



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

FELIPE AUGUSTO SANTIAGO HANSTED

**Desempenho físico-mecânico de compósitos cimentícios produzidos com cinza de
biomassa residual e partículas de eucalipto**

Guaratinguetá/SP

2023

Felipe Augusto Santiago Hansted

**Desempenho físico-mecânico de compósitos cimentícios produzidos com cinza de
biomassa residual e partículas de eucalipto**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para fim de qualificação da obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Cristiane Inácio de Campos

Coorientador: Prof. Dr. Fabio Minoru Yamaji

Guaratinguetá/SP

2023

H251d	<p>Hansted, Felipe Augusto Santiago Desempenho físico-mecânico de compósitos cimentícios produzidos com cinza de biomassa residual e partículas de eucalipto / Felipe Augusto Santiago Hansted – Guaratinguetá, 2023. 104 f : il. Bibliografia: f. 85-98</p> <p>Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientadora: Profª. Drª. Cristiane Inácio de Campos Coorientador: Prof. Dr. Fabio Minoru Yamaji</p> <p>1. Cimento. 2. Resíduos vegetais. 3. Materiais compostos. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 691.54(043)</p>
-------	---

FELIPE AUGUSTO SANTIAGO HANSTED

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

unesp 

Assinado de forma digital
por Paloma Maria Silva
Rocha Ruzk:27555620804
Dados: 2023.02.01
23:49:03 -03'00'

Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Assinado de forma digital por Cristiane Inacio de Campos:17162365841
DN: cn=Cristiane Inacio de Campos:17162365841, ou=UNESP - Universidade
Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, o=ICPEdu, c=BR
Dados: 2023.01.19 15:48:07 -03'00'

Profa. Dra. CRISTIANE INACIO DE CAMPOS

Orientador - UNESP

participou por videoconferência

Documento assinado digitalmente

gov.br

ANDRE LUIS CHRISTOFORO
Data: 19/01/2023 18:40:38 -0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO

UFSCar

participou por videoconferência

Documento assinado digitalmente

gov.br

MARIA FATIMA DO NASCIMENTO
Data: 03/02/2023 10:12:43 -0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Profa. Dra. MARIA FÁTIMA DO NASCIMENTO

USP

participou por videoconferência

Assinado de forma digital por Cesar Augusto Galvao de

Morais:31984621858

DN: cn=Cesar Augusto Galvao de Moraes:31984621858, ou=UNESP -
Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, o=ICPEdu, c=BR
Dados: 2023.01.25 18:48:16 -03'00'

Prof. Dr. CÉSAR AUGUSTO GALVÃO DE MORAIS

UNESP

participou por videoconferência


unesp

Danielle
Goveia:03669573
925

Profa. Dra. DANIELLE GOVEIA

UNESP

participou por videoconferência

DADOS CURRICULARES

FELIPE AUGUSTO SANTIAGO HANSTED

NASCIMENTO	10.08.1986 – CAMPINAS/SP
FILIAÇÃO	Laercio José Ayres Hansted Maisa Aparecida Torres Santiago Hansted
2005/2008	Curso de graduação em Publicidade e Propaganda na Escola Superior de Marketing e Comunicação ESAMC – Campus Sorocaba
2009/2011	Curso de Pós-Graduação em Marketing, especialização, na Escola Superior de Marketing e Comunicação ESAMC – Campus Sorocaba
2014/2019	Curso de graduação em Engenharia de Produção– Universidade Estadual Paulista – Campus Experimental de Itapeva.
2017/2019	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2019/Em andamento	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus, minha família, minha esposa e meus amigos, sem o apoio dos quais nada disso seria possível. Gostaria de agradecer também a toda a equipe das universidades, UNESP, UFSCAR e Universidade de Nagoya, docentes, servidores e técnicos que me ajudaram muito, em especial a minha orientadora, meu coorientador e meu orientador no exterior, que ajudaram em minha jornada de pesquisa tanto profissionalmente quanto pessoalmente.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

RESUMO

Resíduo florestal é todo e qualquer material que resulta da colheita ou do processamento da madeira ou de outro recurso florestal que possa permanecer sem utilização no processo produtivo. O resíduo de madeira, ainda no século 21, representa uma grande parcela de rejeito das atividades industriais, mostrando de grande importância econômica e ambiental, no entanto, o potencial de reciclagem deste tipo de resíduo é subutilizado. A fabricação de cimento, mineração de agregados e moagem prejudicam o delicado equilíbrio ecológico, pois esgotam os recursos naturais, consomem grande quantidade de energia, emitem enormes quantidades de poeira e gases de efeito estufa que podem resultar em inadequações ambientais. Uma das soluções não somente para resíduos de madeira, como também para a indústria cimentícia é o uso em conjunto desses materiais. Outro resíduo que a literatura versa sobre são as cinzas advindas da queima de carvão. Tal tema tem sido amplamente utilizado em pesquisas como material suplementar ao cimento, no entanto, com o intuito de se encontrar alternativas mais sustentáveis, outros materiais têm sido estudados como, por exemplo, a cinza do processo de queima de biomassa para geração de energia. Com base no exposto definiu-se que o objetivo do presente trabalho foi estudar a viabilidade técnica da inserção de cinzas de biomassa em substituição a três diferentes tipos de cimento em um compósito cimento-madeira. Foram utilizados também resíduos de eucalipto de duas granulometrias diferentes. Avaliou-se também a influência de um tratamento com água para a lavagem da madeira e a inibição do cimento a partir da adição da mesma. Por fim, os resultados obtidos por meio de análise estatística foram comparados com a literatura e considerando os três tipos de cimento utilizados no estudo, o que mais se destacou em termos de desempenho físico e mecânico foi o CPV-ARI por apresentar cura rápida e, no compósito cimento-madeira, apresentou menor índice de inibição. O tratamento das partículas de madeira não se mostrou necessário por não proporcionar melhores resultados em testes físicos e mecânicos. A proposta de adicionar cinza de biomassa e partículas de madeira em um material compósito de cimento resultou em um tratamento viável por permitir o uso de um tipo de resíduo que atualmente é descartado, sem valor agregado e, por estabelecer um desempenho físico-mecânico ao material estudado semelhante aos achados na literatura, não interferindo negativamente na cura e hidratação do mesmo.

Palavras-chave: Cimento; Resíduo de madeira; Cinza de biomassa; Material compósito; Características físicas; Características mecânicas.

ABSTRACT

Forest residue is any material that results from the harvesting or processing of wood or other forest resources that may remain unused during the production process. Wood waste, still in the 21st century, represents a large portion of waste from industrial activities, proving to be of great economic and environmental importance, however, the recycling potential of this type of waste is underused. Cement manufacturing, aggregate mining, and grinding harm the delicate ecological balance as it depletes natural resources, consumes large amounts of energy, and emit huge amounts of dust and greenhouse gases which can result in environmental shortcomings. One of the solutions not only for wood waste but also for the cement industry is the joint use of these materials. Another residue mentioned in the literature is ash from coal burning. This item has been widely used in research as a supplementary material to cement, however, in order to find more sustainable alternatives, other materials have been studied, such as, for example, the ash from the process of burning biomass for energy generation. Based on the above, it was defined that the objective of the present work was to study the feasibility of inserting biomass ash in order to replace three different types of cement in a cement-wood composite. Eucalyptus residues of two different particle sizes were also used. The influence of a treatment with water for washing the wood and the inhibition of the cement after its addition was also evaluated. Finally, the results obtained were compared through statistical analysis. Considering the three types of cement used in the study, the one that stood out the most in terms of physical and mechanical performance was the CPV-ARI for presenting fast curing and, in the cement-wood composite, it presented a lower inhibition index. The treatment of the particles was not necessary because it did not provide better results during physical or mechanical tests. The proposal to add biomass ash and wood particles in a cement composite material resulted in a viable composite since it was not impairing regarding the physical-mechanical performance of the composite material, not harming its curing and hydration.

Keywords: Cement; Wood residue; Biomass ash; Composite material; Physical characteristics; Mechanical characteristics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Número de publicações “biomass & ash & cement”	18
Figura 02 - Cocitação “biomass & ash & cement”	19
Figura 03 - Coautoria “ <i>biomass & ash & cement</i> ”	20
Figura 04 - Número de publicações adicionando “ <i>wood & composite</i> ”	21
Figura 05 - Cocitação “ <i>wood</i> ” e “ <i>composite</i> ”	22
Figura 06 - Co autoria “ <i>wood & composite</i> ”	23
Figura 07 - Número de publicações adicionando “ <i>particle</i> ”	23
Figura 08- Co autoria com adição de “ <i>particles</i> ”	24
Figura 09 - Clínquer antes da moagem.....	26
Figura 10- Nomenclatura cimento no Brasil	28
Figura 11 – Templo de Horyuji	33
Figura 12- Forro de cimento-madeira – Japão.....	35
Figura 13 - Ácido plicático	37
Figura 14 – Participação na oferta de energia	39
Figura 15 – Caçamba de cinzas após a queima da biomassa.....	44
Figura 16- Madeira antes de secar.....	46
Figura 17 – Corpos de Prova desenformados	48
Figura 18- Primeiras medidas hidratação	50
Figura 19 - Leitor LCD e detalhe Arduino Uno separado e quatro juntos.	51
Figura 20 – Dados de temperatura mostrados na IDE nativa do Arduino.....	51
Figura 21 – Equipamento para o teste de microscopia eletrônica de varredura.	54
Figura 22 - Corpos de prova capeados para ensaio de compressão.....	56
Figura 23 – Ensaios de compressão normal para determinação de rigidez e resistência.	56
Figura 24 – Estruturas presentes na amostra de cinza de caldeira obtida por Microscópio Eletrônico de varredura (MEV) com aumento de 200 %	62
Figura 25 – Gráfico obtido no EDS dos principais elementos.	63
Figura 26 - Comparativo entre pastas sem adição de cinzas	65
Figura 27 - Comparativo entre pastas com adição de cinzas.....	66
Figura 28 – Valores de densidade aparente média para os tratamentos.	71
Figura 29 - Valores médios obtidos no ensaio de absorção de água em 24 horas e respectivos coeficientes de variação.	72
Figura 30 - Inchamento em espessura	73
Figura 31 - Módulo de Elasticidade (MOE).....	74
Figura 32 - Módulo de Ruptura (MOR)	75

Figura 33 - Gráficos de Pareto do planejamento experimental referente associado aos fatores CT e AC.	77
Figura 34 - Gráfico de interação entre os fatores CT e AC.	78
Figura 35- Gráficos de Pareto do planejamento relacionado com os 24 tratamentos experimentais delineados.	79
Figura 36 - Gráficos de interação para a densidade.....	80
Figura 37 - Gráficos de interação para o inchamento em espessura após 24 horas de imersão.	81
Figura 38 - Gráficos de interação para a absorção de água.	82
Figura 39 - Programa em Arduino.....	99
Figura 40 - Compósitos com cimentos e madeira 9 mesh.....	100
Figura 41- Compósitos com cimentos e madeira 35 mesh.....	100
Figura 42– Compósitos com cimentos e madeira 9 mesh e cinza.	101
Figura 43- Compósitos com cimentos e madeira 35 mesh e cinza.....	102
Figura 44– Compósitos com cimentos e madeira tratada 9 mesh	103
Figura 45- Compósitos com cimentos e madeira tratada 35 mesh.....	104
Figura 46- Compósitos com cimentos e madeira tratada 9 mesh e cinza.....	89
Figura 47- Compósitos com cimentos e madeira tratada 35 mesh e cinza.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Tipos de Cimento.....	27
Tabela 02 – Traço Estudo primeira etapa.....	46
Tabela 03- Descrição dos tipos de tratamento.....	47
Tabela 04: Tratamentos experimentais delineados.....	58
Tabela 05 – Percentual de cinzas residual.	60
Tabela 06 – Composição química da cinza.	61
Tabela 07- Massa total de elementos obtida por EDS.....	64
Tabela 08 – Índice de inibição para os tratamentos estudados na primeira etapa.	67
Tabela 09 - Índice de inibição	69
Tabela 10 - Resultados do teste de contraste de média de Tukey para o planejamento experimental envolvendo os fatores CT e AC.	76
Tabela 11 - Resultados do teste de Tukey referentes ao planejamento composto pelos quatro fatores investigados (tratamentos de 1 a 24).	78

LISTA DE EQUAÇÕES

$II = 100 \times t - t' \times T' - TT' \times S' - SS'$	Equação 1	49
$D = MV \times 1000000$	Equação 2	54
$I = E1 - E0 \times 100$	Equação 3.....	55
$A = M1 - M0 \times 100$	Equação 4	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	17
3.2 REVISÃO DA LITERATURA	25
3.2.1 Cimento	25
3.2.2 Setor econômico florestal	32
3.2.3 Painéis de madeira e cimento	34
3.2.4 Uso de biomassa na indústria	38
3.2.5 Cinzas e seu uso no cimento	40
4. MATERIAL E MÉTODOS	43
4.1. MATERIAIS	43
4.1.1 Cimento Portland	43
4.1.2 Água	44
4.1.3 Cinzas	44
4.2. MÉTODO	45
4.2.1 Traço dos corpos de prova	45
4.2.2 Confecção dos corpos de prova	48
4.2.3 Sistema de análise da inibição.	49
4.3. CARACTERIZAÇÃO DA CINZA.....	52
4.3.1 Análise imediata / Teor de cinzas	52
4.3.2 Avaliação composição química	52
4.4 ANÁLISE DE IMAGENS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA ..	53
4.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	54
4.5.1 Determinação da densidade aparente	54
4.5.2 Inchamento em espessura e absorção de água	55
4.6 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	55
4.6.1 Módulos de elasticidade e Ruptura	55

4.7 Análise estatística	57
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1. ANÁLISE IMEDIATA DAS CINZAS	60
5.2. CÁLCULO DO ÍNDICE DE INIBIÇÃO.....	64
5.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO COMPOSTO	70
5.3.1. Densidade aparente (ρ)	70
5.3.2. Absorção de água 24 horas (WA)	71
5.3.3. Inchamento em espessura (TS)	72
5.4. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO COMPOSTO.....	74
5.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	75
5.5.1 Análise das condições de referência	76
5.5.2 Análise dos tratamentos	78
6. Conclusões	83
REFERÊNCIAS	85

1. INTRODUÇÃO

Resíduo florestal é todo e qualquer material que resulta da colheita ou do processamento da madeira ou de outro recurso florestal que possa permanecer sem utilização definida no processo (NOLASCO, 2020). Ainda no século 21 o resíduo de madeira representa uma grande parcela de atividades industriais denotando grande importância econômica e ambiental, no entanto, o potencial de reciclagem deste tipo de resíduo é subutilizado principalmente devido à falta de alternativas ambientalmente corretas (BERGER *et al.*, 2020).

O relatório da Indústria Brasileira de Árvores do ano de 2021, relata que o setor florestal gerou cerca de R\$116,6 bilhões em um ano de faturamento bruto, quase 18% em relação ao ano anterior (IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2021).

Este mercado, que cresce de forma contínua, resulta em um alto volume de resíduos. Em 2019 o setor florestal gerou 52 milhões de toneladas de material sem a destinação apropriada (IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019). Existe, no entanto, uma mudança em como a sociedade hoje encara o resíduo madeireiro. O que no passado era entendido como lixo, ou material sem utilidade, atualmente está sendo tratado como resíduo ou subproduto e visto como matéria prima para outros processos (PARCHEN, 2012).

Nos últimos anos, a atenção sobre fatores ambientais tem crescido. Mesmo existindo incertezas sobre as mudanças climáticas, a comunidade científica sabe precisar que as mudanças são advindas da atividade humana (VILLAS-BÔAS *et al.*, 2020). Entende-se então que uma das maneiras de se mensurar o desenvolvimento é através dos pilares da sustentabilidade moderna, ambientalmente sustentável, economicamente sustentável e socialmente sustentável (BAEYENS FERRI; GOFFIN, 2010).

A partir da abordagem ambiental os produtos fabricados com madeira têm uma participação significativa no armazenamento de CO₂. Um estudo realizado por Boutin *et al.* (2005) confirma que uma parede de concreto composto com material vegetal pode reter de 14 kg à 35 kg de dióxido de carbono por até 100 anos. Em adição a essa vantagem ambiental os compósitos de cimento madeira tendem a apresentar as seguintes vantagens: alto grau de resistência ao fogo, isolamento acústico e térmico, resistência a impactos e ao ataque de agentes xilófagos e boas características mecânicas (VILLAS-BÔAS *et al.*, 2020).

A pegada de carbono é uma preocupação profundamente associada com a indústria da construção civil. A produção de cimento, por exemplo, é muitas vezes alvo de críticas, especialmente por conta da emissão de CO₂ do seu processo produtivo, que além de ter altas

emissões de gases de efeito estufa, consome uma quantidade significativa de matéria prima (HOSSAIN *et al.*, 2019).

A evolução da produção de cimento está ligada diretamente à atividade econômica e aos níveis de industrialização e desenvolvimento de infraestrutura de um país. A intensidade da demanda de cimento está diminuindo em países mais desenvolvidos e aumentando em países em desenvolvimento (STAFFORD *et al.*, 2016).

Uma das soluções não somente para resíduos de madeira como também para a indústria cimentícia é que eles podem ser efetivamente usados em conjunto, por apresentarem densidade reduzida, como material de isolamento térmico para forro de edifícios e oferecem melhor perfil ambiental quando comparados aos materiais isolantes inorgânicos convencionais (CETINER; SHEA, 2018).

O uso de resíduos de madeira em substituição às fibras de madeira em produtos cimentícios tem sido destacado por diversos estudos como uma excelente forma de reduzir o descarte de madeira em aterros sanitários e, o uso em geral de fibras vegetais em materiais cimentícios oferecem propriedades térmicas e hídricas interessantes ao produto final (LI *et al.*, 2019).

Outro resíduo que a literatura versa sobre seu uso juntamente ao cimento são cinzas advindas da queima de carvão mineral. No entanto sua utilização é de extrema toxicidade ao meio ambiente (FÄRE *et al.*, 2010). Com o intuito de se encontrar alternativas mais sustentáveis, outros materiais tem sido estudados como, por exemplo, a cinza do processo de queima de biomassa, que gera menor toxicidade no ar (STOLZ *et al.*, 2019).

De acordo com o SNIC, Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento do Brasil o consumo anual de cimento no ano de 2020 teve um aumento de 14,47% em relação à 2018 (SNIC, 2021).

Uma das maneiras de se lidar com o problema do consumo exagerado de matérias primas é diminuir a dependência em cimento tradicional, fazendo surgir a demanda por produtos cimentícios alternativos (TAMANNA *et al.*, 2020).

Concretos de estrutura leve, têm sido pesquisados uma vez que, apresentam uma boa relação resistência/peso e podem ser utilizados como itens não estruturais de construção como painéis, forros e divisórias apresentando condutibilidade térmica baixa e características acústicas boas (POSI *et al.*, 2013). É sabido que a madeira como agregado em material compósito traz leveza e propriedades acústicas e térmicas interessantes (STOLZ *et al.*, 2019). O objetivo deste trabalho foi verificar a viabilidade da inserção de cinzas de biomassa no traço de um compósito cimento-madeira.

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo principal estudar a viabilidade do uso de cinzas de biomassa, em substituição a três diferentes tipos de cimento, CII-E, CII-F e CPV-ARI no compósito cimento e madeira de eucalipto (*Eucalyptus* spp).

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o desempenho físico e mecânico dos compósitos produzidos com três diferentes tipos de cimento;
- Avaliar a influência do tratamento com água e das diferentes granulometrias das partículas de madeira no desempenho dos compósitos;
- Avaliar o índice de inibição entre madeira-cimento-cinzas para os diferentes tratamentos estudados;
- Avaliar a estrutura microscópica das cinzas e sua interação com o compósito.
- Avaliar quais variáveis têm influência direta no desempenho dos compósitos estudados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para situar a pesquisa e verificar seu ineditismo foi realizada uma análise bibliométrica com os termos principais. Na revisão bibliográfica será exibida a base do referencial teórico que foi utilizado para a concretização desta tese. Serão apresentados os temas relacionados a pesquisa, valendo destacar a utilização de cimento na construção civil, para que se faça clara sua importância na indústria e na construção, o ciclo de vida deste material, identificando as adversidades ambientais que existem desde sua fabricação, o uso de materiais compósitos de cimento e madeira, alguns dos materiais mais utilizados e seu emprego na indústria.

3.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

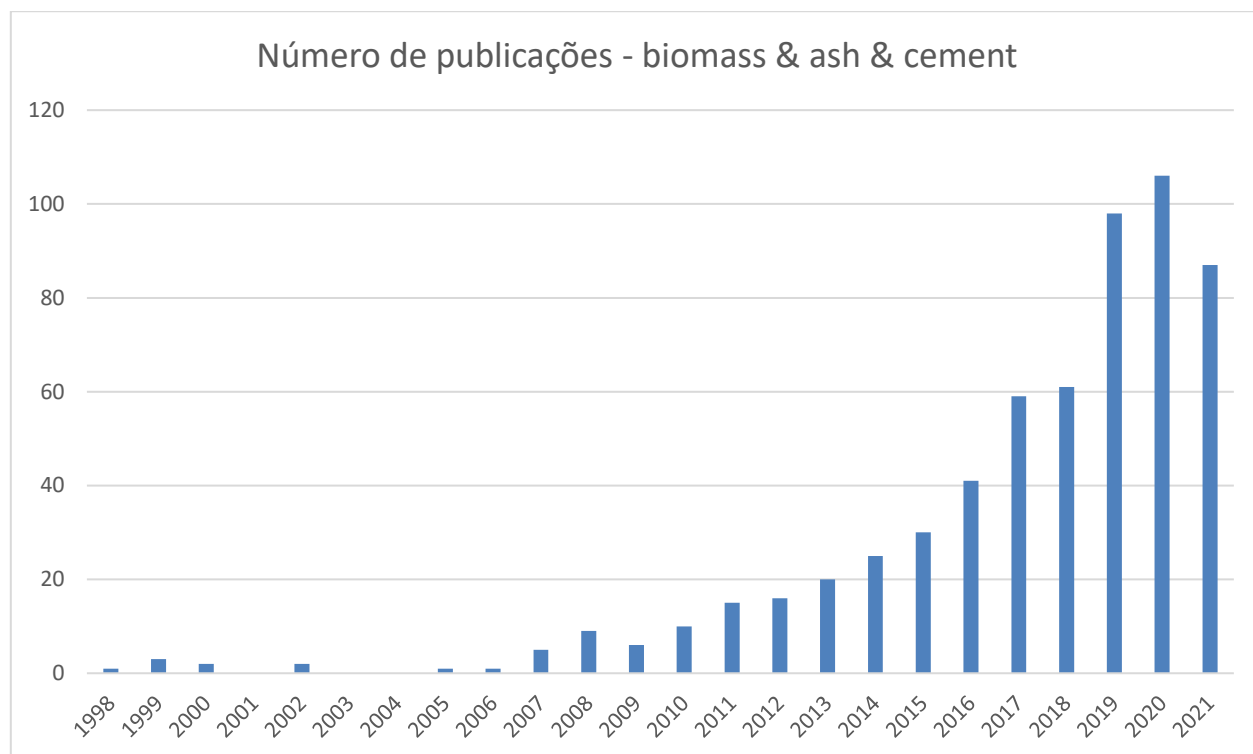
Para obter um cenário mais assertivo da produção científica do tema pesquisado, foi realizada uma análise bibliométrica acerca dos postos principais da pesquisa. Esse estudo foi realizado a partir do banco de dados *Web of Science*. Palavras em títulos, resumos e palavras-chave foram pesquisadas para demonstrar correlação entre os assuntos pesquisados e evolução da pesquisa na área ao longo do tempo.

Primeiramente pesquisou-se os termos “*biomass & ash & cement*” para um panorama da área. Depois foram adicionados “*wood*”, “*composite*” e “*particles*”, variáveis críticas para a pesquisa, e por fim, foi adicionado o termo “*eucalyptus*”. Foi realizada a análise de cada um desses termos pela quantidade de publicações anual, citações da área e foi feita uma triagem por cocitação e coautoria pelo software Vos viewer.

Na análise do VOS viewer cada nó representa um autor, as linhas e distâncias refletem a relação entre eles. A distância entre dois nós indica a força do relacionamento, o que significa que quando dois nós estão mais próximos, eles tendem a ter um relacionamento de pesquisa forte (MANTEGAZINI *et al.*, 2020).

Na Figura 01 é possível ver o número total de 598 trabalhos publicados filtrando pelo primeiro crivo “*biomass & ash & cement*” nos últimos 24 anos.

