes-patologicas-nas-estruturas-de-concreto/>. Acesso em: 2 jun. 2023.

CUNHA, Paulo Waldemiro Soares. **Estudo sobre as potencialidades de compósitos à base de gesso e fibras de coco seco para aplicação na construção civil**. 2012.

DA GLORIA, M. Y. R. **Desenvolvimento e caracterização de painéis sanduíches de concreto com núcleo leve e faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal**. 2015. Tese de Doutorado. Tese de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

DAS GRAÇAS ROTH, Caroline; GARCIAS, Carlos Mello. **Construção civil e a degradação ambiental**. Desenvolvimento em questão, v. 7, n. 13, p. 111-128, 2009.

DIQUELOU, Youen et al. **Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix**. Cement and Concrete Composites, v. 55, p. 112-121, 2015.

EMBRAPA. **O Pínus**. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/pinus>. Acesso em: 5 jan. 2023.

FERREIRA, S. R. et al. **Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 17, p. 1024-1034, 2012.

GARCEZ, Monica Regina et al. **Tijolos leves para alvenaria produzidos a partir de resíduos da indústria madeireira**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 23, p. 607-614, 2018.

GLORIA, M. Y. **Comportamento experimental e numérico de bioconcretos de madeira e painéis sanduíches com faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal**. 2020. Tese de Doutorado. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GONZAGA, Antônio Luiz. **Madeira: Uso e conservação** [Cadernos Técnicos 6]. Brasília, DF: IPHAN/Programa Monumenta, 2006.

HAN, Shaobo. **Thermoelectric polymer-cellulose composite aerogels**. Linköping University Electronic Press, 2019.

HARBORNE, Jeffrey. B. **Introduction to Ecological Biochemistry**. Elsevier, 1988.

HUBBE, M. A. et al. **Cellulose nanomaterials: sustainable materials choice for novel applications**. Journal of Applied Polymer Science, Wiley Online Library, v. 134, n. 24, p. 45379, 2017.

IPCC, Climate Change et al. **Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.

ISOHEMP. **IsoHemp**. Disponível em: <https://www.iso hemp.com/en>. Acesso em: 2 jun. 2023.

KHANNA, S. K. **Properties and performance of natural-fiber composites**. The Journal of Adhesion, Taylor & Francis, v. 84, n. 3, p. 241-266, 2008.

KLEMM, Dieter et al. **Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material**. Angewandte chemie international edition, v. 44, n. 22, p. 3358-3393, 2005.

KLEMM, Dieter et al. **Comprehensive cellulose chemistry**. Volume 1: Fundamentals and analytical methods. Wiley-VCH Verlag GmbH, 1998.

LIMA, Adauto José Miranda; IWAKIRI, Setsuo. **Utilização de resíduos de madeira de pinus spp, cinza volante e escória de alto-forno em compósitos cimento-madeira**. Floresta, v. 42, n. 3, p. 639-650, 2012.

LINS, Marcos Rodrigues. **Análise da viabilidade da construção de casas populares com o sistema de construção modular Off-Site**. Trabalho de Graduação apresentado na Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus do Sertão, como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Civil, 2023.

LORETO, Francesco; SCHNITZLER, Jörg-Peter. **Abiotic stresses and induced BVOCs**. Trends in plant science, v. 15, n. 3, p. 154-166, 2010.

MAGNIONT, Camille; ESCADEILLAS, Gilles. **Chemical composition of bio-aggregates and their interactions with mineral binders**. Bio-aggregates Based Building Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 236-BBM, p. 1-37, 2017.

MOON, Robert J. et al. **Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites**. Chemical Society Reviews, v. 40, n. 7, p. 3941-3994, 2011.

MORAIS, Sérgio Antônio Lemos de; NASCIMENTO, Evandro Afonso do; MELO, Dárley Carrijo de. **Análise da madeira de Pinus oocarpa parte I: estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis**. Revista Árvore, v. 29, p. 461-470, 2005.

MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. Francisco; HOFSTRAND, A. D. Effect of various treatments and additives on wood-Portland cement-water systems. *Wood and Fiber science*, p. 164-176, 1983.

MOZER, Gean Zucoloto; LOPES, Alan Uliana; WOELFFEL, Anderson Buss. **Confecção de bloco de concreto para vedação com substituição parcial do agregado miúdo por serragem**. *Revista Científica Faesa*, v. 15, n. 2 Especial, p. 29-51, 2019.