Figura 01 - Número de publicações “biomass & ash & cement”

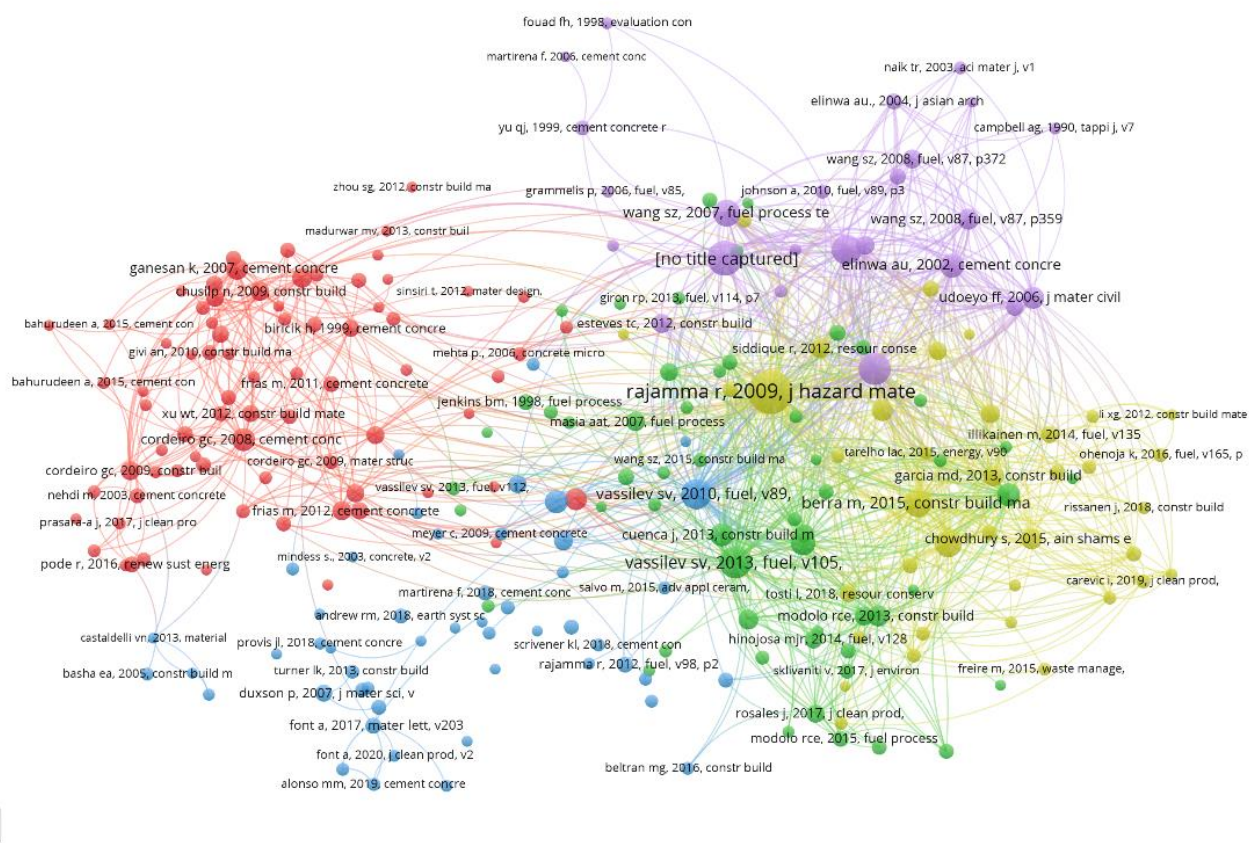


Fonte: Produção do próprio autor (2023).

É possível perceber um crescimento mais acentuado após o final dos anos 10 e uma leve queda no ano de 2021, essa queda pode ser um reflexo da própria pandemia de Covid-19.

A Figura 02 representa a rede de cocitações do primeiro crivo. A ideia de cocitações é criar agrupamentos para revelar o relacionamento interdisciplinar entre autores e organizações, a citação cruzada entre estudos pode implicar uma estrutura cognitiva social latente no domínio do conhecimento (CHANG *et al.*, 2021; JEONG *et al.*, 2014).

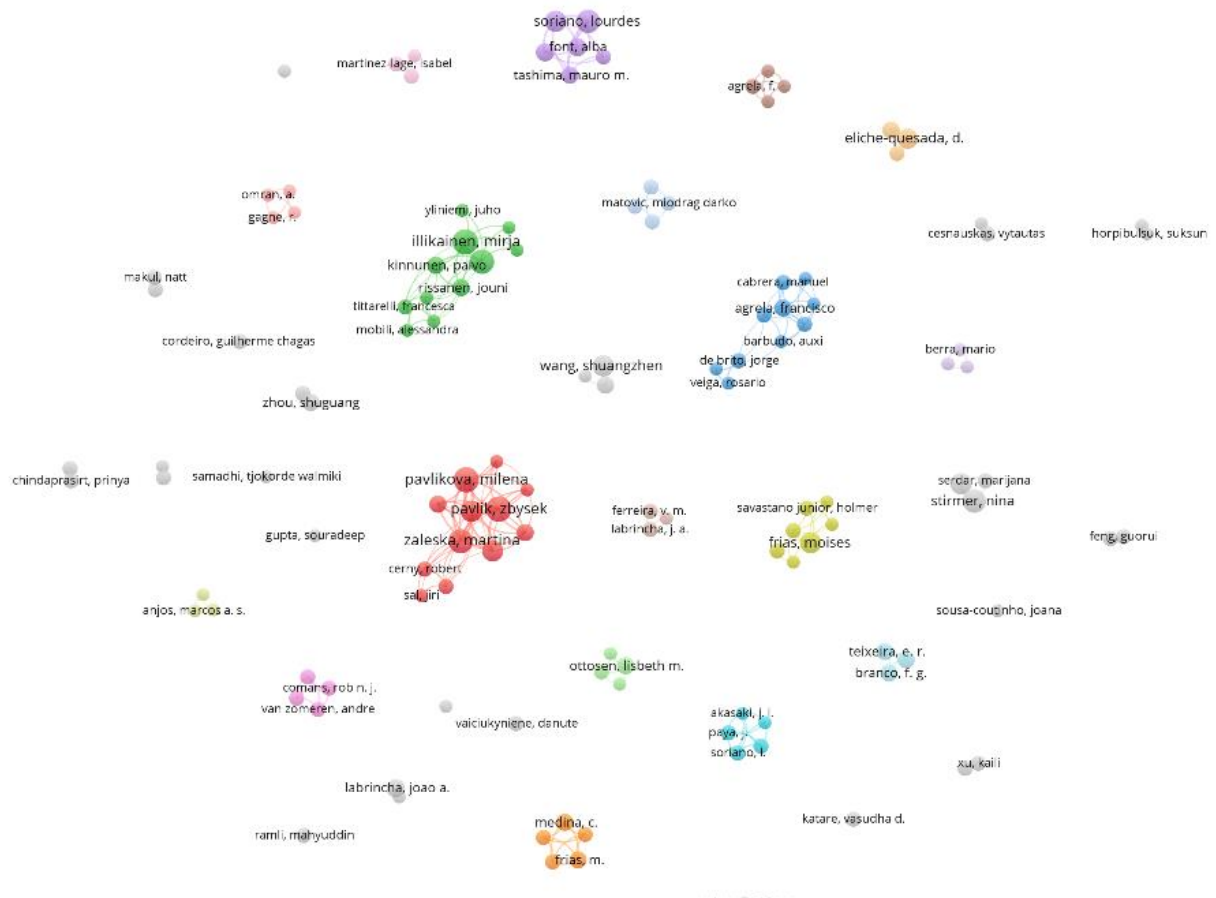
Figura 02 - Cocitação “biomass & ash & cement”



Fonte – VOSviewer (2023).

O artigo de Rejini Rajamma (RAJAMMA *et al.*, 2009) aparece como um dos que mais contém cocitações (296). É um artigo em si é um artigo de caracterização sobre o uso de cinzas volantes, “*fly -ash*”, em materiais a base de cimento.

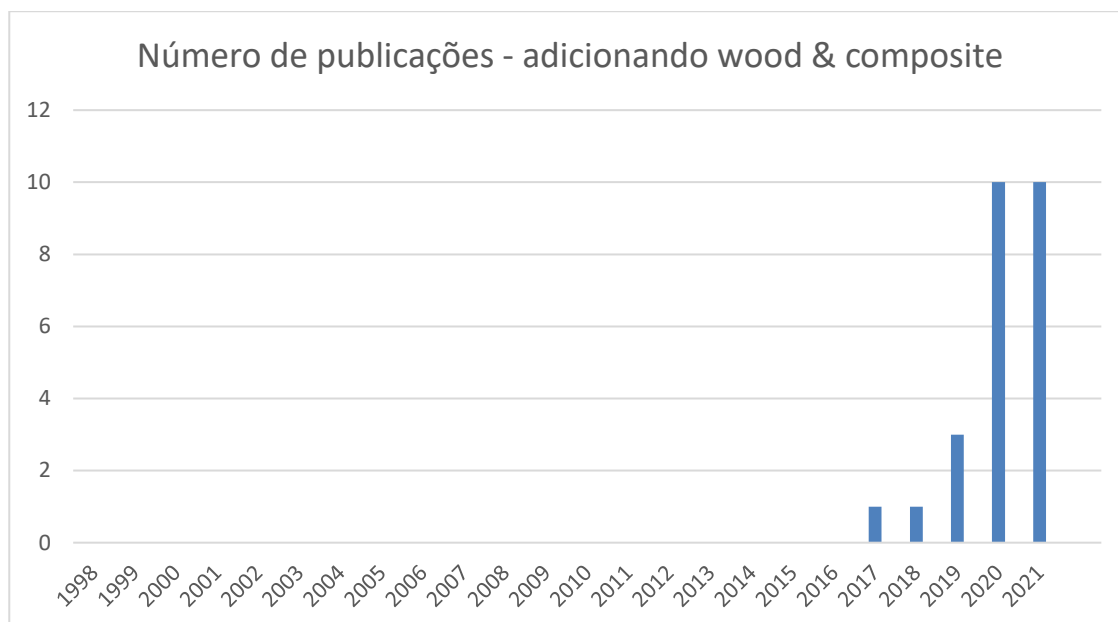
A Figura 03 apresenta uma rede de coautoria no mesmo crivo, indicando a relação entre pesquisadores.

Figura 03 - Coautoria “*biomass & ash & cement*”

Fonte – VOSviewer (2023).

A rede de coautoria é composta por sub-redes, apontando que a pesquisa é composta por pequenos grupos e que existe uma colaboração entre eles, no entanto esses grupos se comunicam pouco.

Na Figura 04 é possível ver os 25 trabalhos publicados adicionando o filtro “*wood*” e “*composite*” na seleção do crivo anterior nos últimos 25 anos.

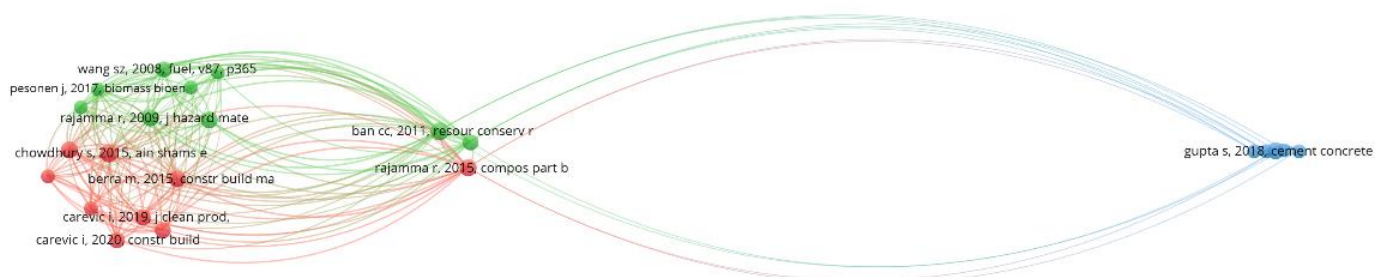
Figura 04 - Número de publicações adicionando “*wood & composite*”

Fonte: Produção do próprio autor (2023).

A figura 04 mostra que, dentro dos estudos de biomassa cimento e cinza, somente nos anos recentes (2017) começou a aparecer especificamente os termos de madeira e compósito. Provavelmente, por uma tendência mundial em se procurar materiais menos danosos ao meio ambiente, incentivada pela resolução 70/1 das Nações Unidas que divulga os objetivos de desenvolvimento sustentáveis (UNITED NATIONS, 2016).

A Figura 05 mostra a rede de cocitação entre esses autores que utilizam também os termos “*wood*” e “*composite*” em seus trabalhos.

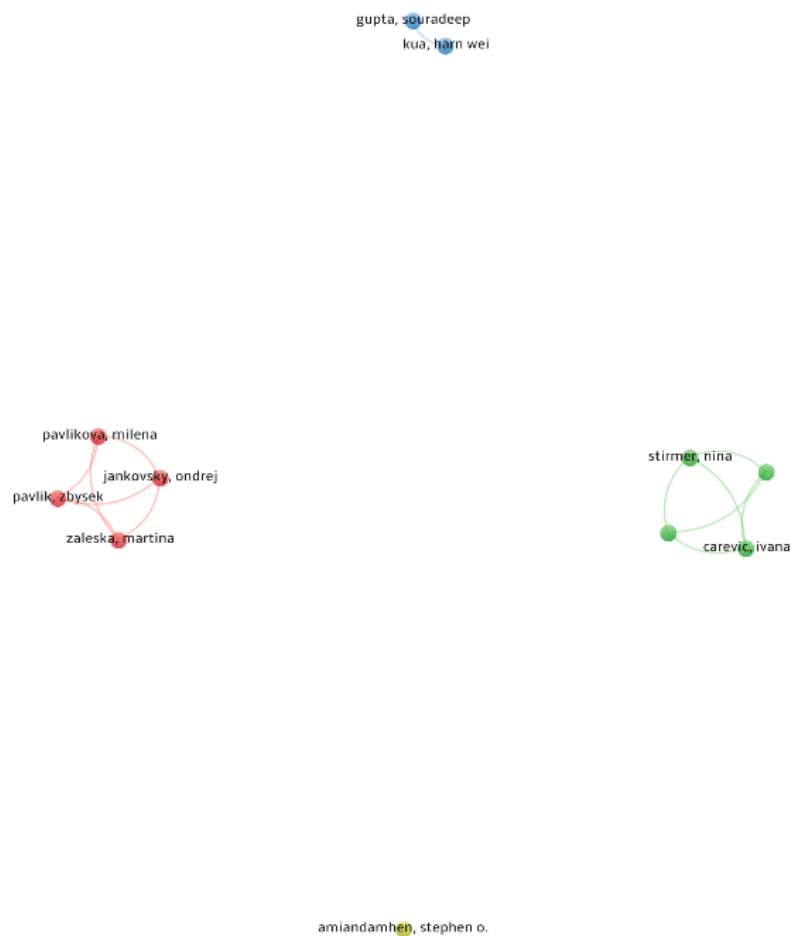
Figura 05 - Cocitação “wood” e “composite”



Fonte – VOSviewer (2023).

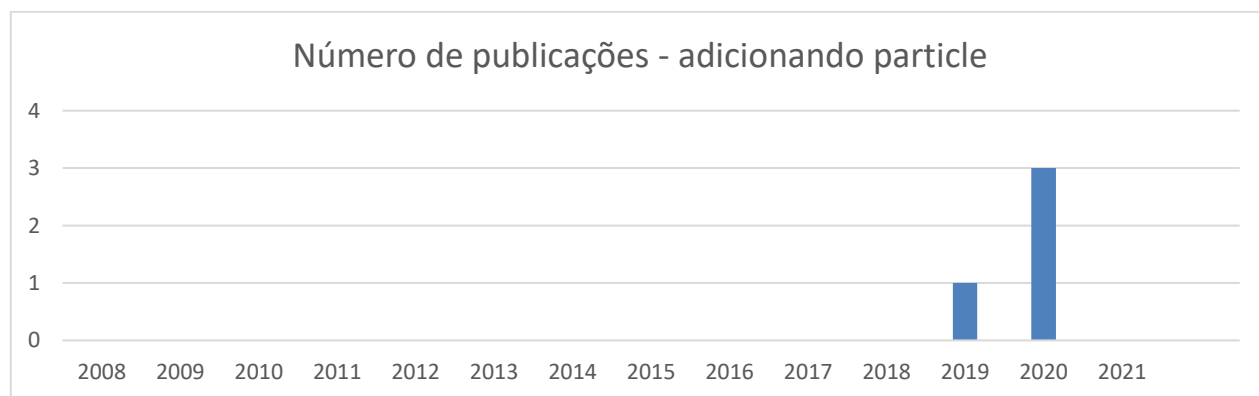
É possível observar que o autor Rejini Rajamma (RAJAMMA *et al.*, 2015) ainda é muito citado, 74 citações.

A Figura 06 apresenta a rede de coautoria filtrando o crivo inicial com a adição dos termos “wood” e “composite”, mais uma vez é claro notar que a rede de coautoria é composta por sub-redes.

Figura 06 - Co autoria “*wood & composite*”

Fonte – VOSviewer (2023).

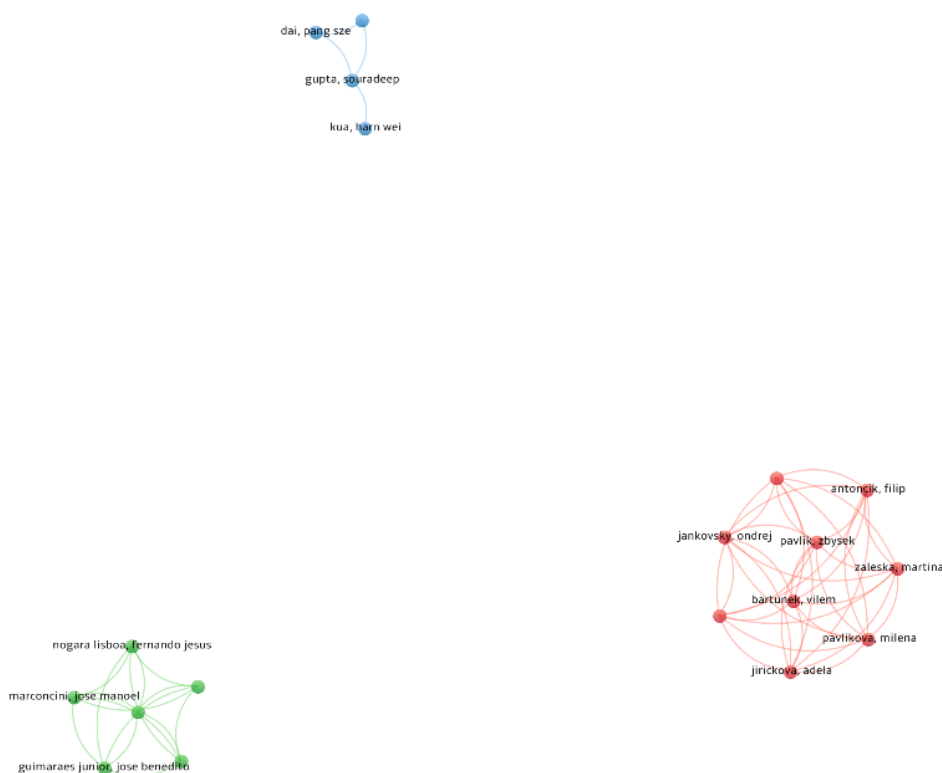
Em seguida foi aplicado o filtro “*particles*” juntamente aos anteriores, a Figura 07 demonstra o que 04 foi número total de publicações com esse adicional.

Figura 07 - Número de publicações adicionando “*particle*”

Fonte: Produção do próprio autor (2023).

Com a adição de “*particles*” não foi possível realizar uma análise de cocitação, muito provavelmente por conta do número baixo de publicações, no entanto a relação entre os autores é mais bem definida, como é possível observar na Figura 08.

Figura 08- Co autoria com adição de “*particles*”



VOSviewer

Fonte – VOSviewer (2023).

Por fim com a adição do termo “*eucalyptus*” na busca final o resultado não mostra nenhuma publicação, fica assim claro perceber que existe um espaço a ser preenchido na pesquisa de materiais compósitos que esteja ambientalmente de acordo com a sustentabilidade moderna.

3.2 REVISÃO DA LITERATURA

3.2.1 Cimento

Os materiais a base de cimento, como argamassas e concretos, são utilizados em larga escala devido às suas características de facilidade de produção, moldabilidade e resistências mecânicas elevadas, ocasionando diversos elementos na indústria da construção civil com fins tanto estruturais como não estruturais (MOHAMAD *et al.*, 2022).

Em massa, o cimento é o maior bem manufaturado do mundo. Materiais que utilizam cimento em sua composição são criados quando misturados com água e agregados minerais (por exemplo, o concreto). Depois da água, é a substância mais utilizada globalmente. O ambiente construído como o conhecemos na atualidade é, em grande parte, composto por esse material. O concreto e a argamassa são, ainda na atualidade, materiais de construção acessíveis e energeticamente eficientes (SCRIVENER *et al.*, 2018).

Cimento, como material, foi concebido há cerca de 4500 anos. O vocábulo cimento é derivado da palavra do latim “*cementu*” usada principalmente pelos romanos para denominar a união de pedras naturais advindas de rochedos de calcário com cinzas vulcânicas da região de Pozzuoli (GRANDE, 2003).

Os cimentos utilizados hoje em dia são derivações do que é conhecido como Cimento Portland. Esse composto data do início dos anos de 1820 e teve sua patente reconhecida na Inglaterra por Joseph Aspdin em 1824, no entanto a produção real de cimento Portland, de maneira que fosse distinguível do cimento romano ou da Cal hidráulica só ocorreu perto do ano de 1850 (HALSTEAD, 1961).

O cimento Portland é feito a partir da queima e mistura do calcário bruto e argila em alto-forno. Inicialmente os materiais são triturados e misturados, em seguida passam por esse processo de cozimento e se transformam em um pó chamado farinha de cru. Após resfriamento essa “farinha de cru” é chamada de clínquer. Em seguida, são adicionados gesso, resíduos do processo de fabricação de ferro, escória e calcário (FIGURA 09). Faz-se então uma nova moagem até obter um pó bem fino, o cimento comercial (BATTAGIN, 2009).

Figura 09 - Clínquer antes da moagem



Fonte – International Materials (2023).

Este cimento se apresenta como um pó fino com propriedades aglutinantes, aglomerantes e ligantes que tem a capacidade de se enrijecer com adição de água. A água provoca o endurecimento do cimento através de um processo chamado hidratação. A hidratação é uma reação química na qual os principais compostos do cimento formam ligações químicas com moléculas de água e tornam-se hidratos (BYE, 1983).

Na reação de hidratação apenas os silicatos de cálcio contribuem para a resistência. O silicato tricálcico (C_3S), também conhecido como alita, é responsável pela maior parte da resistência inicial (primeiros 7 dias). O silicato dicálcico (C_2S), belita, reage mais lentamente, contribui apenas para a resistência em momentos posteriores. Após a adição de água, a alita reage rapidamente para liberar íons cálcio, íons hidróxido e uma grande quantidade de calor. O pH sobe rapidamente para mais de 12 por conta da liberação de íons hidróxido alcalino (OH^-). Esta hidrólise inicial diminui rapidamente, resultando em uma diminuição no calor liberado (RIXOM *et al.*, 1986).

A reação continua lentamente produzindo íons cálcio e hidróxido até que o sistema fique saturado. Uma vez que isso ocorre, o hidróxido de cálcio começa a cristalizar. Simultaneamente, o hidrato de silicato de cálcio começa a se formar. A formação dos cristais de hidróxido de cálcio e hidrato de silicato de cálcio fornece "sementes" sobre as quais mais hidrato de silicato de cálcio pode se formar. Os cristais de hidrato de silicato de cálcio

tornam-se mais espessos, tornando mais difícil para as moléculas de água atingirem a alita não hidratada. A velocidade da reação é controlada neste momento pela taxa na qual as moléculas de água se difundem através do revestimento de hidrato de silicato de cálcio (RIXOM *et al.*, 1986).

A evolução da produção de cimento está ligada diretamente à atividade econômica e aos níveis de industrialização e desenvolvimento de infraestrutura. A intensidade da demanda de cimento tem uma tendência de diminuir em países mais desenvolvidos e aumentar em países em desenvolvimento (STAFFORD *et al.*, 2016).

De acordo com o Sindicato nacional das indústrias de cimento do Brasil o consumo anual de 2021 teve um aumento de 1,6% em relação à 2020, totalizando no ano quase 65 milhões de toneladas de cimento vendidas (SNIC, 2021).

No Brasil, existem algumas variações de cimento Portland classificados pela Associação Brasileira de Cimento Portland. Os diferentes tipos recebem são classificados de acordo com a sigla CP seguida de algarismos romanos de I a V, denotando os tipos básicos e classificações adicionais de outra sigla, de acordo com sua composição e propriedades conforme Tabela 01 a seguir (CNI, 2017).

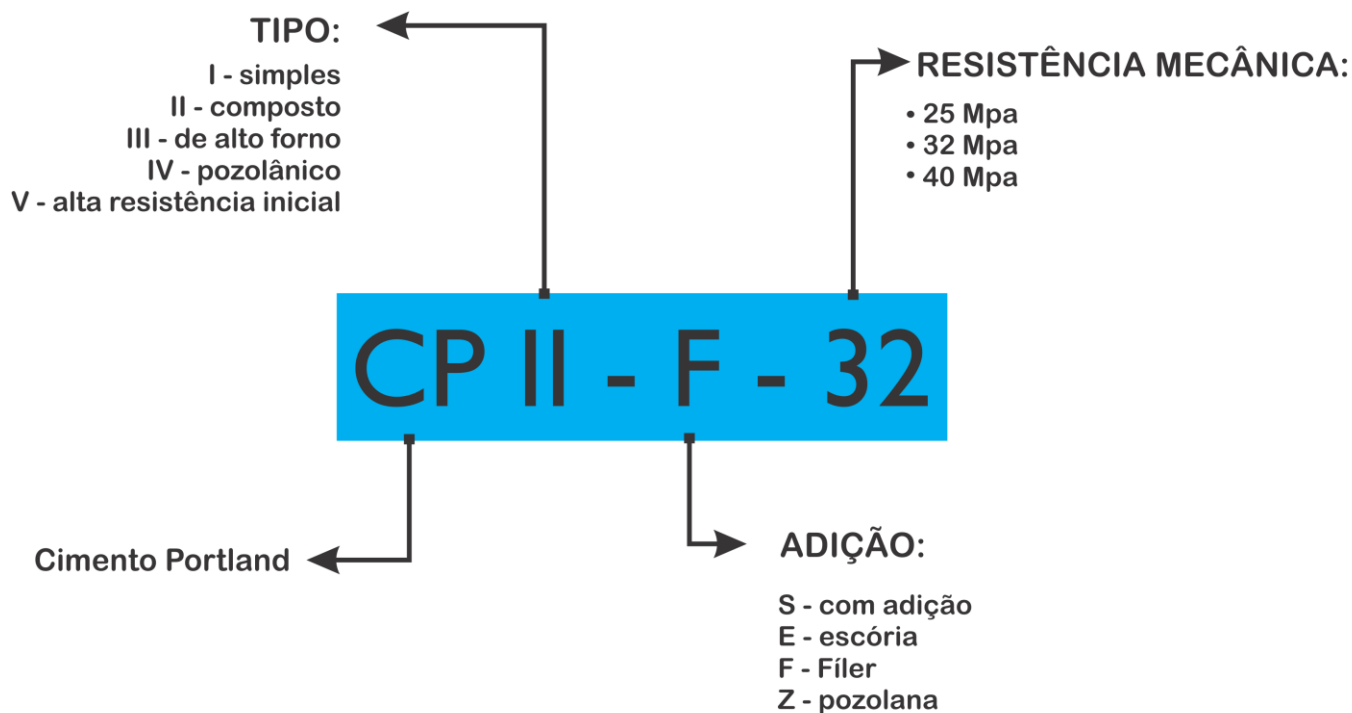
Tabela 01 – Tipos de Cimento

	Sigla	Diferencial
Cimento Portland Comum	CP I	Cimento comum
Cimento Portland Comum com adição	CP I - S	Cerca de 5% de material pozolânico
Cimento Portland Composto	CP II	Cimento comum com adição de material (E, Z ou F)
Cimento Portland Composto com escória	CP II - E	Adição de 6% a 34% de escória de alto forno
Cimento Portland Composto com Pozolana	CP II - Z	Adição de 6% a 14% de material pozolânico
Cimento Portland Composto com Fíler	CP II - F	Adição de 6% a 10% de fíler de calcário
Cimento Portland de Alto-Forno	CP III	Adição de 35% a 70% de escória de alto forno
Cimento Portland Pozolânico	CP IV	Adição de 15% a 50% de material pozolânico
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	CP V - ARI	Moagem mais fina, clínquer mais tempo no moinho
Cimento Portland Resistente a Sulfatos	CP(X) RS	Cimentos que resistem a meios sulfatados
Cimento Portland Baixo Calor de Hidratação	CP(X) BC	Geram até 260 J/g e até 300 J/g aos 3 dias e 7 dias
Cimento Portland Branco	CP B	Baixos teores de óxidos de ferro e manganês

Fonte – Associação Brasileira de Cimento Portland (2022).

Em suma a nomenclatura do cimento no Brasil pode ser entendida conforme a Figura 10.

Figura 10- Nomenclatura cimento no Brasil



Fonte: Produção do próprio autor (2023).

De acordo com o fabricante Liz-cimentos o cimento tipo CP V pode ser utilizado em elementos pré-moldados como pilares, vigas, postes, pavers e concreto protendido, possui alta resistência inicial e final seu preço é mais alto uma vez que é vendido em sacos de 40 quilos e seu preço é relativamente igual aos demais que são vendidos em sacos de 50 quilos (LIZ CIMENTOS, [s. d.]).

O cimento CII-E32 de acordo com a Votorantim cimentos, é indicado para todas as obras. Esse tipo de cimento contém adição de escória granulada de alto-forno, o que faz com que o cimento possua um calor de hidratação reduzido. De acordo com a ficha técnica pode possuir de 51% a 94% de mistura de clínquer e gesso. Não possui material pozolânico e é recomendado para aplicações em estruturas que precisem de um desprendimento de calor moderadamente lento (VOTORANTIM CIMENTOS, [s. d.]).

O cimento do tipo CII-F32 de acordo com o fabricante Liz - cimentos, também é indicado para todas as obras. Esse tipo de cimento contém adição de filer de calcário entre 6% e 10%, ainda de acordo com a ficha técnica do fabricante este cimento pode possuir de

75% a 89% de mistura de clínquer e gesso e não possui material pozolânico (LIZ CIMENTOS, [s. d.]).

A produção total estimada de cimento mundial no ano de 2018 foi de 4.4 bilhões de toneladas. A maior parte desta produção é feita pela China, 54,5%, seguida, pela Índia, União Europeia, Estados Unidos, Turquia, Indonésia, Coréia do Sul, Japão, Rússia e Brasil (LIM *et al.*, 2020).

A importância do cimento no desenvolvimento humano é inegável, a produção anual de cimento por ser de escala massiva também é no entanto responsável pela deposição, no meio ambiente, de cerca de 1,5 bilhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) (DANRAKA *et al.*, 2019). Esse fato vai contra os objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU.

Nos últimos anos, essa atenção a fatores ambientais tem crescido. Mesmo existindo incertezas sobre as mudanças climáticas a comunidade científica sabe precisar que as mudanças são antropogênicas, em outras palavras, advindas da atividade humana (VILLAS-BÔAS *et al.*, 2020).

A liberação de gás carbônico ocorre no processo de produção do cimento tanto na conversão de Calcita, em óxido de Cálcio quanto na combustão de combustíveis fosseis utilizada no aquecimento da matéria prima (TOSTI *et al.*, 2020).

No total de gases responsáveis pelas emissões antropogênicas do efeito estufa mais de 6% são atribuídas ao setor de cimento. A fabricação de Cimento Portland Comum (CPC) produz em média 842 kg de CO₂ por tonelada de clínquer (KLEIB *et al.*, 2021).

O setor da construção necessita de materiais alternativos e de substituição para o cimento devido ao seu sistema de produção caro e com impactos negativos sobre o meio ambiente, devido à poluição gerada pelo sistema produtivo. Uma maneira de lidar com o consumo excessivo de cimento é diminuir a dependência de produtos com uso exclusivo cimentício no ambiente de construção, apresentando subprodutos que possam ter origem local, para diminuir o consumo de carbono da cadeia de suprimentos, como material cimentício de reforço com agregados (TAMANNA *et al.*, 2020).

Este é um dos motivos que resíduos de outras indústrias têm sido incorporado no processo de fabricação do cimento. Ao longo dos anos vários resíduos foram usados, por exemplo, cinzas volantes, sílica ativa, cinza de fundo, escória de alto-forno granulada moída, pó de vidro residual e resíduos de madeira (USMAN *et al.*, 2018).

Quantidades cada vez maiores de resíduos industriais vêm sendo produzidos de forma rápida devido a urbanização e industrialização de países emergentes. O gerenciamento destes resíduos se tornou uma questão crítica. A gestão desses resíduos de forma eficaz e

eficiente é uma área de pesquisa em constante crescimento. O esgotamento dos recursos naturais na criação de ambientes construídos levantou ainda mais preocupações do ponto de vista da sustentabilidade do cimento (SHI *et al.*, 2016).

Além da emissão de gases de efeito estufa associados à produção, outros grandes desafios incluem problemas de degradação ambiental com o consumo de recursos de maneira extensiva e o grande consumo de energia (AKINYEMI; DAI, 2020). Chen *et al.* (2010) e Ye *et al.* (2013) citam que o consumo de energia por quilograma produzido de clínquer chega a 850 kcal (CHEN *et al.*, 2010; YE *et al.*, 2013).

A dependência excessiva de carvão e calcário, fornos obsoletos, calcinação direta e a falta de tecnologias mais recentes foram listados como os principais fatores que contribuem para o impacto ambiental causado pela produção de cimento (AHMED *et al.*, 2021).

A fabricação de cimento, mineração de agregados e moagem prejudicam o delicado equilíbrio ecológico, pois esgotam os recursos naturais, consome grande quantidade de energia, emite enormes quantidades de poeira e gases de efeito estufa que traz sérios problemas de saúde aos habitantes (LI *et al.*, 2019).

O Brasil e outros países produtores como Argentina e México utilizam cerca de 7 a 20 % de combustíveis alternativos na produção. A Holanda, que utiliza quase 83% de combustíveis alternativos e alguns países da União Europeia utilizam cerca de 30% de combustíveis alternativos na produção de cimento (LIM *et al.*, 2020).

A valorização de materiais residuais em compósitos cimentícios apresenta uma abordagem econômica, viável e ecológica para a gestão de resíduos. Resíduos de madeira de serrarias representam materiais de crescente relevância, principalmente no desenvolvimento de novos materiais. Embora os resíduos de madeira tenham encontrado interesse contínuo na geração de bioenergia, a utilização desses materiais em cimento e concreto pode ajudar a reduzir a pegada de carbono e as emissões de processos industriais mais convencionais (AMIANDAMHEN *et al.*, 2021).

O uso de resíduos de madeira, ao invés de fibras de madeira, em materiais compósitos tem sido destacado por diversos estudos como uma excelente forma de reduzir o descarte de madeira em aterros. Além disso, uma série de trabalhos focados na reciclagem e reutilização de resíduos de madeira como agregados em concreto ou argamassa, vem se tornando uma solução sustentável e avançada para materiais de construção (LI *et al.*, 2019).

Há muito tempo, materiais compósitos leves têm sido estudados, especialmente para emprego em construções de alvenaria, uma vez que oferecem alta relação resistência: peso, baixa condutibilidade térmica e boas características de isolamento acústico. Essencialmente,

os materiais utilizados para a fabricação desses compósitos são: aglomerantes (usualmente, cimento Portland), água e agregados miúdos e graúdos (POSI *et al.*, 2013).

Mudanças como a substituição de materiais que causam impacto ambiental na produção de cimento, inclusão de materiais de substituição na produção de clínquer, melhorias tecnológicas no processo de calcinação, eficiência tecnológica ou mesmo o uso de cinzas estão sendo considerados para alcançar o objetivo de uma produção mais limpa (SHARMA; ARORA, 2018).

A questão do reaproveitamento de resíduos para a produção de materiais alternativos de cimento é bastante ampla e de importância significativa quando se trata de questões de sustentabilidade. Levando isso em conta novos compostos, como o polímero de celulose nanofibrilada, têm sido propostos, reduzir o impacto ambiental causado pela produção de cimento Portland (SANTOS *et al.*, 2021).

Entre os resíduos sólidos utilizados para a substituição parcial dos materiais cimentícios os seguintes são mencionados na literatura: resíduos florestais, cinzas, resíduos plásticos, e geopolímeros. Uma das formas de lidar com o consumo excessivo de matérias-primas é reduzir a dependência do cimento tradicional, criando uma demanda por cimento produtos alternativos (TAMANNA *et al.*, 2020). Alguns pesquisadores pretendem substituir materiais que causam impacto ambiental na produção de cimento, seja essa substituição feita por melhorias tecnológicas ou pela simples adição de material residual, como é o caso das cinzas (SHARMA; ARORA, 2018).

As cinzas da queima de carvão mineral têm sido amplamente pesquisadas como material suplementar ao cimento. É considerado uma fonte de recursos que existirá por muito tempo, uma vez que há muitos países ricos em carvão, e sua estrutura energética é fortemente baseada nesta tecnologia (ZHUANG *et al.*, 2016).

No entanto os benefícios que os materiais alternativos de cimento podem trazer quando relacionados ao cimento Portland comum devem ser confrontados com os impactos que as matérias-primas podem representar no meio ambiente, assim como com qualquer material novo, eles devem ser estudados, pois sua interação ambiental ainda não existe (PASSUELLO *et al.*, 2017).

3.2.2 Setor econômico florestal

O aporte econômico, ambiental e social no setor florestal de espécies não nativas é extremamente expressivo no Brasil. O Setor Florestal é considerado proeminência na cadeia produtiva da economia brasileira. No ano de 2020, o valor da produção do setor foi de R\$ 116,6 bilhões de reais, um aumento de mais de 17% em relação a 2019, em um total de 50 atividades que representam toda a economia nacional; a cadeia produtiva de árvores plantadas aparece na 22ª posição em termos de contribuição do produto interno bruto (PIB) brasileiro (IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2021) (IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019) .

No Japão, as florestas cobrem 66% da parte de terra do país, tornando-o um dos países com área florestal mais densa do mundo, e o uso de madeira doméstica implica em quase 30% de toda a madeira utilizada no país. “*Hinoki*” (*Chamaecyparis obtusa*), é um dos tipos de madeira mais utilizados desde os tempos antigos no país como um material de construção para templos e santuários. O templo Horyuji (FIGURA 11), na cidade de Nara, uma das estruturas de madeira mais antigas do mundo, foi construído com essa madeira. Em adição a isso, o Hinoki é atualmente usado como material para paredes, pisos, banheiras, lâminas de tênis de mesa, copos de saque, móveis, tábuas de cortar, esculturas e assim por diante (FUJIKAKE, 2007; UKYO *et al.*, 2021).

Figura 11 – Templo de Horyuji



Fonte: Próprio autor (2021).

Ao longo dos anos, a madeira foi utilizada de diversas maneiras, tábuas de pequenas e grandes dimensões, vigas ou até mesmo na forma de maneira maciça. Com a diminuição da disponibilidade de árvores de diâmetros grandes, e com a sustentabilidade em voga, novos produtos de madeira reconstituída foram surgindo onde fosse possível utilizar árvores de diâmetro reduzido ou até mesmo resíduos do processamento madeira (IRLE *et al.*, 2012).

Muitos desses produtos de madeira reconstituída são classificados de acordo com a indústria madeireira como painéis de madeira. Os painéis são utilizados na fabricação de móveis, elementos estruturais, construção civil ou até mesmo pisos (MATTOS *et al.*, 2008).

A utilização e aproveitamento de produtos de madeira têm aumentado nos últimos anos, não somente no Brasil, mas no mundo como um todo. Produtos à base de madeira são reconhecidos como a matéria-prima fundamental em uma miríade de outras indústrias, como mobiliário, pisos, construção naval, embalagem e diversos segmentos da construção. O

consumo brasileiro de produtos à base de madeira cresceu quase 16% no ano de 2017 quando comparado com o ano de 2016 (VARANDA *et al.*, 2018).

As florestas de Pinus são a principal fonte de matéria-prima na fabricação de produtos engenheirados sólidos de madeira, tendo um volume exportado no ano de 2020, de quase 2 milhões e meio de metros cúbicos, um aumento com relação a 2019 de cerca de 20% (IBÁ, 2021)

Toda essa produção acarreta em um possível acúmulo de resíduo, no entanto, entende-se que existe uma mudança em como a sociedade encara o resíduo madeireiro, o que no passado podia ser entendido como lixo, ou sem utilidade, hoje em dia está sendo entendido como resíduo e aceito como matéria prima em outros processos (PARCHEN, 2012).

3.2.3 Painéis de madeira e cimento

Devido à sua natureza inerentemente frágil, os materiais cimentícios podem se degradar quando expostos as intempéries ambientais. Eles normalmente têm fortes resistências à compressão, mas baixas à flexão, e a combinação dessas características tem um grande impacto em quanto tempo eles duram (SHARMA; ARORA, 2018).

Historicamente os painéis de madeira-cimento geram interesse devido às suas aplicações potenciais no setor de construção (HACHMI *et al.*, 1990). Painéis de cimento-madeira assim como painéis com tecnologia mais recente como resina a base de mamona, possuem certas vantagens sobre os painéis de partículas mais tradicionais, como resistência ao apodrecimento, fogo e exposição ao ar livre (FERRO *et al.*, 2019).

Os painéis de madeira-cimento (PMC) e sua aplicação na construção civil foram rapidamente aceitos em muitos países devido às suas excelentes propriedades. Os PMCs apresentam alta resistência a fogo, insetos e fungos, além de boa resistência às intempéries e isolamento acústico (WEI *et al.*, 2000).

Em países como o Japão a cultura de utilizar estes painéis em ambientes que corram o risco de incêndio já existe há muitos anos (FIGUEIREDO LATORRACA; IWAKIRI, 2000; KASAI *et al.*, 1995), a Figura 12 demonstra a utilização de tais painéis como forro de uma madeireira, no ambiente interno e externo, nos arredores da cidade de Gifu.

Figura 12- Forro de cimento-madeira – Japão



Fonte: Próprio autor (2021).

Nos painéis de cimento-madeira, o cimento substitui a resina termofixa do tipo uréia-formaldeído uma vez que o cimento endurece por reações exotérmicas provocadas pela hidratação na presença de água (IWAKIRI; PRATA, 2008).

Resíduos de madeira podem ser usados juntamente ao cimento, por apresentarem densidade reduzida, como material de isolamento térmico para forro de edifícios e oferecem melhor perfil ambiental quando comparados aos materiais isolantes inorgânicos convencionais (CETINER; SHEA, 2018).

O uso de resíduos de madeira em substituição às fibras de madeira em produtos cimentícios tem sido destacado por diversos estudos como uma excelente forma de reduzir o descarte de madeira em aterros sanitários e o uso em geral e fibras vegetais em materiais cimentícios oferecem propriedades térmicas e hídricas interessantes ao produto final (LI et al., 2019).

Alguns autores relatam que existe uma correlação direta entre atributos de hidratação e as propriedades mecânicas do material compósito, como, por exemplo, tensão de compressão, módulo de ruptura e módulo de elasticidade do material produzido (WEI et al., 2000).

Em vários países, os compósitos de madeira-cimento são frequentemente empregados na construção de edifícios. Para algumas espécies de madeira, no entanto, a produção desse material é restrita devido à incompatibilidade entre madeira e cimento, pois alguns extrativos da madeira impedem a pega e a hidratação do cimento (NA et al., 2014).

Um dos problemas mais citados com esse tipo de material compósito é a compatibilidade da madeira e do cimento, principalmente devido a açúcares e extrativos da madeira que podem impedir a cura do cimento (WEI et al., 2000).

De acordo com Nasser et al. (2016) o tipo de matéria-prima, o tamanho das partículas de madeira, a densidade da placa e a proporção de madeira para cimento são os elementos de processamento mais significativos que têm impacto nas qualidades dos compósitos. Pesquisas mostraram que nem todas as espécies de madeira funcionam bem com cimento devido ao impacto desfavorável de alguns extrativos na pega do cimento (NASSER et al., 2016).

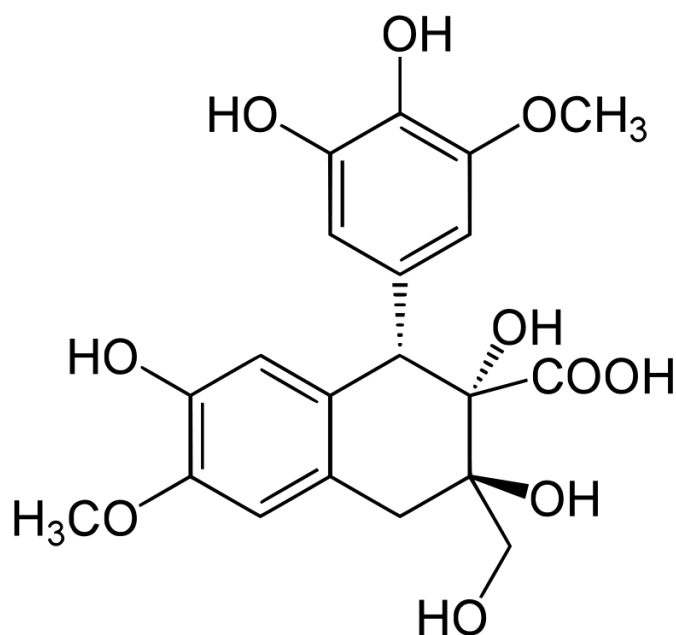
Karede (2010) fez um levantamento similar onde demonstra que a compatibilidade madeira-cimento pode ser afetada por vários fatores, como tipo de espécie, tipo de cimento, parte da árvore, estação do corte de madeira, relação quantidade de madeira para a quantidade de cimento, condição de armazenamento e assim por diante (KARADE, 2010).

Na literatura encontram-se alguns motivos para essa possível incompatibilidade, ou inibição, entre a madeira e o cimento. O primeiro e mais comum é, que os extrativos da madeira podem influenciar diretamente na cura do cimento. Isso ocorre, pois, a madeira possui vários extrativos orgânicos que, quando em contato com íons metálicos da solução de cimento, diminuem a concentração de Ca^{2+} . Isso atrapalha o equilíbrio da reação natural do cimento fazendo com que o começo da nucleação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ seja atrasado assim como a formação de gel de CSH. Outro possível motivo para tal é a formação, por parte destes compostos orgânicos, de uma fina camada de absorção nas superfícies dos grãos de cimento o que por sua vez atrapalha diretamente a hidratação do material (HACHMI et al., 1990; NA et al., 2014).

Yasuda, Ima e Matsushita (2002) mencionam que glicose e sacarose são os principais inibidores do endurecimento do cimento quando misturado com a madeira japonesa Hannoki (*Alnus japonica*) uma vez que esses compostos são metabolizados mesmo após o corte.

Existem duas categorias para os inibidores típicos do endurecimento do cimento com madeira que foram identificados. A primeira categoria é combinada de compostos fenólicos que possuem uma unidade catecólica de ácido plicático (FIGURA 13) a outra é composta por carboidratos como sacarose (YASUDA et al., 2002).

Figura 13 - Ácido plicático



Fonte: Comparative Toxicogenomics Database - adaptado (2022).

O ácido plicático é um ácido carboxílico do grupo de ácidos resinosos. É geralmente encontrado em madeira de *Thuja*, resina de *Cipreste* assim como em *Cryptomeria japonica* (*Sugi*) (AYARS *et al.*, 1989).

Também é observado que mesmo pequenas quantidades de hemicelulose podem influenciar diretamente no processo de endurecimento e cura do compósito cimentício, assim como na hidratação da pasta no geral (GOVIN *et al.*, 2005).

O nível de compatibilidade deve, então, ser avaliado para identificar se a madeira é adequada para a produção de compósitos madeira-cimento. Atualmente, alguns métodos de avaliação foram desenvolvidos para classificar a madeira de várias espécies quanto à sua compatibilidade com o cimento com base no calor ou temperatura de hidratação, resistência, condutividade elétrica e morfologia. Para aumentar a aptidão de algumas espécies de madeira para a fabricação de placas compostas de madeira-cimento, é comum adicionar produtos químicos inorgânicos, conhecidos como aceleradores, para acelerar a cura do cimento ou utilizar pré-tratamentos como extração aquosa para remover substâncias inibitórias da madeira (NA *et al.*, 2014).

Ainda assim alguns tipos de madeira são bastante utilizados em painéis de cimento-madeira que são feitos na Europa e na Ásia desde 1940, devido a sua boa resistência ao apodrecimento e a baixa presença de agentes xilófagos. Esses tipos de painéis são empregados em vários usos na construção civil como forro e painéis de isolamento, devido a suas boas propriedades acústicas (BERGER *et al.*, 2020).

3.2.4 Uso de biomassa na indústria

O emprego de biomassa para geração de energia é uma atividade que ocorre em razão de suas vantagens ambientais e econômicas. O aproveitamento pode acontecer à partir de diferentes fontes renováveis de biomassa, como o carvão vegetal, a lenha e resíduos de origem vegetal, poda urbana, casca de árvore, pó de serra, entre outros (SIMIONI *et al.*, 2018).

É considerada prática padrão no processamento de produtos de madeira em caldeiras de pequena escala utilizar resíduos de madeira como fontes primárias de energia para processos industriais. Além disso, há quase nenhuma ou muito pouca emissão ao usar controles de emissão adequados, como um precipitador eletrostático, tornando-o um combustível ambientalmente limpo. Devido à diminuição da geração de cinzas volantes e outros resíduos, os resíduos de madeira são escolhidos como combustíveis em detrimento de outras biomassas como as herbáceas e as agrícolas (CHOWDHURY *et al.*, 2015).