NA, Bin et al. **Wood-cement compatibility review**. *Wood research*, v. 59, n. 5, p. 813-826, 2014.

Nações Unidas. **População mundial deve ultrapassar marca de 8 bilhões ainda este ano**. 2022. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2022/07/1794942>. Acesso em: 11 jul. 2023.

NEVILLE, Adam M. **Tecnologia do concreto**. Bookman Editora, 2013.

NISHIYAMA, Yoshiharu; LANGAN, Paul; CHANZY, Henri. **Crystal structure and hydrogen-bonding system in cellulose I β from synchrotron X-ray and neutron fiber diffraction**. *Journal of the American Chemical Society*, v. 124, n. 31, p. 9074-9082, 2002.

ONU NEWS. (8 de maio de 2019). ONU alerta que entre 40 e 50 bilhões de toneladas de areia são extraídas por ano. Disponível em: ONU alerta que entre 40 e 50 bilhões de toneladas de areia são extraídas por ano | ONU News. Acesso em: 4 de dezembro de 2023.

ONU NEWS. (27 de abril de 2022). Uso de areia deve ser estratégico para evitar impactos ambientais, alerta Pnuma. Disponível em: Uso de areia deve ser estratégico para evitar impactos ambientais, alerta Pnuma | ONU News. Acesso em: 4 de dezembro de 2023.

PENG, Feng et al. **Comparative study of hemicelluloses obtained by graded ethanol precipitation from sugarcane bagasse**. *Journal of agricultural and food chemistry*, v. 57, n. 14, p. 6305-6317, 2009.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro-RJ: Livros Técnicos e Científicos S.A., 2003.

PINTO, Mônica Cristina. **Influência da Temperatura e de Tratamentos Alcalinos na Remoção dos Extrativos da Biomassa de Madeira e seus Efeitos na Hidratação de Pastas de Cimento e de Bioconcreto**. 2019.

RALPH, J.; LANDUCCI, L. L. NMR of lignins. In: *Lignins: Biosynthesis, Biodegradation and Bioengineering*. [S.l.]: Academic Press, 2010. p. 87-109.

ROMÃO, Éliton Amorim. **Análise do desempenho térmico em tijolo ecológico confeccionado com uso de argila expandida**. Trabalho de Graduação apresentado na Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus do Sertão, como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Civil, 2020.

SAKA, Shiro. **Chemical composition and distribution**. *Wood and cellulosic chemistry*, v. 863, p. 51-81, 2000.

SCHELLER, Henrik Vibe; ULVSKOV, Peter. **Hemicelluloses**. Annual review of plant biology, v. 61, p. 263-289, 2010.

SLUITER, Amie et al. **Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass**. Laboratory analytical procedure, v. 1617, n. 1, p. 1-16, 2008.

THAKUR, V. K.; KESSLER, M. R. Cellulose-based bio- and nanocomposites: a review. International Journal of Polymer Science, Hindawi, v. 2015, p. 1-35, 2015.

THE NEW YORK TIMES. (4 de novembro de 2014). Why Sand Is Disappearing. Disponível em: Opinion | Why Sand Is Disappearing - The New York Times (nytimes.com). Acesso em: 4 de dezembro de 2023.

THOMAS, Noreen L.; BIRCHALL, J. D. **The retarding action of sugars on cement hydration**. Cement and Concrete Research, v. 13, n. 6, p. 830-842, 1983.

VARGAS-MENDOZA, N. et al. Plant secondary metabolites: A review. Journal of Food Quality, Hindawi, v. 2017, 2017.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. Advances in biofuel production: algae and aquatic plants. New York: Springer, 2010.

VIROC. Viroc. Disponível em: <http://www.viroc.co.uk/>. Acesso em: 2 de junho de 2023.

VO, Loan TT; NAVARD, Patrick. **Treatments of plant biomass for cementitious building materials—A review**. Construction and Building Materials, v. 121, p. 161-176, 2016.

WILLFÖR, S. et al. Hemicelluloses: isolation, structure characterization and bioactive properties. In: Handbook of Biofuels Production. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. p. 79-102.

ZHAO, Yuanyuan et al. **Advances in imaging plant cell walls**. Trends in plant science, v. 24, n. 9, p. 867-878, 2019.

ZUCCO, Lóris Lódir. **Estudo da viabilidade de fabricação de placas de compósitos à base de cimento e casca de arroz**. 1999. 118 f. 1999. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiente) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.