Biomassa de origem florestal oferece um potencial interessante no país, que conta com quase 9 milhões de hectares de florestas plantadas (IBÁ, 2021). O resíduo florestal é o material que resulta do processamento ou da colheita da madeira que possa permanecer, por algum motivo permanecer sem utilização definida durante o processo produtivo de um determinado produto (HANSTED *et al.*, 2022).

Atualmente, os resíduos de madeira representam uma grande parcela dos resíduos das atividades industriais, denotando grande impacto econômico e importância ambiental. No entanto, o potencial de reciclagem desse tipo de resíduo é subutilizado, principalmente pela falta de alternativas ambientalmente corretas (BERGER *et al.*, 2020).

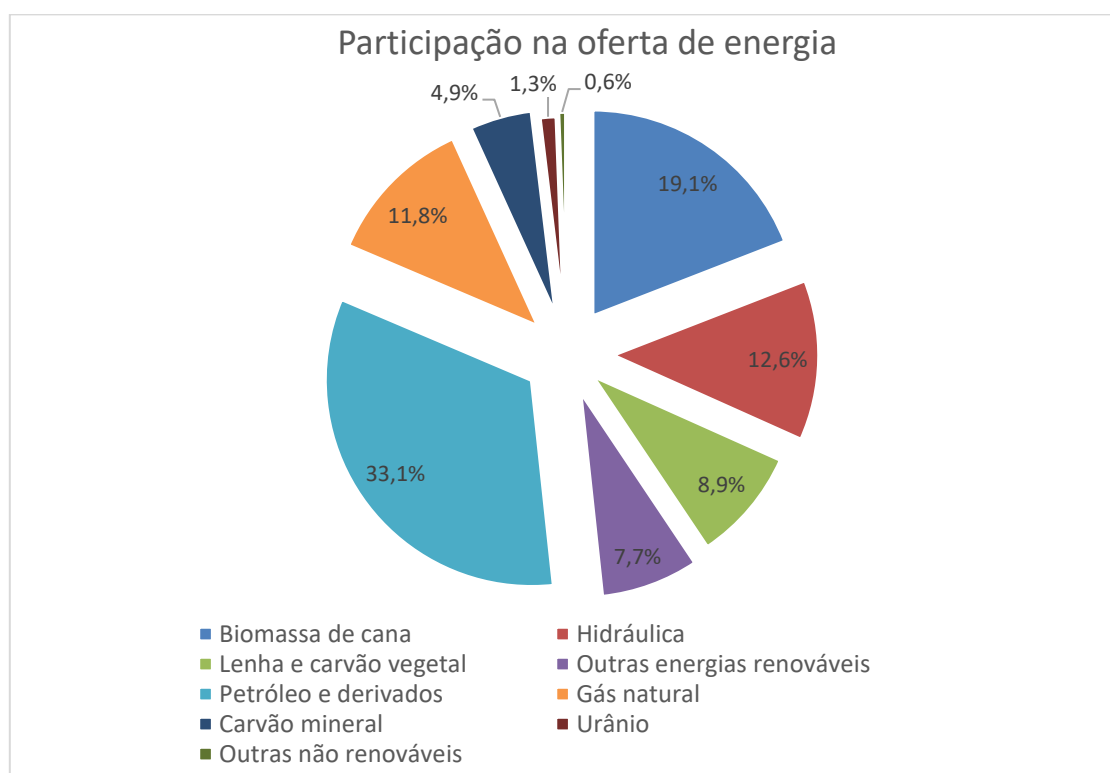
A biomassa florestal é um recurso renovável que pode ser considerado substituto da energia fóssil, principalmente para produtos que requerem uso intensivo de carbono e energia, como cimento, alumínio e aço, sendo assim, a demanda por florestas plantadas está consequentemente aumentando para evitar a pressão para explorar as florestas naturais. Além disso, a necessidade de produtos mais homogêneos com características conhecidas que permitem otimizar os processos industriais impulsionou o setor florestal (SIMIONI *et al.*, 2018).

A geração de energia a partir de fontes renováveis também é atualmente utilizada no setor florestal no Brasil, um exemplo disso são as indústrias de papel e celulose, e as fábricas de painéis de madeira que fazem uso de resíduos durante o processo produtivo. Este material renovável considerado “CO₂ neutro” sendo uma alternativa amplamente disponível para

fornecimento de energia, estima-se que mais de 60% dos resíduos nas indústrias do campo florestal sejam destinados à queima em caldeiras adaptadas para biomassa. Tal prática reduz o uso de combustíveis fósseis, gerando energia para as indústrias na forma de vapor, ar quente ou eletricidade por meio da cogeração. Ao fazer isso, é viável reduzir a dependência energética de fontes externas e reduzir custos (HANSTED, A. L. S. *et al.*, 2022).

De acordo com a EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2021), a participação de itens renováveis na matriz energética brasileira foi marcada no ano de 2021 pelo aumento da oferta de biomassa com um recuo de 5.6% em derivados do petróleo entendendo que a matriz energética brasileira se comporta atualmente como a Figura 14.

Figura 14 – Participação na oferta de energia



Fonte: Relatório BEN – adaptado (2021).

A biomassa lignocelulósica que pode ser utilizada para geração de energia pode ser amplamente classificada nas seguintes categorias: lenhosa, herbácea, aquática, agroflorestal e de resíduos. Os resíduos florestais podem variar de serragem, casca ou outro material não utilizado no processo produtivo. Cada uma dessas categorias possui características físico-químicas distintas, que podem resultar em diferentes comportamentos térmicos. Mais de uma categoria é frequentemente utilizada ao mesmo tempo, o que dificulta a previsibilidade do processo (BISWAS *et al.*, 2017; FERMANELLI *et al.*, 2020).

O material de biomassa é queimado diretamente em caldeiras, atingindo temperaturas de aproximadamente 900°C. O material inserido deve idealmente ser transformado em energia. No entanto, a eficiência pode não atingir todo o seu potencial uma vez que as condições iniciais de resíduos não são controladas em termos de umidade e impurezas. Uma dificuldade adicional que pode ser encontrada neste sistema é a geração de cinzas (cinzas de fundo e cinzas volantes), que consistem em materiais minerais que não queimam e se acumulam nas caldeiras (HANSTED *et al.*, 2018).

Um dos fatores que pode influenciar e até funcionar como limitante no critério de seleção energético da biomassa é o teor de cinzas. Este teor de cinzas pode ser influenciado pelo uso de resíduos uma vez que existe um menor controle da matéria-prima. Um exemplo é a presença de palha de cana ou casca de árvore na biomassa podendo aumentar significativamente o teor de cinzas, quando comparado a biomassa sem resíduos acarretando perdas significativas do poder calorífico (HANSTED *et al.*, 2018; T. NAKASHIMA *et al.*, 2017).

Caldeiras que utilizam biomassa são consideradas como fontes de energia renovável, uma vez que se mostram como alternativa a caldeiras de combustíveis fósseis, existe uma diferença significativa na emissão de gases nocivos quando se compara as duas matérias primas. Em adição a emissão reduzida, outra vantagem que a caldeira que utiliza biomassa tem sobre a caldeira de combustível fóssil é a baixa pegada de carbono por se tratar de combustível renovável vegetal (KAUKO *et al.*, 2020).

3.2.5 Cinzas e seu uso no cimento

Nos últimos anos, as pressões sobre o meio ambiente global e a segurança energética levaram a um aumento da procura de fontes de energia renováveis e à diversificação da oferta energética. Entre estes recursos a biomassa pode exercer um papel importante, uma vez que é considerada uma fonte de energia renovável e neutra em CO₂, e que a sua taxa de consumo é inferior ao crescimento e pode potencialmente fornecer energia para aquecimento, energia elétrica e transportes a partir de uma mesma instalação (RAJAMMA *et al.*, 2009).

A quantidade e a qualidade das cinzas produzidas em uma usina de biomassa são fortemente influenciadas pelas características da biomassa utilizada: resíduos agrícolas ou biomassa florestal, madeira ou casca. A combustão da madeira gera menor quantidade de cinzas a serem manejadas, pois as outras biomassas, os resíduos agrícolas e as cascas apresentam maior teor de cinzas quando comparados à madeira (TORTOSA MASIÁ *et al.*, 2007).

Uma ampla gama de tópicos de pesquisa é considerada para o tema, incluindo disponibilidade e logística de biomassa, tecnologias de conversão, como combustão, cogeração e gaseificação, redução de emissões entre outros. Dentre as tecnologias, a combustão de biomassa sólida é uma a que tem se provado para produção de calor e energia. No entanto um dos problemas associados à combustão da biomassa está relacionado com as cinzas, no próprio processo de conversão térmica (por exemplo, formação de escória e incrustação), e também com a sua gestão ambiental associada a destinação final apropriada (YIN *et al.*, 2008).

Existe também o problema de diferentes estágios de temperatura nas caldeiras por conta da tecnologia de combustão de biomassa utilizada que influencia a quantidade e características das cinzas produzidas em uma usina. Por exemplo, em um forno de grelha as cinzas de biomassa são submetidas a temperaturas mais altas (a temperatura máxima do leito combustível pode chegar a 1000–1200 °C) em comparação com um leito fluidizado (menos de 900 °C). Em consequência, isso influencia a quantidade de espécies orgânicas (vários sais e metais pesados) que volatilizam no forno e, conseqüentemente, a composição relativa das cinzas de fundo e volantes o que também influencia o grau de escória e incrustação no forno e na caldeira, devido à temperatura de fusão relativamente baixa característica das cinzas de biomassa e, conseqüentemente, a composição da escória formada (RAJAMMA *et al.*, 2015).

As cinzas de biomassa diferem das cinzas de carvão mineral, em particular no que tange as preocupações com a sua química e mineralogia. As características das cinzas da combustão da biomassa variam muito e são influenciadas por características da biomassa (por exemplo, material herbáceo, madeira ou casca), tecnologia de combustão (por exemplo, leito fixo ou leito fluidizado), o local onde as cinzas são recolhidas (por exemplo, cinzas de fundo ou cinzas volantes) (OBERNBERGER *et al.*, 1997).

Uma substância silicioso-aluminosa sem qualquer função cimentante é chamado de pozolana. Na adição de água, a reação com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ representa o composto que é o principal contribuinte para o desenvolvimento de resistência de materiais à base de cimento. O desenvolvimento adicional deste composto durante a hidratação do cimento aumenta o desempenho da durabilidade e resistência dos materiais cimentícios. As características pozolânicas são determinadas pela presença de altos teores de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 , totalizando mais de 70% do total de óxidos constituintes de um determinado material. No entanto em pesquisa realizada por Akinyemi Banjo Ayobami (2021) a atividade pozolânica da cinza de fundo da queima de biomassa mostrou que os óxidos primários foram de 67,4%, o que é inferior ao padrão exigido para ser considerado como um material pozolânico (AYOBAMI, 2021).

Ainda assim a utilização de cinzas de biomassa como ligante alternativo em cimentos tradicionais tem sido identificada com potencial em uma perspectiva de longo prazo. Essa inclusão pode resultar em dois efeitos benéficos a redução do consumo de energia e matérias-primas pela indústria cimenteira, redução do aterro direto dos resíduos da combustão da biomassa. No entanto, alguns elementos potencialmente tóxicos presentes nas cinzas de biomassa podem ser liberados no meio ambiente durante os diferentes estágios do ciclo vida do cimento contendo cinzas volantes, por exemplo, reutilização dos agregados de cimento após uso inicial em aplicações estruturais (TOSTI *et al.*, 2020).

Considerações a respeito da revisão bibliográfica:

A partir da revisão bibliométrica realizada pode-se concluir que o estudo de materiais compósitos cimentícios com adição de cinzas de biomassa e madeira de eucalipto é inédito em consulta em bases de dados indexadas, o que evidencia o ineditismo da presente pesquisa de doutorado.

A revisão a literatura foi fundamental para embasar o tema proposto a partir da apresentação dos diferentes tipos de cimentos Portland e suas características. Foi possível apresentar um panorama do uso de cinzas de biomassa e, ainda, os estudos relativos a materiais compósitos cimento-madeira, apresentando suas características e aplicações.

Com base no exposto, pôde-se definir diretrizes fundamentais para a realização da presente pesquisa, visando o estudo de um compósito cimento-madeira com utilização de cinzas de biomassa mirando na fabricação de um produto mais sustentável a partir da aplicação de um resíduo que hoje não possui valor agregado.

4. MATERIAL E MÉTODOS

A fase experimental foi realizada inicialmente com o objetivo de verificar o desempenho dos três diferentes tipos de cimentos utilizados e a influência do tratamento das partículas de madeira. Foi definido um traço inicial com adição das cinzas, onde as cinzas entrariam com substituição de 20% em peso do total de cimento, com uma adaptação de Deolalkar (2016). Com essas variáveis escolhidas foram então realizados os testes físicos e mecânicos do material compósito, assim como, o teste de compatibilidade entre o cimento e os materiais adicionados. Também foi feita a análise química e de teor de cinzas da cinza.

4.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados para a produção do compósito foram os seguintes:

- Partículas de madeira de *Eucalyptus* spp, coletadas em uma empresa do segmento madeireiro nas dimensões de 9 e 35 mesh moído no laboratório de painéis da UNESP – Itapeva.
- Cimento Portland dos seguintes tipos: CPV- ARI (marca Liz); CII-E 32 (marca Votorantim); CII-F 32 (marca Liz).
- Cinza de queima de biomassa, coletada em empresa do setor de painéis – EUCATEX na cidade de Salto- SP, separados em peneiras de 50 mesh de granulometria, no laboratório de Biomassa e Bioenergia da UFSCAR de Sorocaba.

4.1.1 Cimento Portland

As três variações de cimento Portland utilizados foram:

- CII E
- CII F
- CPV ARI

Como mencionado o cimento do tipo CP V ARI pode ser utilizado em diversas aplicações inclusive em elementos pré-moldados e, sua principal característica é alta resistência inicial e final. O cimento CII-E é indicado para todas as obras e contém adição de escória granulada de alto-forno, o que faz com que o cimento possua um calor de hidratação reduzido, porém custo reduzido em relação ao primeiro. Por fim o CII F contém adição de fíler de calcário entre 6% e 10% e também é recomendado para todos os fins, também com custo reduzido em comparação ao CP V.

4.1.2 Água

Foi utilizado água da rede de abastecimento pública, sem filtragem. Na água não se considerou análise química a fim de tornar o processo o mais similar possível com o da construção civil.

4.1.3 Cinzas

As cinzas utilizadas foram cedidas pela empresa de painéis de madeira reconstituída: EUCATEX na cidade de Salto/SP (FIGURA 15).

Figura 15 – Caçamba de cinzas após a queima da biomassa



Fonte: Próprio autor (2023).

A empresa utiliza exclusivamente biomassa para a geração de energia térmica. Conforme a disponibilidade de matéria-prima existe uma variação das biomassas ao longo do ano, podendo haver: casca de eucalipto; pó de serra; pó de lixa; cavaco de eucalipto; e resíduos lignocelulósicos de construção civil, as cinzas passaram por separação granulométrica ficando com uma granulometria de 50 mesh.

4.2. MÉTODO

Foram selecionados 03 tipos de cimentos, 02 granulometrias de madeira e 02 tipos de traço conforme Tabela 02.

4.2.1 Traço dos corpos de prova

Nesta etapa foram confeccionados corpos de prova com os traços especificados na Tabela 02, adaptados de Deolalkar (2016), objetivando o melhor desempenho no produto estudado com bons resultados da curva de hidratação, testes físicos e teste mecânico de compressão.

Ainda nesta etapa foi realizado um tratamento na madeira (FIGURA 16) que consistiu em submeter as partículas de madeira em água fria durante 24 horas conforme procedimento proposto por Iwakiri e Prata (2008), a fim, de eliminar extrativos que pudessem inibir a cura do cimento, assim como feito por Latorraca, (2000). (IWAKIRI; PRATA, 2008; LATORRACA, 2000). Em seguida, as partículas foram secas (FIGURA 16) em estufa antes de serem utilizadas na fabricação dos corpos de prova. Sendo assim, foi realizado um delineamento experimental como apresentado na Tabela 03.

Figura 16- Madeira antes de secar.



Fonte: Próprio autor (2023).

Tabela 02 – Traço Estudo primeira etapa

Tipo de Cimento	Granulometria				
	madeira (Mesh)	Cimento	Madeira	Cinza	Água
CPV –					
ARI	-	1	0	0	0,45
CP II -E					
32	-	1	0	0	0,45
CP II -					
F 32	-	1	0	0	0,45
CPV -					
ARI	9	1	0,4	0	0,45
CPV –					
ARI	9	0,8	0,4	0,2	0,45
CPV –					
ARI	35	1	0,4	0	0,45
CPV –					
ARI	35	0,8	0,4	0,2	0,45
CPII -E					
32	9	1	0,4	0	0,45
CP II -E					
32	9	0,8	0,4	0,2	0,45
CP II -E					
32	35	1	0,4	0	0,45
CP II -E					
32	35	0,8	0,4	0,2	0,45
CP II -					
F 32	9	1	0,4	0	0,45
CP II -					
F 32	9	0,8	0,4	0,2	0,45
CP II -					
F 32	35	1	0,4	0	0,45
CP II -					
F 32	35	0,8	0,4	0,2	0,45

Fonte: Produção do próprio autor (2023).

Tabela 03- Descrição dos tipos de tratamento

(continua)

Tratamento	Descrição	Tratamento da madeira
1	CP II E + Mad 9 mesh	Não
2	CP II E + Mad 9 mesh	Sim
3	CP II E + Mad 35 mesh	Não
4	CP II E + Mad 35 mesh	Sim
5	CP II E + cinzas + Mad 9 mesh	Não
6	CP II E + cinzas + Mad 9 mesh	Sim
7	CP II E + cinzas + Mad 35 mesh	Não
8	CP II E + cinzas + Mad 35 mesh	Sim
9	CP II F + Mad 9 mesh	Não
10	CP II F + Mad 9 mesh	Sim
11	CP II F + Mad 35 mesh	Não
12	CP II F + Mad 35 mesh	Sim
13	CP II F + cinzas + Mad 9 mesh	Não
14	CP II F + cinzas + Mad 9 mesh	Sim
15	CP II F + cinzas + Mad 35 mesh	Não
16	CP II F + cinzas + Mad 35 mesh	Sim
17	CP V + Mad 9 mesh	Não
18	CP V + Mad 9 mesh	Sim
19	CP V + Mad 35 mesh	Não
20	CP V + Mad 35 mesh	Sim
21	CP V + cinzas + Mad 9 mesh	Não
22	CP V + cinzas + Mad 9 mesh	Sim
23	CP V + cinzas + Mad 35 mesh	Não

Tabela 04- Descrição dos tipos de tratamento

(conclusão)

Tratamento	Descrição	Tratamento da madeira
24	CP V + cinzas + Mad 35 mesh	Sim
25	Pasta CII – E	-
26	Pasta CII – E + cinzas	-
27	Pasta CII – F	-
28	Pasta CII – F + cinzas	-
29	Pasta CP V	-
30	Pasta CP V+ cinzas	-

Fonte: Próprio autor (2023).

4.2.2 Confeção dos corpos de prova

Os materiais referentes a composição mencionada na Tabela 03 e traço da Tabela 02 foram pesados em balança semi-análítica. Após a pesagem os mesmos foram colocados em um recipiente, onde realizou-se mistura manual dos componentes, formando assim uma massa homogênea. A moldagem dos corpos de prova foi feita imediatamente e o mais rápido possível após o amassamento em moldes de diâmetro igual a 50mm e comprimento igual a 100mm, confeccionando assim os corpos de prova. Para facilitar a retirada das amostras aplicou-se o óleo lubrificante nos tubos, adaptados do procedimento especificado pela ABNT NBR 7215 (1996).

Após 48 horas da confecção dos corpos de prova, os mesmos foram retirados dos moldes (FIGURA 17).

Figura 17 – Corpos de Prova desenformados



Fonte: Próprio autor (2023).

Após terem sido desmoldados, os corpos de prova foram mantidos em ambiente com a temperatura controlada até atingir os dias necessários de secagem para o ensaio mecânico. O tempo de cura do cimento adotado neste trabalho foi de 28 dias, baseado em estudos anteriores (RAJAMMA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2015).

4.2.3 Sistema de análise da inibição.

Um dos maiores problemas no que se refere a materiais compostos à base de madeira e cimento é a o grau de inibição, como citado por KARADE *et al.*, (2010), HACHIMI *et al.*, (1990) e YASUDA *et al.*, (2002). Essa inibição pode atrapalhar a cura do cimento, fazendo com que esse seja um dos fatores limitantes e decisivos quando se trata deste tipo de compósito. HOFSTRAND *et al.*, (1984), propõe a Equação 1 para analisar o índice de inibição da mistura dos materiais. Essa equação considera não somente o tempo de hidratação e o tempo de endurecimento do cimento, como também a variação máxima do tempo e da temperatura. (HACHMI *et al.*, 1990; HOFSTRAND *et al.*, 1984; KARADE, 2010; YASUDA *et al.*, 2002)

$$II = 100 \times \left[\left(\frac{t-t'}{t} \right) \times \left(\frac{T'-T}{T} \right) \times \left(\frac{S'-S}{S} \right) \right] \quad \text{Equação 1}$$

$$S' = \frac{\Delta T'}{\Delta t'} \quad e \quad S = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

Onde:

t é o tempo requerido para que a temperatura máxima da mistura madeira-cimento-água seja atingida

t' é o tempo requerido para que a temperatura máxima da mistura cimento-água seja atingida

T é a temperatura máxima atingida pela mistura água-cimento-madeira;

T' é a temperatura máxima atingida pela mistura água-cimento;

S é a variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-água;

S' é a variação máxima de temperatura por hora para mistura cimento-madeira-água;

Para a determinação do índice de inibição, foram desenvolvidos sistemas onde o cimento pudesse se manter isolado do meio externo ao mesmo tempo que sua temperatura pudesse ser aferida nas primeiras 24 horas, como ilustra a Figura 18, a partir da metodologia adaptada de Sandaruwan e Pallegedera (2019). Para a obtenção das informações desejadas, foi elaborado um sistema com caixas de isopor onde o corpo de prova foi armazenado juntamente com um termômetro do tipo espeto, sendo que a temperatura lida a cada hora (SANDARUWAN; PALLEGEDERA, 2019).

Figura 18- Primeiras medidas hidratação

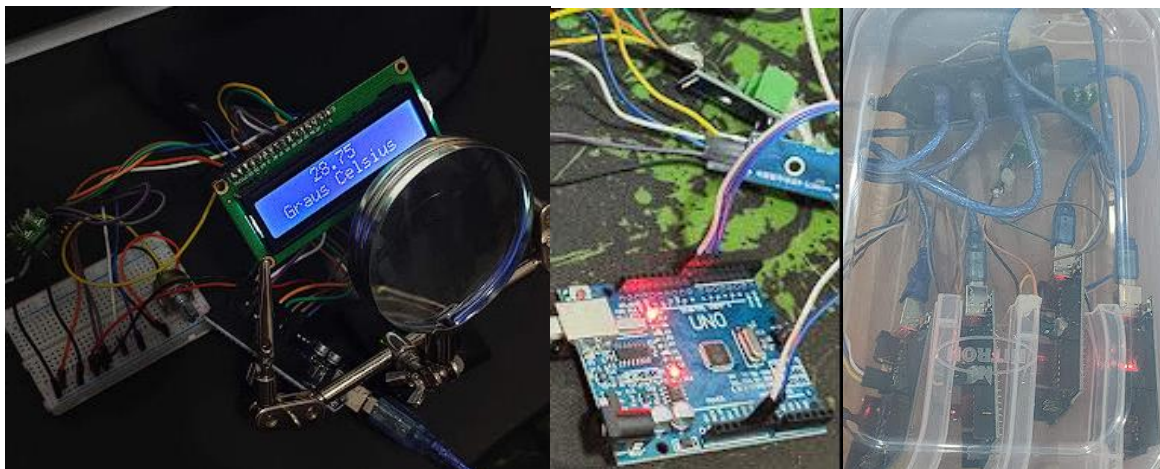


Fonte: Próprio autor (2023).

Este método se mostrou inadequado uma vez que as medições eram poucas e, não foram suficientes para as análises desejadas. Outro método de análise foi desenvolvido, utilizando um arduino tipo UNO, um termopar tipo K e um sensor do tipo sensor MAX6675 que permite a troca de dados entre o termopar e o arduino (FIGURA 19) baseado em

desenvolvimentos feitos por Al-Obaidy *et al.* (2017), Anatol'Evna *et al.* (2019) e Bora *et al.* (2020).

Figura 19 - Leitor LCD e detalhe Arduino Uno separado e quatro juntos.



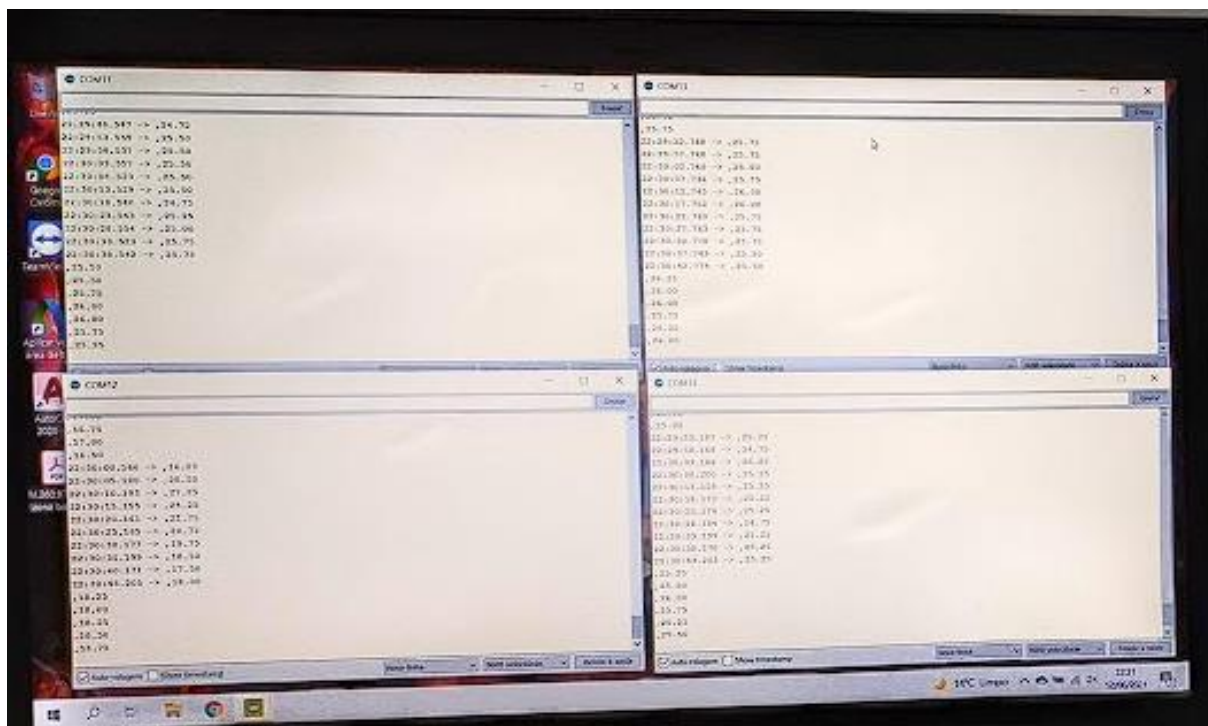
Fonte: Próprio autor (2023).

Arduino é uma solução de hardware e software de código aberto, de custo reduzido, desenvolvido inicialmente em 2005 no Interaction Design Institute Ivrea, com base no trabalho de tese de Hernando Barragán sobre fiação (BARRAGÁN, 2016). A placa é microcontrolada baseada no microprocessador ATmega328P, que possui 14 pinos de entrada/saída digital dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM (Pulse Width Modulation – saídas com um sinal de pulso rápido modulado), 6 entradas analógicas, um ressonador de cerâmica de 16 MHz, uma conexão USB, um conector de alimentação, um conector porta serial e um botão de reinicialização.

O termopar é um equipamento transdutor que compreende dois pedaços de fios dissimilares, unidos em uma das extremidades. empregado para obter a medição de temperaturas. Este equipamento possui grande versatilidade, é, por tanto, amplamente utilizado em uma diversa gama de aplicações, nota-se sua utilização setores industriais, pesquisa científica, e equipamentos de uso regular, principalmente por ser um dispositivo custo relativamente baixo (MOREIRA, 2002), com a junção dos dois dispositivos foi possível escrever um programa, Anexo A, e obter dados mais assertivos com relação aos momentos de variação da temperatura.

O Arduino por sua vez permitiu leituras múltiplas durante o intervalo de 24 horas, tornando-se adequado para as informações desejadas da análise pretendida, como ilustra a Figura 20.

Figura 20 – Dados de temperatura mostrados na IDE nativa do Arduino



Fonte: Próprio autor (2023).

4.3. CARACTERIZAÇÃO DA CINZA

O teor de cinzas, foi realizado com base na ASTM - American Society for Testing and Materials, D1102-84.

4.3.1 Análise imediata / Teor de cinzas

A análise da composição química das cinzas foi realizada no departamento de Solos e Recursos Ambientais da universidade Estadual Paulista, Câmpus Botucatu. Com 0 % de umidade, o material foi colocado em mufla a 600 ° C por seis horas. O material foi então pesado e o teor de cinzas calculado.

4.3.2 Avaliação composição química

Para se realizar a análise química do material componentes químicos tiveram de ser pré estabelecidos, são eles: Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio, Enxofre, Sódio, Boro, Cobre, Ferro, Manganês, Zinco, Carbono total (BRASIL, 2014) e o pH foi estabelecido em base de CaCl₂, de acordo com a norma americana D4972-18.

4.4 ANÁLISE DE IMAGENS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Para a apreciação da estrutura da cinza foi utilizado um MEV (microscópio eletrônico de varredura) HITACHI, modelo TM3000 (FIGURA 23) do Laboratório de Biomassa e Bioenergia da UFSCAR – Câmpus de Sorocaba.

As amostras foram submetidas ao MEV acoplado ao EDS (espectroscopia por energia dispersiva) para a verificação de componentes adicionais que poderiam não estar previstos na análise anterior, O EDS permite coletar informações quantitativas e qualitativas da composição química da amostra de uma determinada região de incidência do feixe de elétrons, tal análise facilita a identificação de precipitados e até mesmo da variação de elementos da composição (SILVEIRA *et al.*, 2013).

Figura 21 – Equipamento para o teste de microscopia eletrônica de varredura.



Fonte: Próprio autor (2023).

4.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Para as caracterizações físicas foram determinadas a densidade aparente do material, o inchamento em espessura e a absorção de água, por não ter norma que vise exatamente esse tipo de material uma adaptação da NBR 14810-1 (2018) foi utilizada para a realização dos testes.

4.5.1 Determinação da densidade aparente

A partir de dados de massa e das dimensões das amostras pode-se calcular a densidade do corpo de prova pela Equação 2:

$$D = \frac{M}{V} * 1000000 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

D é tido como a densidade, dada em quilogramas por metro cúbico;

M é a massa das amostras, dada em gramas;

V é o volume, dado em milímetros;

4.5.2 Inchamento em espessura e absorção de água

A determinação do inchamento e da absorção de água, foi realizado a partir da imersão dos corpos de prova em água durante $24 \text{ h} \pm 3 \text{ min}$ seguindo uma adaptação da ABNT-14810-1 usada também por Hansted *et al.*(2019). Foram então medidas, com um paquímetro, as variações de espessura, e as variações de massa dos corpos-de-prova por sua vez, foram medidas com o uso de balança analítica. Determinou-se a partir das Equações 3 e 4 os valores para inchamento em espessura e absorção de água para os compósitos.

$$I = \frac{E1-E0}{E0} * 100 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

I é tido como o inchamento em espessura, dado em porcentagem;

E1 é a espessura do corpo de prova após a imersão, dado em milímetros;

EO é a espessura da amostra antes da imersão, dado em milímetros.

$$A = \frac{M1-M0}{M0} * 100 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

A é a absorção de água, dada em porcentagem;

M1 é a massa da amostra após imersão, dada em gramas;

MO é a massa da amostra antes da imersão, dada em gramas.

4.6 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

A determinação da rigidez e da resistência dos compósitos cimentícios foram realizadas pelo teste de compressão normal conforme especificações da ABNT NBR7215 (2019).

4.6.1 Módulos de elasticidade e Ruptura

Os corpos de prova tiveram um tempo de cura de 28 dias e foram capeados com gesso em sua extremidade menos uniforme conforme Figura 21. Em seguida, foram caracterizados para determinar o Módulo de Elasticidade (MOE) e o Módulo de Ruptura (MOR) dos compósitos, como ilustra a Figura 22. De acordo com a ABNT NBR 7215 (2019) o ensaio

foi realizado em uma máquina universal de ensaios com controle de velocidade, como especificado pelo documento normativo.

Figura 22 - Corpos de prova capeados para ensaio de compressão.



Fonte: Próprio autor (2021).

Figura 23 – Ensaio de compressão normal para determinação de rigidez e resistência.



Fonte: Próprio autor (2021).

Os valores de MOE, Equação 5 e MOR, Equação 6 foram determinados diretamente pelo software que acompanha a máquina universal de ensaios utilizada neste ensaio.

$$MOE = \frac{P1 * D^3}{4 * d * E^3 * B} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

MOE é o módulo de elasticidade (MPa);

P1 é a carga no limite proporcional lida no indicador de cargas (N);

D é a distância entre os apoios do aparelho (mm);

d é a deflexão (mm), correspondente à carga P1;

B é a largura do corpo-de-prova (mm);

E é a espessura média tomada em três pontos do corpo-de-prova (mm).

$$MOR = \frac{1,5 * P * D}{B * E^2} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

MOR é o módulo de ruptura (MPa);

P é a carga de ruptura lida no indicador de cargas (N);

D é a distância entre apoios do aparelho (mm);

B é a largura do corpo-de-prova (mm);

E é a espessura média tomada em três pontos do corpo-de-prova (mm).

4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Com o auxílio do software Minitab® versão 18, a análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância ($\alpha = 0.05$), foi utilizada para investigar a influência dos fatores isoladamente assim como a influência dos efeitos de interação entre os fatores de cada propriedade física e mecânica avaliada, foram avaliados o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de resistência (MOR) na compressão, a densidade aparente (ρ), o inchamento em espessura (TS) e a absorção de água (WA).

Os fatores e os níveis correlatos considerados consistiram nos tipos de Cimento (CT) [CPII E (E); CPII F (F); CPV ARI (V)], no teor de cinzas (AC) [sem (0), com (1)], na faixa granulométrica da madeira (GR) [9; 35 mesh] e no tratamento da madeira (WT) [sem (0), com (1)]. Total de 24 tratamentos (Tr). Também foram ensaiadas as condições de referência

(composições de 25 a 30 da Tabela 04), em que foram combinados apenas os tipos de cimento e a incorporação ou não dos teores de cinza, assim como explicitado na Tabela 04.

Tabela 05: Tratamentos experimentais delineados

Tr	CT	AC	GR	WT	Tr	CT	AC	GR	WT
1	E	0	9	0	16	F	1	35	1
2	E	0	9	1	17	V	0	9	0
3	E	0	35	0	18	V	0	9	1
4	E	0	35	1	19	V	0	35	0
5	E	1	9	0	20	V	0	35	1
6	E	1	9	1	21	V	1	9	0
7	E	1	35	0	22	V	1	9	1
8	E	1	35	1	23	V	1	35	0
9	F	0	9	0	24	V	1	35	1
10	F	0	9	1	25	E	0	---	---
11	F	0	35	0	26	E	1	---	---
12	F	0	35	1	27	F	0	---	---
13	F	1	9	0	28	F	1	---	---
14	F	1	9	1	29	V	0	---	---
15	F	1	35	0	30	V	1	---	---

Fonte: Próprio autor (2023).

Foram produzidas seis amostras por tratamento para a determinação das propriedades físicas e mecânicas avaliadas, o que totalizou 900 resultados ou determinações experimentais (6 amostras \times 5 propriedades físicas e mecânicas \times 30 tratamentos).

Para os efeitos de interação considerados significativos pela ANOVA (valor-p < 0.05), efeitos esses também evidenciados pelo gráfico de Pareto, gráficos de interação entre efeitos foram gerados.

Destaca-se que, quando a interação entre fatores é considerada significativa, a análise do efeito de interação passa a ter maior relevância frente os efeitos isolados. A ANOVA também foi utilizada para verificar a homogeneidade nos percentuais de cinza residual com base na coleta de materiais orgânicos de lotes distintos.

O teste de contraste de médias de Tukey, também ao nível de 5% de significância, foi utilizado para avaliar a influência dos níveis dos fatores isolados, especialmente no fator tipo de cimento (CT), que está associado a 3 níveis (E, F e V).

O teste de normalidade de Anderson-Darling (5% de significância) foi utilizado para validação da ANOVA dos planejamentos fatoriais assim como do teste de Tukey. Do teste

de Anderson-Darling, valor- $p \geq 0.05$ implica na normalidade dos resíduos da ANOVA em relação a uma determinada propriedade avaliada, o que o modelo da análise de variância.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ANÁLISE IMEDIATA DAS CINZAS

Ao se analisar o teor de cinzas das cinzas (material inorgânico remanescente da queima), percebe-se resultados com valores próximos. A ANOVA significativa, indicando que não houve diferença estatística entre as médias (TABELA 05).

Tabela 06 – Percentual de cinzas residual.

Amostras cinzas	Médias * (%)
Cinza 1	94,87 a
Cinza 2	98,46 a
Cinza 3	96,09 a
Cinza 4	97,42 a
Cinza 5	95,09 a
Cinza 6	98,16 a

* Médias seguidas das mesmas letras, não apresentam diferença estatística significativa.

Fonte: Próprio autor (2023).

A literatura ressalta ainda, que a umidade da biomassa inserida na caldeira, aumenta também o teor de impurezas que fica aderido a mesma. Isto pode resultar em maiores quantidades de geração de cinzas e, conseqüentemente, menor geração de calor, em função da diminuição do material orgânico consumido na queima (DZURENDA; BANSKI, 2015; HANSTED *et al.*, 2016; SUN *et al.*, 2018).

A variabilidade de componentes químicos da cinza pode ocorrer em função da origem do material de queima, temperatura da caldeira ou da adição de outros combustíveis (LOEB *et al.*, 2008). Foi possível identificar os seguintes componentes, Tabela 06:

Tabela 07 – Composição química da cinza.

Amostras	Componentes (%)							Componentes (mg/kg)					pH
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	COT*	Na	Cu	Fe	Mn	Zn	
Cinza1	0,11	0,34	1,07	4,71	0,95	0,12	1	3213	68	11435	1355	93	12
Cinza2	0,58	0,55	0,94	4,26	1,01	0,21	1	3598	74	18890	913	162	12
Cinza3	0,12	0,24	0,64	3,63	0,72	0,06	1	4195	116	13482	747	192	12

*Carbono Orgânico Total

Fonte: Próprio autor (2023).

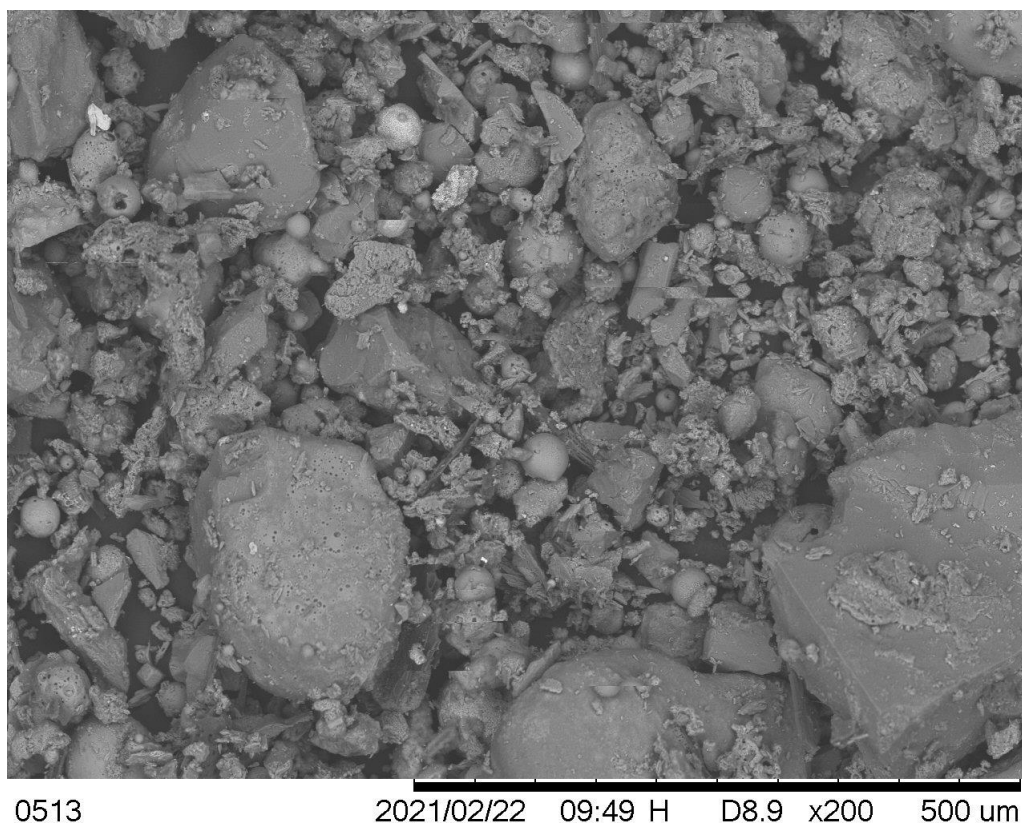
Onde lê-se: N - Nitrogênio; P₂O₅– Pentóxido de fósforo; K₂O – Óxido de Potássio; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; S- Enxofre; Na – Sódio; Fe – Ferro; Mn – Manganês e Zn – Zinco.

A alta concentração de silício favorece a presença de silicatos, como mencionado anteriormente a alita, silicato tricálcico (C₃S), e a belita, silicato dicálcico (C₂S), quando na reação de hidratação contribuem para a resistência do cimento (RIXOM et al., 1986).

Juntamente com essa análise, as amostras também foram submetidas ao MEV (microscópio eletrônico de varredura) acoplado ao EDS (espectroscopia por energia dispersiva) para a verificação de componentes que não estavam previstos na análise anterior.

Os resultados obtidos no MEV e na EDS podem ser tidos como complementares à análise dos componentes químicos. Na Figura 24, com um aumento de 200x é possível ver a heterogeneidade das partículas presentes na cinza.

Figura 24 – Estruturas presentes na amostra de cinza de caldeira obtida por Microscópio Eletrônico de varredura (MEV) com aumento de 200 %



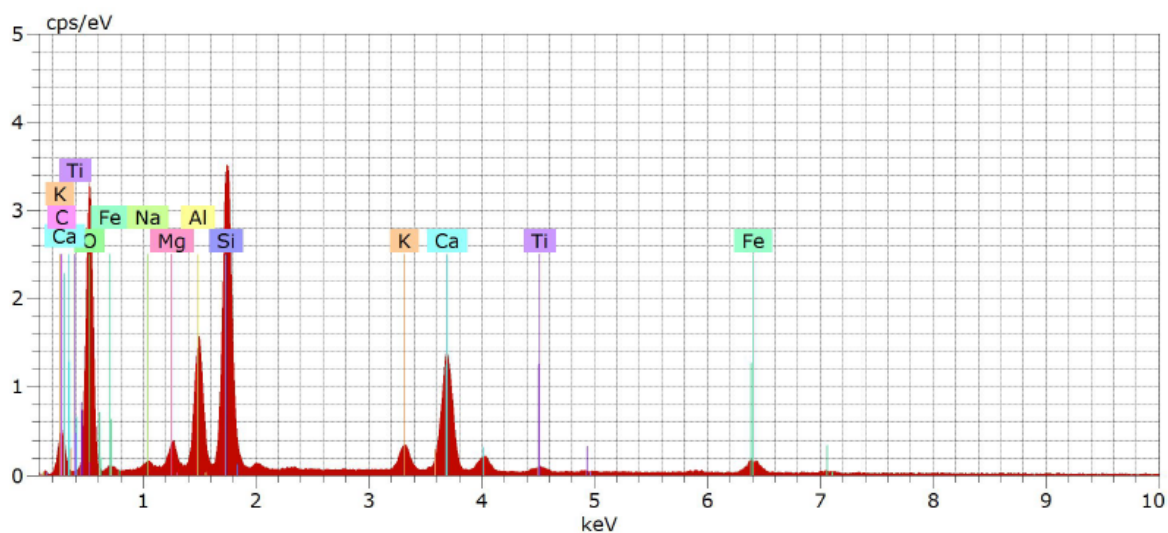
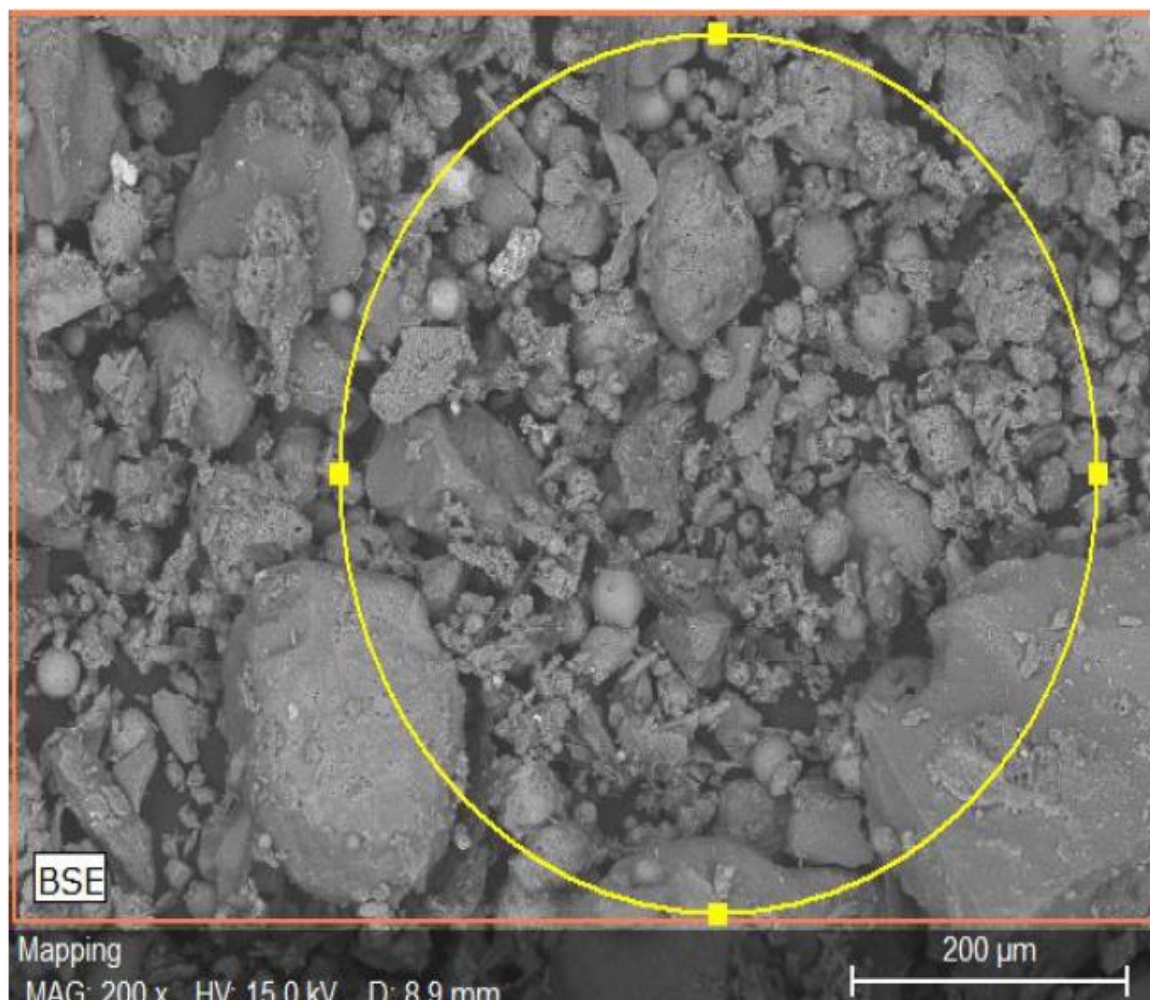
Fonte: Próprio autor (2021).

Na morfologia da cinza apresentada na Figura 24 é possível notar que o material foi composto de partículas heterogêneas e em grande parte de tamanho submicrométrico. No entanto, possuiu a heterogeneidade das partículas também se aplica ao tamanho das mesmas.

A composição química obtida por EDS (FIGURA 25), se faz complementar a análise imediata. Entretanto, é válido ressaltar que a composição pode variar de uma amostra para outra devido aos processos de queima da biomassa, o que torna a composição dos materiais de entrada na caldeira uma peça-chave para o entendimento da cinza.

A figura 25 mostra o gráfico resultante da análise de EDS da área identificada em amarelo.

Figura 25 – Gráfico obtido no EDS dos principais elementos.



Fonte: Próprio autor (2021).

Os elementos encontrados na análise de EDS estão descritos na Tabela 07 assim como sua porcentagem em massa.

Tabela 08- Massa total de elementos obtida por EDS

Massa total	
Elemento	(%)
Oxigênio	49,41
Silício	15,14
Carbono	12,42
Cálcio	9,7
Alumínio	6,14
Ferro	2,83
Potássio	1,79
Magnésio	1,43
Sódio	0,67
Titânio	0,48

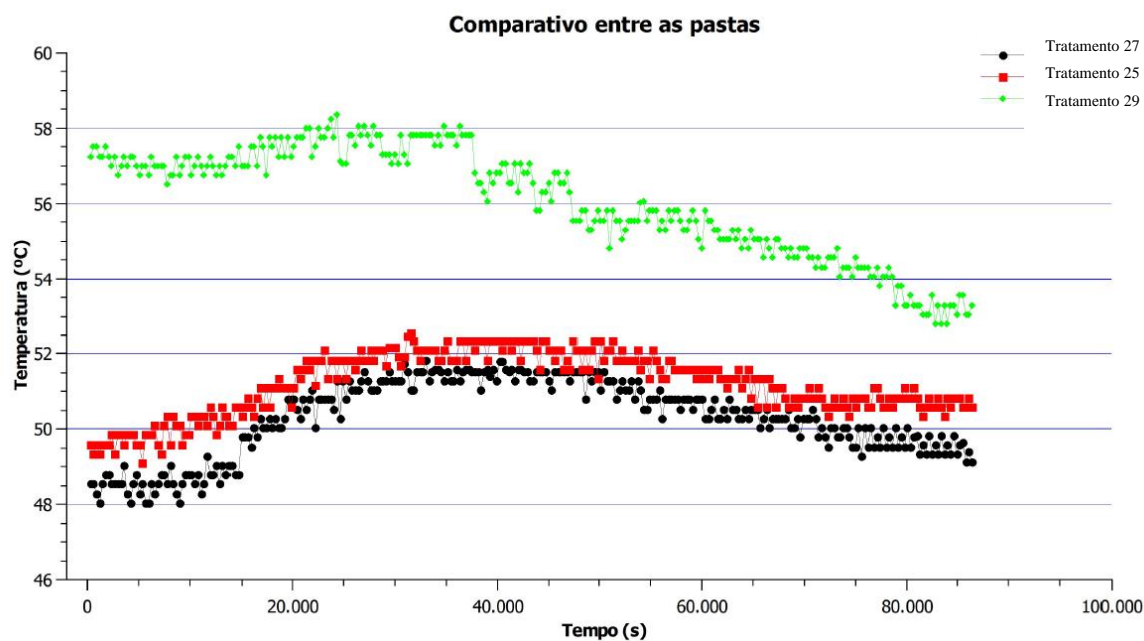
Fonte: Próprio autor (2023).

É possível perceber que o elemento mais presente na amostra é o oxigênio, isso pode ser facilmente explicado pela presença de oxidação de vários componentes. O segundo componente, o Silício, elemento chave na preparação do cimento, indicativo, portanto, que a cinza pode agir como um material ativo de substituição do cimento resultados similares foram vistos no trabalho de Kutchko e Kim (2006).

5.2. CÁLCULO DO ÍNDICE DE INIBIÇÃO

De acordo com Hofstrand *et al.* (1984) não somente o tempo que se demora para atingir a maior temperatura de hidratação nas primeiras 24 horas é importante, mas também o quão alta é essa temperatura, além de se considerar o “gap”, ou seja, a variação entre o valor mais alto da temperatura de um compósito e o valor mais alto de uma pasta. A Figura 26 ilustra o comportamento de hidratação das pastas (cimento e água) para os tratamentos 25, 27 e 29, Pasta CII – E, Pasta CII – F, e Pasta CP V respectivamente.

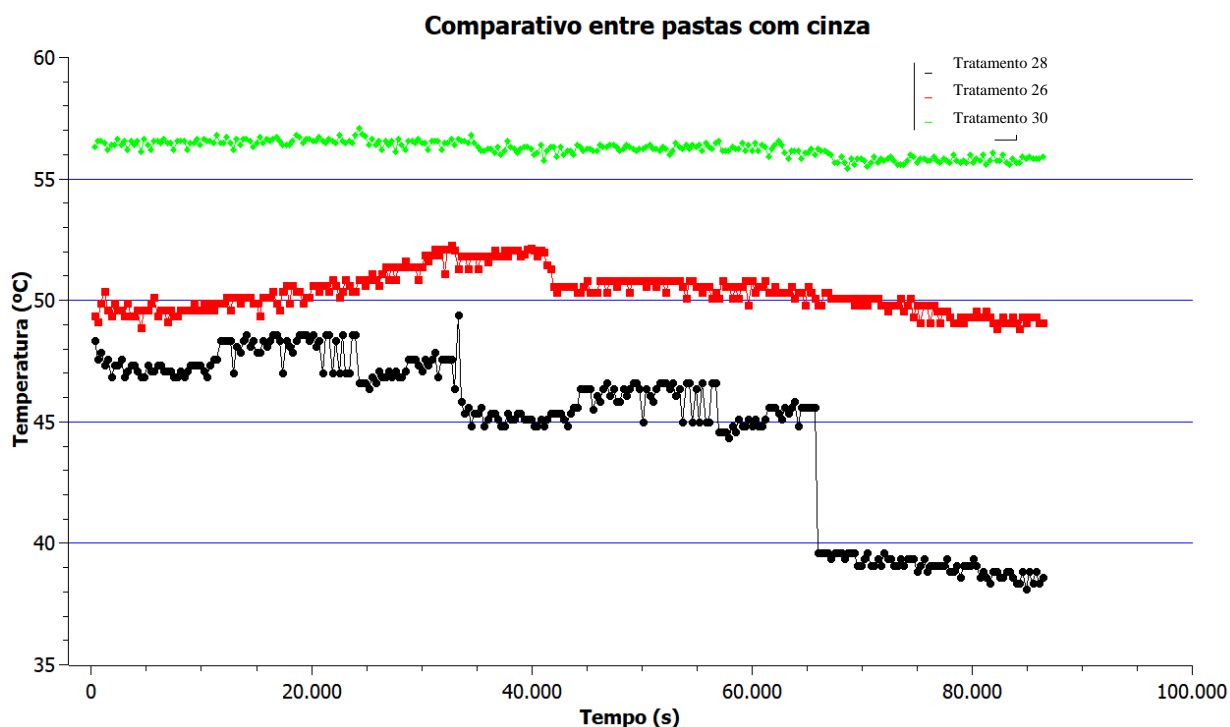
Figura 26 - Comparativo entre pastas sem adição de cinzas



Fonte: Próprio autor (2023).

Como um dos objetivos desta pesquisa foi verificar a possibilidade de inserção de cinza de biomassa como um possível substituto para o cimento em um material compósito também foi observado o comparativo entre as mesmas pastas, só que com a adição de cinzas. A Figura 27 ilustra este comparativo para os tratamentos 26, 28 e 30, Pasta CII – E + cinzas, Pasta CII – F + cinzas, e Pasta CP V+ cinzas respectivamente.

Figura 27 - Comparativo entre pastas com adição de cinzas



Fonte: Próprio autor (2023).

Observando a Figura 26 verifica-se que a curva de hidratação para o CP V Ari foi superior aos demais tipos de cimento. Isto era esperado devido as melhores propriedades apresentadas pelo cimento com maior resistência inicial (CPV ARI) como já destacado em estudos anteriores (BARBOZA *et al.*, 2020; CASTRO *et al.*, 2011; VIECILI *et al.*, 2018).

Os gráficos das outras variações podem ser encontrados no anexo B.

Analisando somente a Figura 27, verifica-se que a adição de cinzas à pasta cimentícia indica que o desempenho do CP II F sofreu a maior influência negativa. Ressalta-se que estudos comparativos entre cimentos do tipo CP II E e CP II F já indicaram vantagem para o uso do CP II E em condições normais de uso, sem nenhum aditivo (LINHARES, 2011). Ainda de acordo com Linhares (2011) isso se deve à presença de escória de alto forno na composição do cimento CII E, o que, por possuir um caráter de efeito pozolânico, pode consumir o hidróxido de cálcio, produzindo silicato hidratado de cálcio, composto responsável pela resistência do cimento.

A análise em conjunto das pastas sem e com adição de cinzas para os três diferentes tipos de cimento evidencia que o cimento de alta resistência inicial (CPV ARI) se destaca em termos de desempenho aos demais tipos de cimento. Como mencionado anteriormente isso se dá devido as propriedades superiores que o mesmo apresenta (VIECILI *et al.*, 2018). Vale ressaltar que para o CP II E basicamente não se observou variação no desempenho de hidratação com a adição das cinzas de biomassa, diferentemente do CII-F

Mesmo com uma pequena diminuição de temperatura quando se comparou somente as pastas, por exemplo, no geral melhora o Índice de inibição como um todo. A diminuição da temperatura pode ser explicada por a cinza reduzir a quantidade de cimento e, assim, reduzir o número de compostos que participam ativamente da reação exotérmica de liberação de óxidos do cimento. De acordo com Ayobami, (2021), as cinzas de biomassa indicam uma atividade pozolânica o que ajudaria na liberação de óxidos iniciais para tal reação, no entanto, a autora cita que tais compostos não chegam a 70%, não configurando assim um material pozolânico propriamente dito, e como o material que compõe a cinza é muito diverso esse potencial pode ser ainda menor (AYOBAMI, 2021).

Outro item que ressalta ao se observar a Figura 27 é que o tratamento 28, feito com cimento do tipo CPII-F, que não contém material pozolânico em sua composição, teve uma reação um pouco adversa com a cinza o que pode ter feito com que sua temperatura de hidratação sofresse uma queda perto da hora 18 das primeiras 24 horas

A partir da Equação 1 foi possível calcular o índice de inibição (II) para os tratamentos restantes, sendo os resultados apresentados na Tabela 08. Vale destacar que os tratamentos relativos à pasta são referência para a determinação do índice de inibição.

Tabela 09 – Índice de inibição para os tratamentos estudados na primeira etapa.

(continua)

Tratamento		Índice de Inibição (%)	Presença de cinza
1	CP II E + Mad 9 mesh	21,47	
2	CP II E + Mad 9 mesh	23,17	Não
3	CP II E + Mad 35 mesh	22,89	
4	CP II E + Mad 35 mesh	23,84	
5	CP II E + cinzas + Mad 9 mesh	17,21	
6	CP II E + cinzas + Mad 9 mesh	19,74	Sim
7	CP II E + cinzas + Mad 35 mesh	22,36	
8	CP II E + cinzas + Mad 35 mesh	23,39	
9	CP II F + Mad 9 mesh	29,89	
10	CP II F + Mad 9 mesh	30,52	
11	CP II F + Mad 35 mesh	32,70	Não

Tabela 010 – Índice de inibição para os tratamentos estudados na primeira etapa.

(conclusão)

Tratamento		Índice de Inibição (%)	Presença de cinza
12	CP II F + Mad 35 mesh	33,02	
13	CP II F + cinzas + Mad 9 mesh	25,98	
14	CP II F + cinzas + Mad 9 mesh	25,87	
15	CP II F + cinzas + Mad 35 mesh	31,82	Sim
16	CP II F + cinzas + Mad 35 mesh	35,28	
17	CP V + Mad 9 mesh	17,96	
18	CP V + Mad 9 mesh	19,66	
19	CP V + Mad 35 mesh	20,95	Não
20	CP V + Mad 35 mesh	22,22	
21	CP V + cinzas + Mad 9 mesh	14,49	
22	CP V + cinzas + Mad 9 mesh	16,28	
23	CP V + cinzas + Mad 35 mesh	19,66	Sim
24	CP V + cinzas + Mad 35 mesh	20,66	
25	Pasta CII – E	-	Não
26	Pasta CII – E + cinzas	-	Sim
27	Pasta CII – F	-	Não
28	Pasta CII – F + cinzas	-	Sim
29	Pasta CP V	-	Não
30	Pasta CP V+ cinzas	-	Sim

Fonte: Próprio autor (2023).

Observando os valores obtidos para o Índice de Inibição para todos os tratamentos ocorreram variações de 14,49 a 35,28%. Embora exista uma variação consideravelmente grande entre os índices, todos os tratamentos se enquadraram como inibição moderada como

indica o estudo realizado por Okino *et al.*, (2004) com classificação apresentada na Tabela 09.

Tabela 011 - Índice de inibição

Índice de inibição (%)	Classificação
II < 10	Inibição baixa
10 < II < 50	Inibição moderada
50 < II < 100	Inibição alta
II > 100	Inibição extrema

Fonte: (OKINO *et al.*, 2004) - adaptada

Analisando os tratamentos com adição de madeira, destaca-se que os tratamentos 01, 09 e 17, que englobam os três tipos de cimento e madeira de granulometria de 9 mesh apresentaram índices de inibição de 21,47; 29,89 e 17,96 respectivamente. Pode-se perceber que a madeira fez com que a temperatura de hidratação dos três cimentos sofresse uma queda, fato demonstrado pelo próprio valor do índice apresentado na Tabela 08.

A inibição entre o cimento e a madeira pode se dar por diversos fatores como a presença de sacarose ou a hemicelulose como ocorre em alguns tipos de madeira. A estereoquímica de algumas famílias de ácidos pode também influenciar (GOVIN *et al.*, 2005; YASUDA *et al.*, 2002).

A estereoquímica é tida como a divisão da química que se encarrega de estudar os aspectos tridimensionais das moléculas. Os possíveis arranjos das moléculas podem ser muito variados e essa variação de arranjos em sua estrutura acarreta diferentes propriedades para os elementos (RAUPP *et al.*, 2020).

A maioria das moléculas orgânicas apresenta características tridimensionais. Por isso que a estereoquímica pode ser considerada uma parte da química orgânica, uma vez que a geometria das moléculas inorgânicas geralmente é mais simples e apresenta-se em um mesmo plano.

Os tratamentos 03, 11 e 19 apresentaram índices de inibição de 22,89; 32,70 e 20,95. Entre os três tipos de cimento o CII-F 32 (tratamento 11) se mostrou pior com maior índice de inibição, perdendo temperatura próximo aos 65.000 segundos, isso, como mencionado o CII – F não possui material pozzolânico em sua constituição, esse pode ser um dos motivos de seu resultado ter sido pior com relação ao CII-E.

Ao inserir a cinza no material compósito observou-se uma tendência de melhora no índice de inibição, apesar da diminuição da temperatura, uma vez que o índice de inibição não leva em conta somente temperatura máxima.

A partir de todas as considerações realizadas sobre as curvas de hidratação, pode-se concluir que o cimento CPV ARI sempre apresentou maior temperatura de cura em relação aos demais cimentos utilizados e, isto se justifica por ser um cimento mais fino que reage mais rapidamente (BORGES, 2017). Isso era esperado uma vez que se trata de um CP (Cimento Portland) de cura rápida e que tende a apresentar uma reação exotérmica mais acentuada e rápida em relação aos demais CPs. Isso foi comprovado pelos menores Índices de Inibição obtidos nos tratamentos com CP V ARI neste estudo e que são confirmados pela literatura (IWAKIRI *et al.*, 2012; RIBEIRO *et al.*, 2021; WEBER *et al.*, 2017).

Como descrito no item 4.2.1, optou-se pela realização do tratamento das partículas de madeira com lavagem em água fria visando melhorar a interação entre a madeira e o cimento, no entanto no quesito Índice de Inibição o tratamento não mostrou melhora significativa, tal resultado também foi observado por Sadiku e Sanusi em seu trabalho em 2014 (SADIKU; SANUSI, 2014).

Os tratamentos com a madeira de granulometria mais fina, 35 mesh, apresentaram resultados piores provavelmente por conta da partícula contar com uma área superficial maior, assim como observado por Castro *et al.* (2019).

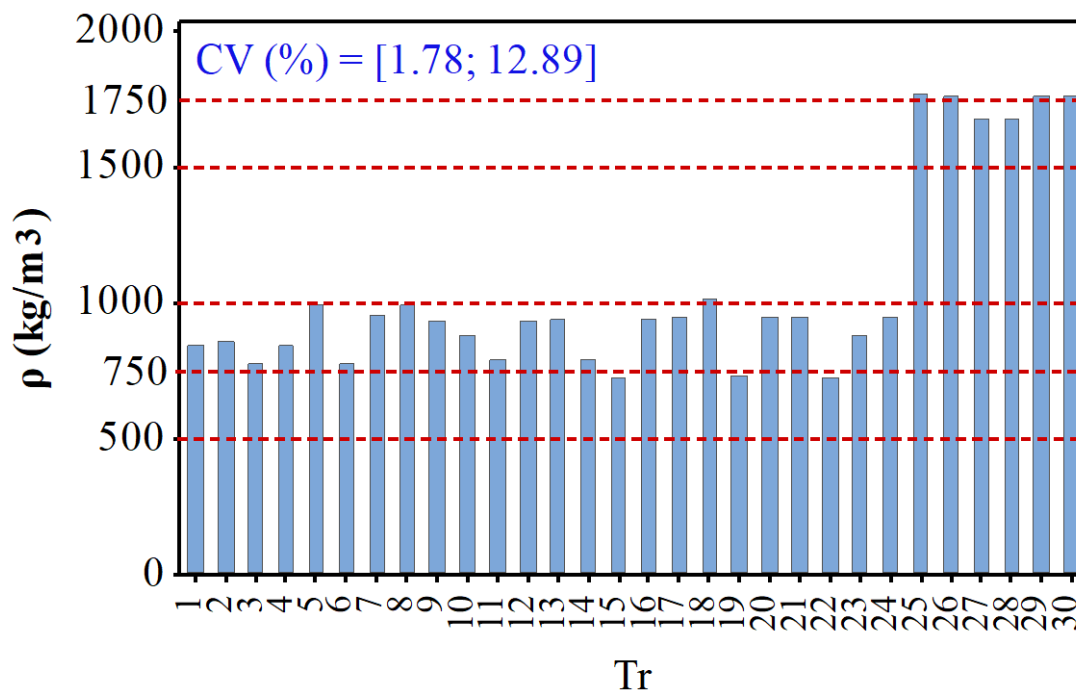
5.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO COMPOSTO

A seguir estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios físicos para a determinação: densidade aparente, inchamento em espessura e absorção de água após imersão em água por 24 horas.

5.3.1. Densidade aparente (ρ)

O ensaio de densidade aparente foi realizado para todos os tratamentos, Figura 36, são apresentados os valores médios e, também, o menor e o maior valor do coeficiente de variação (CV) referente a densidade aparente.

Figura 28 – Valores de densidade aparente média para os tratamentos.



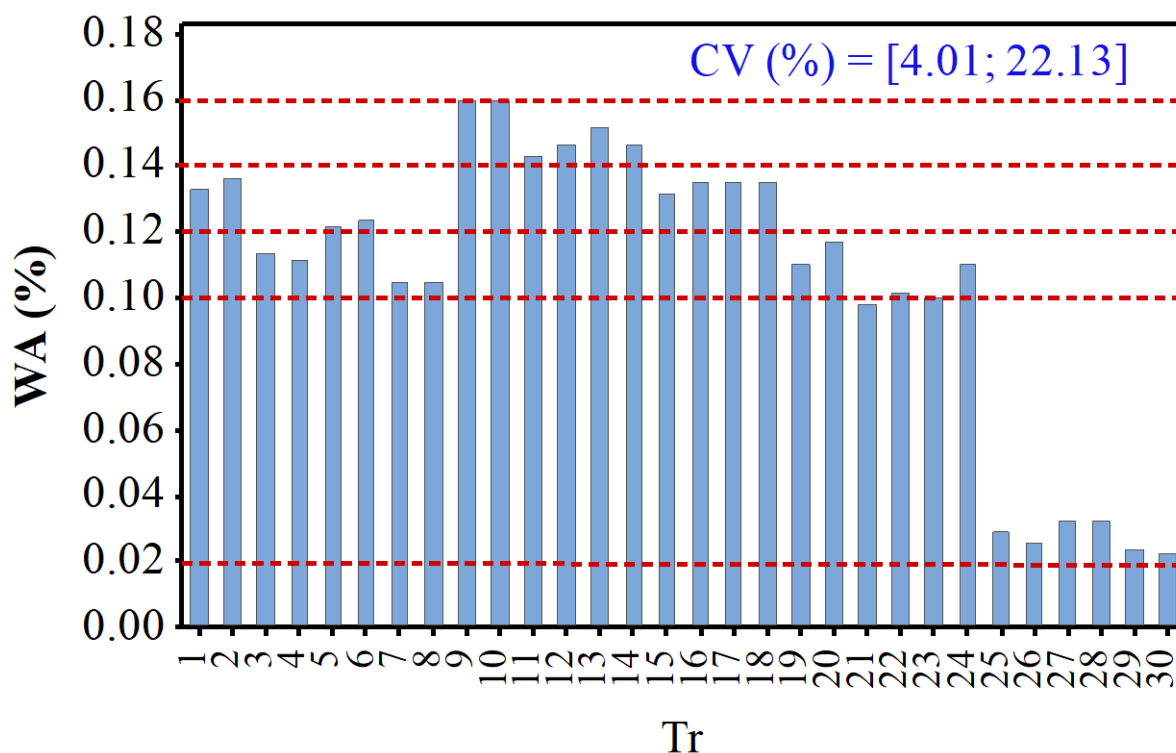
Fonte: Próprio autor (2023).

Vu *et al.* (2019) estudaram compósitos produzidos com adição de diferentes porcentagens de cinzas de madeira em materiais cimento-madeira e obtiveram densidades variando entre 390 kg/m³ e 630 kg/m³. Destaca-se que neste estudo os autores usaram a madeira *White spruce* e cimento semelhante ao CP V Ari (Tipo 10 GU) assim como cinzas provenientes de processo de queima. Comparando os resultados obtidos pelos autores e o presente estudo, observou-se que a madeira de eucalipto, por apresentar maior densidade em comparação a utilizada pelos autores contribuiu para a maior densidade de todos os tratamentos avaliados. No trabalho de Soares *et al.* (2007) os autores concluem que é possível produzir compósitos de cimento madeira de densidade média, inferior a 1000 kg/m³ assim como os resultados desta pesquisa.

5.3.2. Absorção de água 24 horas (WA)

O ensaio de absorção de água após imersão por 24 horas torna-se relevante para entender o comportamento físico dos compósitos e para qual fim podem ser utilizados. A Figura 29 ilustra a partir do gráfico de barras o comportamento de todos os tratamentos analisados e, seus máximo e mínimo coeficientes de variação.

Figura 29 - Valores médios obtidos no ensaio de absorção de água em 24 horas e respectivos coeficientes de variação.



Fonte: Próprio autor (2023).

A adição de madeira, como era previsto, aumentou a absorção de água como mostrado também por Mahzabin *et al.* (2013). Destaca-se ainda que os menores valores de absorção foram conseguidos para os cimentos CP V Ari. Os melhores resultados para o CP V eram previstos justamente por apresentar cura mais rápida, verificada pelos menores valores de índice de inibição.

O tratamento das partículas de madeira não mostra melhora significativa no material, quando comparado com variações de mesma granulometria, ambos possuem uma absorção considerada alta entre 6 e 16% (FADELE; ATA, 2018). Devido a essa falta de efetividade do tratamento o mesmo não é recomendado para reduzir a absorção do material.

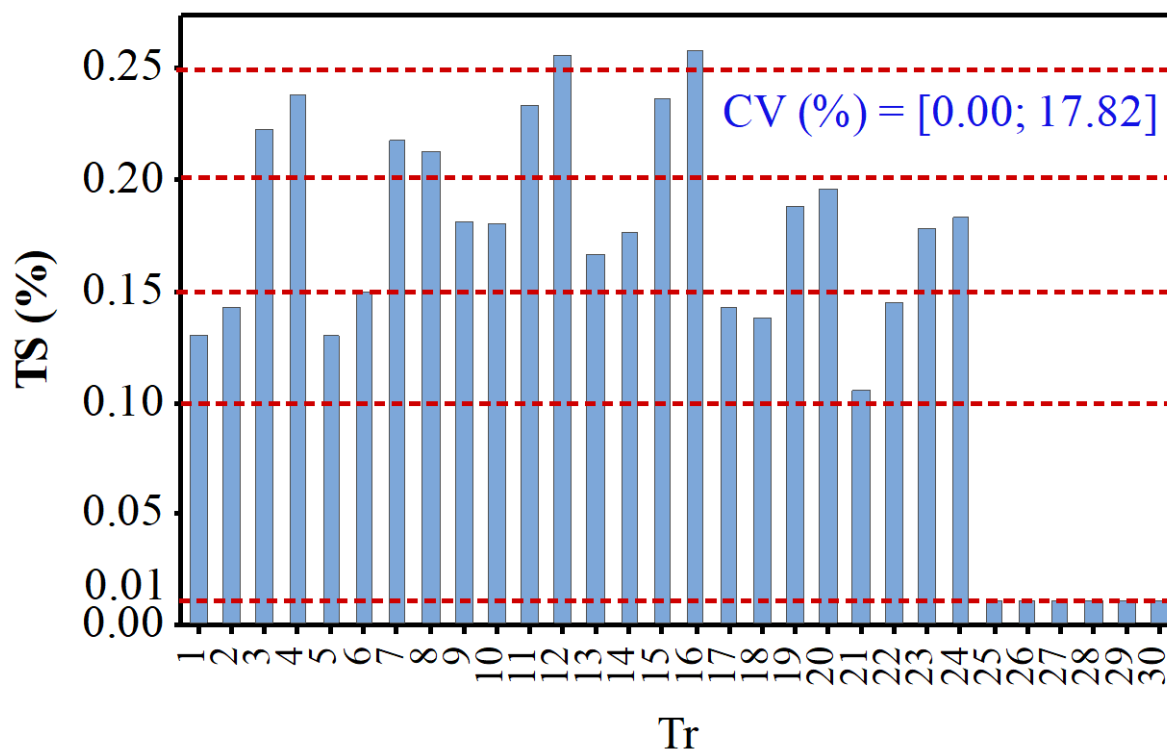
O tratamento com água fria não proporciona alterações químicas significativas na madeira, sendo assim não influenciou. De acordo com Sadiku e Sanusi (2014) em seu trabalho também não houve diferença significativa para o tratamento tanto com água fria como para com água quente, a única diferença foi percebida com adição de hidróxido de sódio.

5.3.3. Inchamento em espessura (TS)

Os resultados do teste de inchamento em espessura são apresentados na Figura 30. Para o teste de inchamento em espessura após imersão em água por 24 horas apresentou um

resultado pior quando a madeira foi tratada. Os resultados foram semelhantes para com ou sem a inserção de cinza, algo que ficou claro tanto no teste de inchamento em espessura como agora no teste de absorção é que o melhor resultado é obtido com a granulometria mais grossa da madeira, 9 mesh, e com o cimento CPV-ARI.

Figura 30 - Inchamento em espessura



Fonte: Próprio autor (2023).

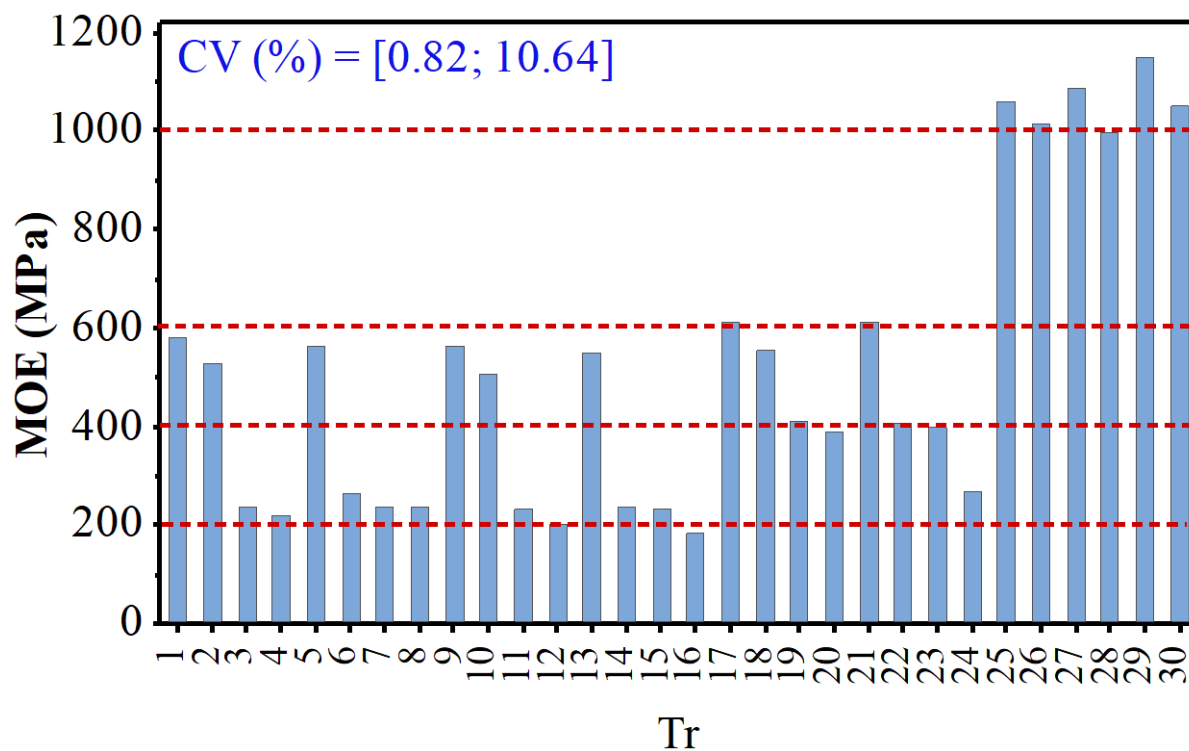
Embora a granulometria mais grossa tenha a tendência de apresentar mais vazios, o que interferiu neste estudo foi tanto a interação entre a madeira e os extrativos inibidores da cura com o cimento quanto a água que não foi absorvida pela madeira para a hidratação inicial do cimento. Ou seja, as partículas menores devido a maior área superficial de contato proporcionaram interações mais fracas, com o aumento do teor de cimento reagente nas partículas, os cristais de cimento crescem bem e se desenvolvem durante o processo de hidratação, portanto, uma quantidade maior de cimento reagente resulta em um conexão mais forte entre os cristais e as partículas de cimento, resultando em um produto composto de maior resistência (NAZERIAN *et al.*, 2011; RONQUIM *et al.*, 2014)

Assim como na absorção a adição de madeira, aumentou o inchamento visto também por Castro *et al.* (2018). No entanto os melhores resultados diferem quando se utiliza neste momento as partículas maiores (09 mesh). Assim como na absorção destaca-se ainda que os menores valores de inchamento foram conseguidos para os cimentos CP V Ari.

5.4. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO COMPOSTO

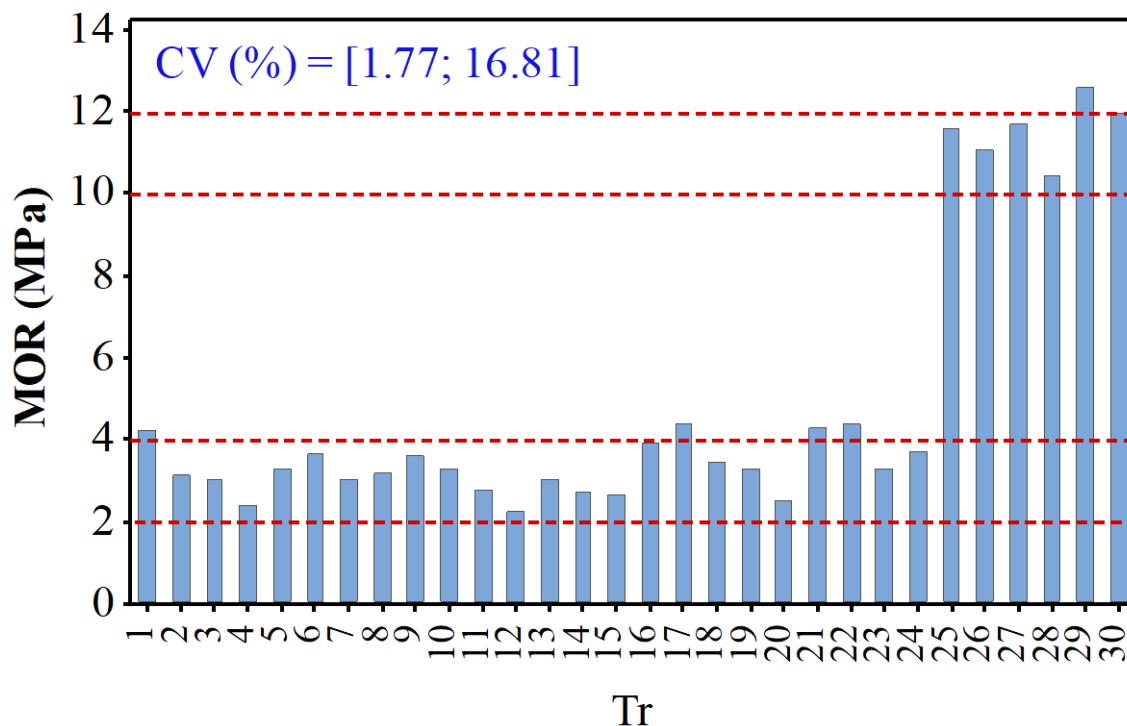
Para a caracterização mecânica dos compósitos realizou-se o teste de compressão onde foi possível realizar a determinação da rigidez verificada a partir do módulo de elasticidade (MOE) e a resistência verificada pelo módulo de ruptura (MOR), como observa-se nas Figuras 31 e 32.

Figura 31 - Módulo de Elasticidade (MOE)



Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 32 - Módulo de Ruptura (MOR)



Fonte: Próprio autor (2023).

Com a adição de partículas de madeira era esperado que houvesse uma diminuição nos valores de MOE e MOR do compósito, uma vez que existe uma inibição inerente a cura do cimento por parte da madeira, isso é demonstrado em diversas literaturas, no entanto a utilização do CPV-ARI se mostra melhor tanto para a granulometria menor quanto para a maior. A menor granulometria apresenta piores resultados, um dos possíveis motivos é que as partículas menores tornam o material menos rígido fazendo com que sua resistência seja menor (IWAKIRI; PRATA, 2008; NAZERIAN *et al.*, 2011; VILLAS-BÔAS *et al.*, 2020).

A adição de cinzas não interferiu no desempenho mecânico do painel, fator positivo por se tratar da substituição do cimento por um resíduo de biomassa sem valor agregado e de difícil descarte (AYOBAMI, 2021).

5.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA.

A análise estatística foi feita em duas partes, a primeira é a análise das condições de referência, as “pastas”, dos três diferentes tipos de cimento, com e sem a inserção de cinzas, tratamentos de 25 a 30. Em seguida foi realizada a análise de todos os outros 24 tratamentos delineados.

5.5.1 Análise das condições de referência

Com relação ao planejamento experimental (tratamentos de 25 a 30 – condições de referência) que envolve apenas os fatores tipo de cimento (CT) e inserção de cinzas (AC), os resultados do teste de contraste de médias de Tukey, os gráficos de Pareto (influência da interação entre fatores) e os gráficos de interação entre fatores considerados significativos pela ANOVA (5% de significância) são apresentados na Tabela 10, na Figura 33 e na Figura 34, cabendo destacar que foi notada normalidade dos resíduos (teste de Anderson-Darling) em todas as propriedades [$0.112 \geq p\text{-valor} \geq 0.826$], o que valida dos resultados da ANOVA.

Tabela 12 - Resultados do teste de contraste de média de Tukey para o planejamento experimental envolvendo os fatores CT e AC.

Prop.	CT			AC	
	E	F	V	0	1
ρ	A	B	A	A	A
TS	---	---	---	---	---
WA	B	A	B	A	A
MOE	B	B	A	A	B
MOR	B	B	A	A	B

Fonte: Próprio autor (2023).

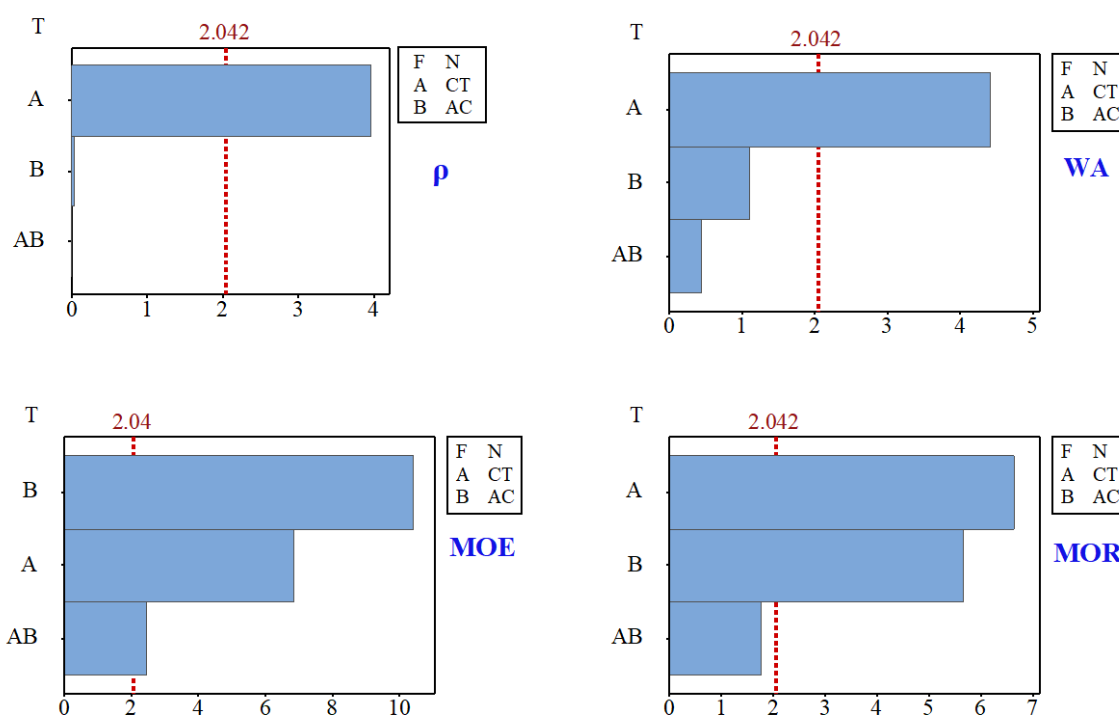
“A” denota o tratamento associado ao maior valor médio de uma certa propriedade, “B” o segundo maior valor médio e assim sucessivamente, e letras iguais implicam em tratamentos distintos com médias estatisticamente equivalentes entre si, é possível perceber que a adição de cinzas no material composto houve uma diferença significativa no quesito densidade aparente (ρ) sendo que somente o cimento CII F apresentou média pior, e não houve diferença quando da inserção ou não das cinzas.

O teste físico de Inchamento em espessura (TS) praticamente não resultou em nenhuma variação nos valores para cada tipo de cimento, com ou sem a inserção de cinzas.

Na absorção de água (WA) a maior média, neste caso o pior resultado, também se mostrou estatisticamente diferente no tipo de cimento CII F, a inserção ou não de cinzas também não causa diferença estatística significativa.

Nas condições de referência abordadas na Tabela 10, quando se trata de testes mecânicos a diferença entre os tipos de cimento é estatisticamente significativa para o Tipo CPV- Ari que mostra médias maiores tanto para os testes de MOR quanto para os testes de MOE, no entanto no quesito mecânico a inserção de cinzas resultou em uma diminuição estatisticamente relevante nas médias.

Figura 33 - Gráficos de Pareto do planejamento experimental referente associado aos fatores CT e AC.



* $T = termo$; $F = fator$; $N = nome$

Fonte: Próprio autor (2023).

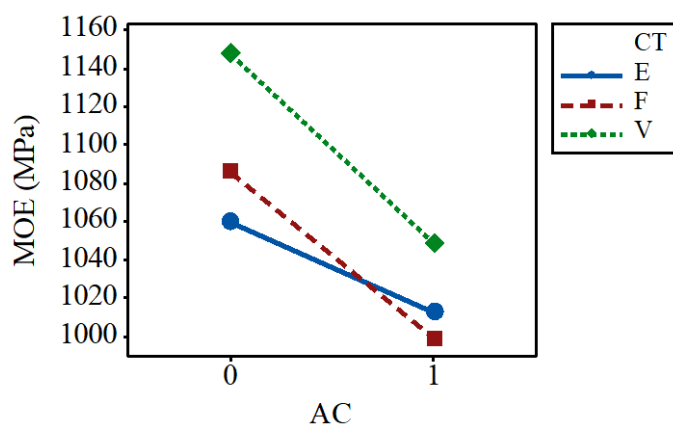
A Figura 33 mostra a influência da interação entre os fatores por meio de gráficos de Pareto. É possível perceber que para o teste de densidade aparente (ρ) o fator que mais influenciou foi o tipo de cimento, tendo quase nenhuma interação com a inserção de cinza, fato que se repete no gráfico de absorção de água, onde, a pesar do valor de inserção de cinza ser um pouco mais elevado a ponto de se criar um termo de interação entre inserção de cinza e tipo de cimento, tanto a inserção de cinza quanto a interação entre os dois fatores não se mostra estatisticamente relevante.

Fato que não acontece para os gráficos de Pareto de MOE, neste teste tanto o fator tipo de cimento quanto o fator inserção de cinza se mostram estatisticamente significativos

no resultado do teste assim como a interação entre os dois, o que pode ser visto de maneira mais clara na Figura 34.

O gráfico de Pareto de MOR por sua vez apresenta variações significativas para os dois fatores, no entanto não apresenta uma interação significativa entre os mesmos.

Figura 34 - Gráfico de interação entre os fatores CT e AC.



Fonte: Próprio autor (2023).

5.5.2 Análise dos tratamentos

Na Tabela 11 são apresentados os resultados do teste de contraste de médias de Tukey (5% de significância) para a análise dos níveis dos fatores isolados em cada propriedade física e mecânica avaliada, cabendo destacar o atendimento da normalidade dos resíduos [$0.096 \geq p\text{-valor} \geq 0.763$] em todas as análises.

Tabela 13 - Resultados do teste de Tukey referentes ao planejamento composto pelos quatro fatores investigados (tratamentos de 1 a 24).

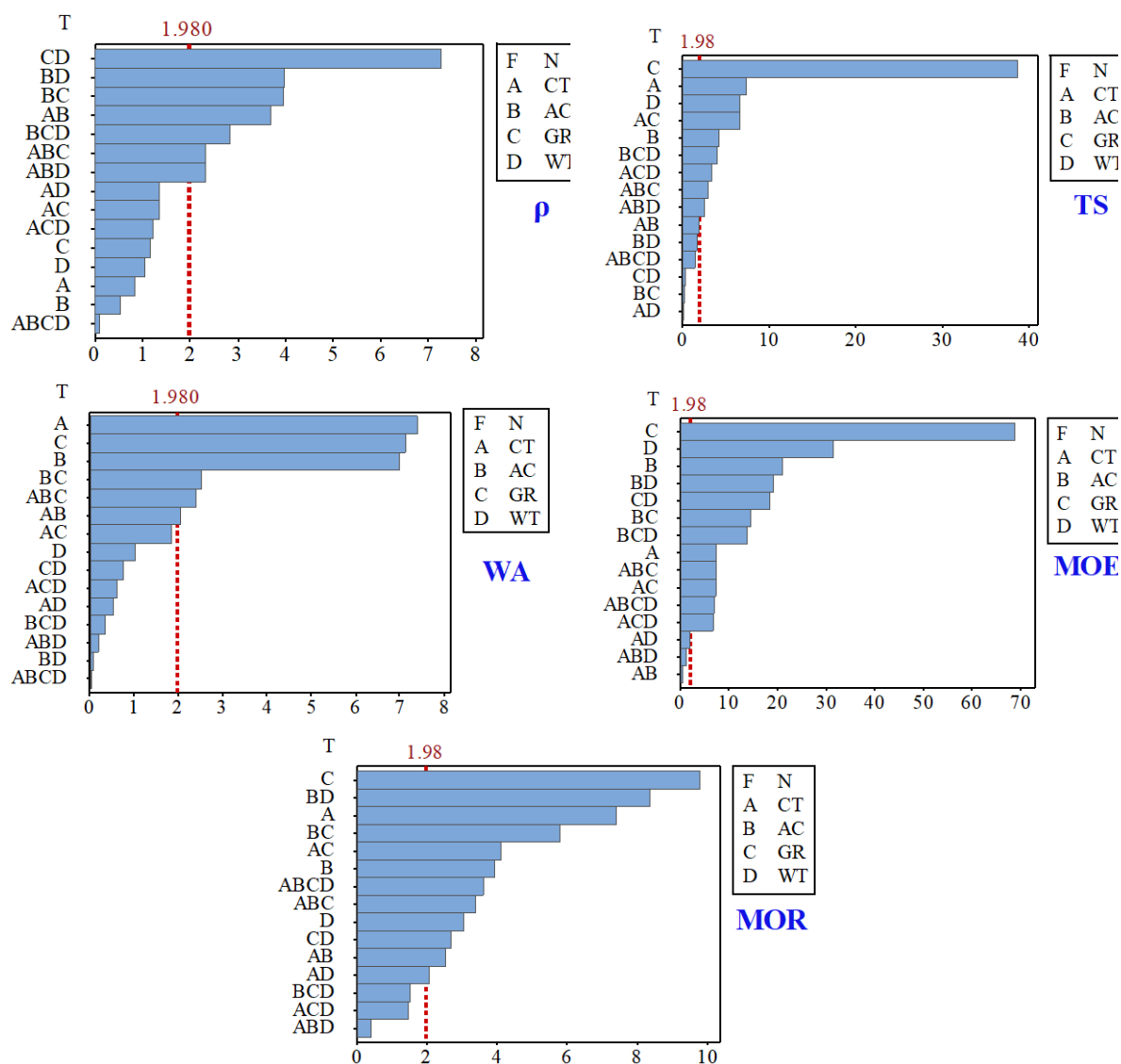
Prop.	CT			AC		GR		WT	
	E	F	V	0	1	9	35	0	1
ρ	A	A	A	A	A	A	A	A	A
TS	B	A	C	A	A	B	A	A	A
WA	B	A	B	A	B	A	B	A	A
MOE	B	B	A	A	B	A	B	A	B
MOR	B	B	A	B	A	A	B	A	A

Fonte: Próprio autor (2023).

Novamente cabe ressaltar que o índice “A” denota o tratamento associado ao maior valor médio de uma certa propriedade, “B” o segundo maior valor médio e assim sucessivamente.

Na Figura 35 são apresentados os gráficos de Pareto, que foram gerados com o propósito de avaliar especialmente a influência dos efeitos de interação entre os fatores.

Figura 35 - Gráficos de Pareto do planejamento relacionado com os 24 tratamentos experimentais delineados.



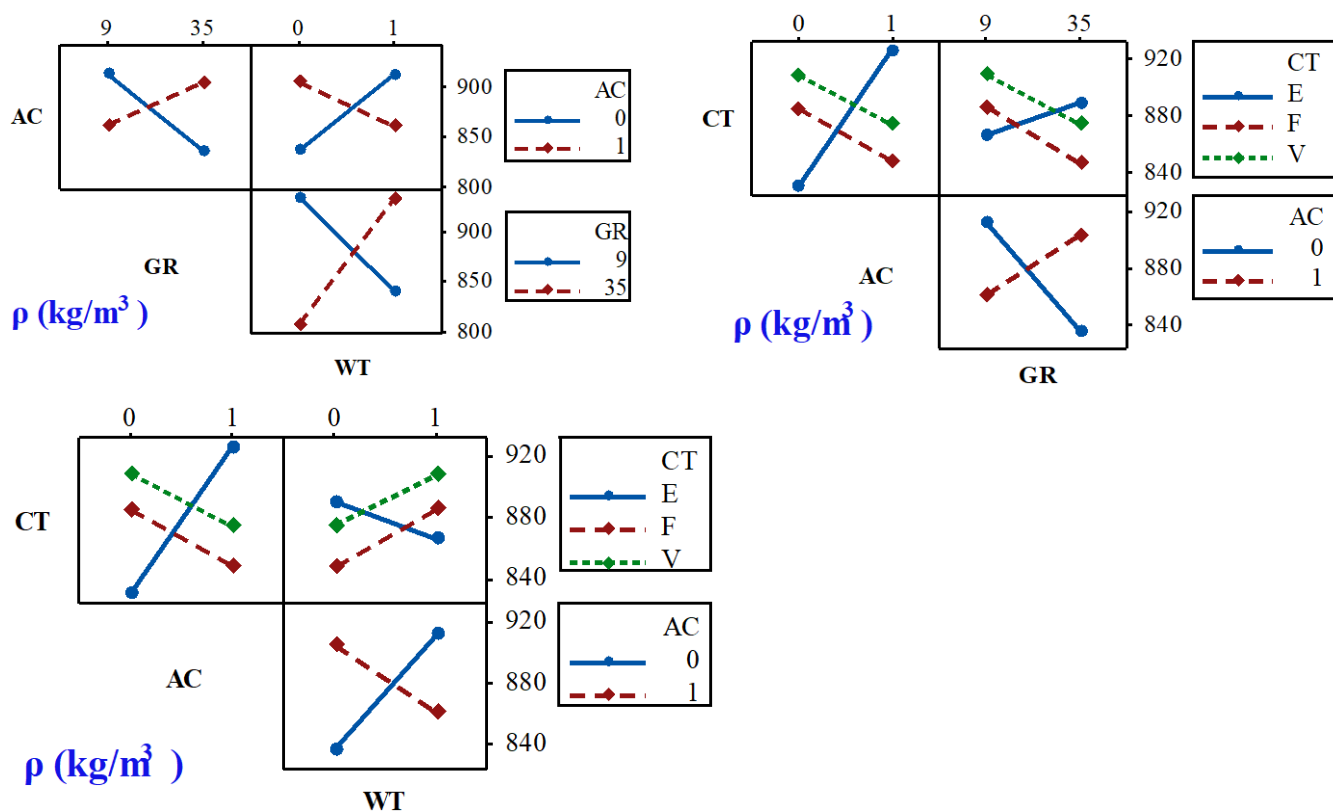
* $T = \text{termo}; F = \text{fator}; N = \text{nome}$

Fonte: Próprio autor (2023).

Pelo teste de Anderson-Darling, foi notada a normalidade dos resíduos em todas as propriedades [$0.072 \geq p\text{-valor} \geq 0.526$], o que valida dos resultados da ANOVA.

Para a densidade, nota-se da Figura 35 a existência de três interações significativas envolvendo três fatores, este efeito é apresentado na figura 36.

Figura 36 - Gráficos de interação para a densidade.



Fonte: Próprio autor (2023).

A inserção da cinza faz com que a granulometria de 35 mesh apresente uma melhora e a falta de cinza apresenta uma piora na granulometria de 09 mesh apresente uma piora na densidade, ou seja, quando combinado com a granulometria a inserção é recomendada, isso deve acontecer pelo teor de silício da cinza, como mencionado na Figura 25.

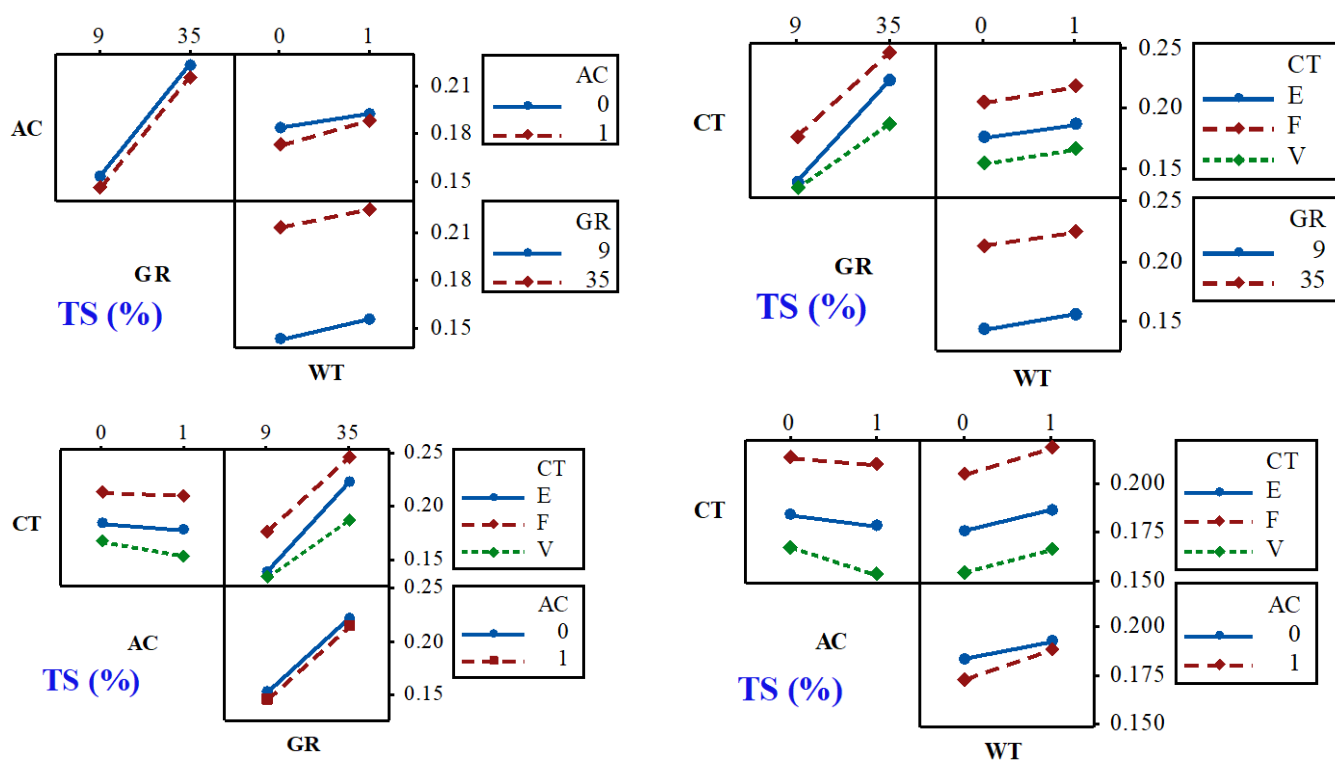
Quando combinado com o tratamento da madeira, a interação da cinza com o produto final apresentou piora nos resultados de densidade. Observou-se também que a madeira tratada teve uma interação com a granulometria onde é possível perceber que houve uma piora para madeira de 9 mesh e uma melhora para a de 35 mesh, fato observado na literatura (FERRANDEZ-GARCIA *et al.*, 2020; OKINO *et al.*, 2005)

Mencionando o tipo de cimento é possível ver que existem interações para a inserção ou não de cinzas, a granulometria e o tratamento, o tratamento melhora a densidade do CP V ARI e do CP II F, e piora a densidade do CP II E, possivelmente pela composição de escória de alto forno do reagir melhor com alguma umidade do composto assim como evidenciado por Couto *et al.*, (2010).

No entanto o CP II E apresenta melhora quando inserido de cinzas, provavelmente pois uma vez que há a inserção de cinzas há também um aumento da atividade pozolânica natural do CP II E.

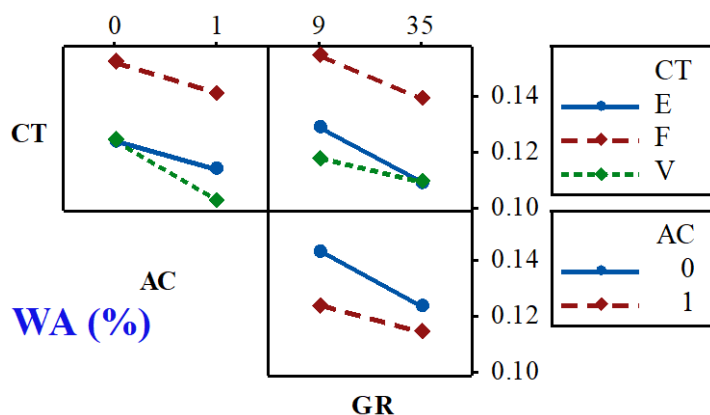
Com relação ao Inchamento em espessura, é notada a existência de quatro interações significativas entre três fatores. Já a absorção de água teve apenas uma interação significativa (três fatores) encontrada. Tais efeitos de interação são apresentados nas Figuras de 37 e 38.

Figura 37 - Gráficos de interação para o inchamento em espessura após 24 horas de imersão.



Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 38 - Gráficos de interação para a absorção de água.



Fonte: Próprio autor (2023).

O Inchamento em espessura apresenta clara piora quando o tratamento da madeira é realizado, principalmente, quando relacionado com o tamanho de partícula as partículas de 35 mesh. A menor granulometria do material apresentou resultados piores de inchamento, provavelmente por conta de sua maior área superficial como visto também por Nazerian *et al.*, (2011). Já a inserção ou não de cinza pouco influência quando relacionada a granulometria das partículas ou ao tratamento.

Quando realizou-se a comparação entre os tipos de cimento fica claro que mesmo em granulometrias diferente e com a madeira tratada ou não existe um resultado muito mais favorável ao CPV-ARI, que inclusive quando da adição de cinza apresenta um resultado ainda mais favorável acompanhando a tendência de outros tipos de cimento de reduzir o inchamento quando da inserção de cinzas, provavelmente pois as cinzas tendem a tornar o compósito com uma característica quase pozolânica (BARROSO, 2011).

Por fim, na absorção de água percebe-se que houve um valor menor quando relacionado com a cinza, provavelmente, pelo motivo citado no parágrafo anterior assim como uma possível diminuição de vazios na estrutura final do compósito dada a granulometria da partícula de cinza, mesmo levando em conta sua heterogeneidade (BARROSO, 2011; KLEIB *et al.*, 2021). Essa melhora foi perceptível para todos os tipos de cimento, mas mais acentuada para o CPV-ARI.

A diminuição dos vazios do material de granulometria mais fina também explica o motivo para os compósitos com madeira de granulometria de 35 mesh terem apresentado melhora na absorção de água.

6. CONCLUSÕES

Considerando os três tipos de cimento o que mais se destacou foi o CPV-ARI por apresentar cura rápida e, no compósito cimento-madeira apresentou menor índice de inibição, o que foi observado com o melhor desempenho físico-mecânico dos compósitos independente das demais variações como granulometria ou tratamento das partículas.

O CP II F apresentou piores resultados especialmente quanto ao índice de inibição e ao desempenho físico se comparado ao CP II E e, isso pode ser justificado por sua composição química apresentar maior teor de material pozolânico, facilitando assim a cura inicial do cimento.

O tratamento das partículas apesar de ter apresentado uma pequena melhora para o inchamento em espessura e para a densidade quando do uso de madeira de granulometria menores (< 35 mesh) não se mostrou necessário por não proporcionar melhores resultados na grande maioria dos tratamentos realizados, ou não influenciar de maneira estatisticamente significativa em outros testes.

A granulometria das partículas apresenta piora em quase todos os testes quando utilizou-se partículas de espessura menores (< 35 mesh). No desempenho mecânico dos compósitos com partículas mais finas assim como no quesito de absorção de água foi possível ver resultados piores para esse tamanho de partícula, resultados similares foram observados por Azambuja *et al.*, (2017).

A proposta de adicionar cinzas ao material cimentício se mostrou favorável uma vez que a presença de cinzas melhora o compósito em algumas propriedades físicas e possui pouca influência negativa no módulo de ruptura, sendo acentuada somente no módulo de elasticidade, mas mesmo assim ainda dentro de vários parâmetros de produção.

Uma vez que este material, a cinza, geralmente tem por finalidade o descarte, a economia com a substituição de cinzas em um material cimentício pode ser muito grande, mesmo diminuindo a quantidade de cinza apresentada neste estudo, 20% do total em peso do cimento, ainda assim o ganho tanto econômico quanto ambiental pode ser muito elevado.

A inserção de partículas de madeira em um material compósito de cimento se mostra viável por não prejudicar de forma significativa o desempenho físico-mecânico dos painéis compósitos, no entanto a madeira, como é visto na literatura, tem um efeito por conta incompatibilidade com o cimento.

O compósito proposto neste estudo não apresenta desempenho estrutural, porém permite aplicações na construção civil como elementos de forros ou fechamentos verticais

sem solicitações, permitindo assim o desenvolvimento de um produto mais sustentável, com bom desempenho em ambientes úmidos sem contato diretos com água, permitindo a utilização de resíduos de cinza que atualmente não possuem valor agregado e, são de difícil descarte.

Em estudos futuros recomenda-se um estudo com a inserção somente de cinzas, sem a colocação de madeira, para que além de um possível produto não estrutural possa ser estudado o uso de um material compósito estrutural, ou a inserção de um percentual de cinzas inferior a 20%. Sugere-se ainda estudos que busquem utilizar espécies de madeira com menores concentrações de açúcares, visando maior interação madeira-cimento.

Por fim, existem na literatura tratamentos com aditivos químicos que melhoram a interação madeira-cimento, que podem, também, serem sugeridos como propostas para estudos futuros.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

AHMED, M.; BASHAR, I.; ALAM, S. T.; WASI, A. I.; JERIN, I.; KHATUN, S.; RAHMAN, M. An overview of Asian cement industry: Environmental impacts, research methodologies and mitigation measures. **Sustainable Production and Consumption**, London, v. 28, p. 1018–1039, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.024>. Acesso em: 22 jan. 2022.

AKINYEMI, B. A.; DAI, C. Development of banana fibers and wood bottom ash modified cement mortars. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 241, p. 118041, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118041>. Acesso em: 27 ago. 2022.

AL-OBAIDY, F.; YAZDANI, F.; MOHAMMADI, F. A. Intelligent testing for Arduino UNO based on thermal image. **Computers and Electrical Engineering**, Elmsford, v. 58, p. 88–100, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.01.014>. Acesso em: 11 fev. 2022.

AMIANDAMHEN, S. O.; ADAMOPOULOS, S.; ADL-ZARRABI, B.; YIN, H.; NORÉN, J. Recycling sawmilling wood chips, biomass combustion residues, and tyre fibres into cement-bonded composites: Properties of composites and life cycle analysis. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 297, p. 123781, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123781>. Acesso em: 10 mar. 2022.

ANATOL'EVNA, G. A.; ANATOL'EVICH, K. S.; VLADISLAVOVICH, Z. V. Губанова А.А., Котковец С.А., Золотарев В.В. Макет системы автоматической очистки воды с применением датчиков поплавкового типа на платформе Arduino Uno. **Электроника и электротехника**, Saratov, v. 1, n. 1, p. 24–30, 2019. Disponível em: https://www.sgau.ru/kisuuz/uploads/img/18-09-15/1537026932/KKL_13.03.01_B1.B.22_EOP_30.08.2017.pdf. Acesso em: 15 fev. 2022.

AYARS, G.; ALTMAN, L.; FRAZIER, C.; CHI, E. The toxicity of constituents of cedar and pine woods to pulmonary epithelium. **The Journal of Allergy and Clinical Immunology**, New York, v. 83, n. 3, 1989. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0091674989900730>. Acesso em: 22 ago. 2022.

AYOBAMI, A. B. Performance of wood bottom ash in cement-based applications and comparison with other selected ashes: Overview. **Resources, Conservation and Recycling**, Sacramento, v. 166, n. December 2020, p. 105351, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105351>. Acesso em: 27 ago. 2022.

AZAMBUJA, R. da R.; CASTRO, V. G. de; BÔAS, B. T. V.; PARCHEN, C. F. A.; IWAKIRI, S. Particle size and lime addition on properties of wood-cement composites produced by the method of densification by vibro compaction. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 47, n. 7, 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782017000700301&lng=en&tlng=en. Acesso em: 27 ago. 2022.

BAEYENS FERRI, A.; GOFFIN, T. Selected Legislation and Jurisprudence European Court of Justice. **The International Journal of Marine and Coastal Law**, Leiden, v. 25, n. 2, p. 271–185, 2010. Disponível em: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E. Acesso em: 15 fev. 2022.

BARBOZA, L. da S.; BATISTA, V. M.; NEVES, K. V.; SANTOS, R. S. Estudo da viabilidade da utilização de resíduos de polimento e retificação de cerâmica para fabricação de argamassa. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, 2020. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762020000400356&tlng=pt. Acesso em: 27 ago. 2022.

BARRAGÁN, H. **Arduino untold history**. San Francisco [s. n.], 2016. Disponível em: <https://arduinhistory.github.io/>. Acesso em: 12 fev. 2022.

BARROSO, T. R. **Estudo da Atividade Pozolânica e da Aplicação em Concreto de Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar com Diferentes Características Físico-Químicas**. Orientador: Guilherme Chagas Cordeiro. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-civil/wp-content/uploads/sites/3/2015/09/Tha%C3%ADs-Ribeiro-Barroso.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2022.

BATTAGIN, A. F. Uma breve história do cimento Portland. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, São Paulo, p. 1–2, 2009. Disponível em: <https://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/%0Ahttp://files/121/uma-breve-historia-do-cimento-portland.html>. Acesso em: 10 fev. 2022.

BERGER, F.; GAUVIN, F.; BROUWERS, H. J. H. The recycling potential of wood waste into wood-wool/cement composite. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 260, p. 119786, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119786>. Acesso em: 10 maio 2022.

BISWAS, B.; PANDEY, N.; BISHT, Y.; SINGH, R.; KUMAR, J.; BHASKAR, T. Pyrolysis of agricultural biomass residues: Comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk. **Bioresource Technology**, Essex, v. 237, p. 57–63, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852417301633>. Acesso em: 10 fev. 2022.

BORA, P.; KANAKARAJA, P.; CHIRANJEEVI, B.; JYOTHI SRI SAI, M.; JESWANTH, A. Smart real time health monitoring system using Arduino and Raspberry Pi. **Materials Today: Proceedings**, Hong Kong, v. 46, p. 3855–3859, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.290>. Acesso em: 10 fev. 2022.

BORGES, L. A. C. **Ensaio de compressão de corpo de prova com duplo corte em cunha na avaliação de concretos com baixos teores de fibra de aço**. 2017. Orientador: Antonio Domingues de Figueiredo. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo 2017. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-11042017-143957/>. Acesso em: 16 ago. 2021.

BOUTIN, M. P.; FLAMIN, C.; QUINTON, S.; GOSSE, G.; INRA, L. Study of the environmental characteristics of hemp for the analysis of its life cycle. **Ministère de l'Agriculture et de la Pêche**, Paris, v. 1, n. 1, 2005. Disponível em: [http://refhub.elsevier.com/S0926-6690\(19\)30794-0/sbref0025](http://refhub.elsevier.com/S0926-6690(19)30794-0/sbref0025). Acesso em: 18 nov. 2021.

BRASIL, M. da A. P. e A. **Manual De Métodos Analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos**. Brasília: [s. n.], 2014. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/manual-de-metodos_2017_isbn-978-85-7991-109-5.pdf. Acesso em: 14 jul. 2022.

BYE, G. C. **Portland Cement: Composition, Production, and Properties**. Oxford, Pergamon Press, 1983. 1983.(Institute of Ceramics textbook series). Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=WuJTAAAMAAJ>. Acesso em: 17 nov. 2021.

CASTRO, A. L. de; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional. **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, n. 341, p. 10–21, 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132011000100002&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 11 dez. 2019.

CASTRO, V.; PARCHEN, C.; IWAKIRI, S. Particle Sizes and Wood/Cement Ratio Effect on the Production of Vibro-compacted Composites. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 25, n. 4, 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2179-80872018000400101&lng=en&tlng=en. Acesso em: 16 ago. 2020.

CASTRO, V. G. de; PARCHEN, C. F. A.; IWAKIRI, S. Produção de compósitos madeira-cimento de baixa densidade pelo método vibro-dinâmico de compactação. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, 2019. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762019000200311&tlng=pt. Acesso em: 18 jan. 2022.

CETINER, I.; SHEA, A. D. Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 168, p. 374–384, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778817326749>. Acesso em: 18 ago. 2020.

CHANG, C. Y.; GAU, M. L.; TANG, K. Y.; HWANG, G. J. Directions of the 100 most cited nursing student education research: A bibliometric and co-citation network analysis. **Nurse Education Today**, Edinburgh, v. 96, n. July 2020, p. 104645, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2020.104645>. Acesso em: 15 fev. 2022.

CHEN, H.; MA, X.; DAI, H. Reuse of water purification sludge as raw material in cement production. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 32, n. 6, p. 436–439, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.02.009>. Acesso em: 18 jun. 2020.

CHOWDHURY, S.; MISHRA, M.; SUGANYA, O. The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview. **Ain Shams Engineering Journal**, Cairo, v. 6, n. 2, p. 429–437, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2014.11.005>. Acesso em: 18 jan. 2020.

CNI. A indústria brasileira de cimento base para a construção do

desenvolvimento Associação Brasileira de Cimento Portland, Rio de Janeiro, [s. n.],

2017. Disponível em:

https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/d2/4b/d24b904d-c672-43f5-a0b7-9644ad97091a/abcp.pdf. Acesso em: 17 jun. 2021.

COUTO, C.; ALMEIDA, J. A.; PINTO, J. D. da S.; BAMBERG, P.; STARLING, T.

Influência da pozolanicidade da escória de alto-forno nas propriedades de argamassas e concretos duráveis. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 2, n. 1, p. 31–34, 2010. Disponível em: <http://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/1728/1097>. Acesso em: 15 fev. 2022.

DANRAKA, M. N.; AZIZ, F. N. A. A.; JAAFAR, M. S.; NASIR, N. M.;

ABDULRASHID, S. **Application of Wood Waste Ash in Concrete Making: Revisited.**

In: Global Civil Engineering Conference [S. l.: s. n.], 2019. p. 69–78. Disponível em:

http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-8016-6_7. Acesso em: 13 ago. 2020.

DEOLALKAR, S. P. **Composite Cements.** *In: DESIGNING GREEN CEMENT*

PLANTS. [S. l.: s. n.], Elsevier, 2016. p. 41–44. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128034200000068>. Acesso em: 10 ago. 2021.

DZURENDA, L.; BANSKI, A. Dependence of the boiler flue gas losses on humidity of wood biomass. **Archives of Thermodynamics**, Warsaw, v. 36, n. 4, p. 77–86, 2015.

Disponível em: <http://journals.pan.pl/dlibra/publication/109182/edition/94809/content>.

Acesso em: 11 fev. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Relatório - Ben2021**, Brasília, [s. n.],

2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>.

Acesso em: 17 jun. 2021.

FADELE, O. A.; ATA, O. Water absorption properties of sawdust lignin stabilised

compressed laterite bricks. **Case Studies in Construction Materials**, Amsterdam, v. 9, p. e00187, 2018. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214509518300445>. Acesso em: 14 mar. 2021.

FÄRE, R.; GROSSKOPF, S.; PASURKA, C. A. Toxic releases: An environmental

performance index for coal-fired power plants. **Energy Economics**, Guildford, v. 32, n. 1, p. 158–165, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2009.07.005>. Acesso em: 12 jul. 2021.

FERMANELLI, C. S.; CÓRDOBA, A.; PIERELLA, L. B.; SAUX, C. Pyrolysis and

copyrolysis of three lignocellulosic biomass residues from the agro-food industry: A comparative study. **Waste Management**, Elmsford, v. 102, p. 362–370, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X19306932>. Acesso em: 11 ago. 2021.

FERMANELLI, C. S.; CÓRDOBA, A.; PIERELLA, L. B.; SAUX, C. Pyrolysis and

copyrolysis of three lignocellulosic biomass residues from the agro-food industry: A comparative study. **Waste Management**, Elmsford, v. 102, p. 362–370, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X19306932>. Acesso em: 11 ago. 2021.

FERRANDEZ-GARCIA, M. T.; FERRANDEZ-GARCIA, A.; GARCIA-ORTUÑO, T.;

FERRANDEZ-GARCIA, C. E.; FERRANDEZ-VILLENA, M. Influence of particle size

on the properties of boards made from *Washingtonia palm* rachis with citric acid.

Sustainability, Zurich, v. 12, n. 12, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/12/4841>. Acesso em: 04 fev. 2021.

FERRO, F. S.; ALMEIDA, T. H. de; SOUZA, A. M. de; ALMEIDA, D. H. de; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Painel híbrido OSB/MDP de madeira *Pinus taeda* e resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 7–14, 2019. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212019000300007&tlng=pt. Acesso em: 07 jul. 2021.

FIGUEIREDO LATORRACA, J. V. de; IWAKIRI, S. Efeitos do tratamento das partículas de *eucalyptus dunnii* (maid), da variação da relação madeira-cimento e do uso de aditivos sobre as propriedades físicas e mecânicas de chapas de madeira-cimento. **CERNE**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 68–76, 2000. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74460108>. Acesso em: 12 fev. 2022.

FUJIKAKE, I. Selection of tree species for plantations in Japan. **Forest Policy and Economics**, Amsterdam, v. 9, n. 7, p. 811–821, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389934106001092>. Acesso em: 10 maio. 2021.

GOVIN, A.; PESCHARD, A.; FREDON, E.; GUYONNET, R. New insights into wood and cement interaction. **Holzforschung**, Berlin, v. 59, n. 3, p. 330–335, 2005. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/HF.2005.054/html>. Acesso em: 10 maio. 2021.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. Orientador: Jefferson Benedicto Libardi Liborio. 2003. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade de São Paulo, São Paulo 2003. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18141/tde-07072003-160408/pt-br.php>. Acesso em: 04 fev. 2021.

HACHMI, M.; MOSLEMI, A. A.; CAMPBELL, A. G. A new technique to classify the compatibility of wood with cement. **Wood Science and Technology**, New York, v. 24, n. 4, p. 345–354, 1990. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF00227055>. Acesso em: 07 jul. 2021.

HALSTEAD, P. E. The Early History of Portland Cement. **Transactions of the Newcomen Society**, London, v. 34, n. 1, p. 37–54, 1961. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/tns.1961.003>. Acesso em: 11 ago. 2021.

HANSTED, A. L. S.; CACURO, T. A.; NAKASHIMA, G. T.; COSTA, V. E.; YAMAMOTO, H.; YAMAJI, F. M. Use of a lignocellulosic residue as solid fuel: The effect of ash content in the energy potential. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 116, p. 209–214, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092666901830147X>. Acesso em: 12 jan. 2021.

HANSTED, F. A. S.; HANSTED, A. L. S.; PADILLA, E. R. D.; CARASCHI, J. C.; GOVEIA, D.; DE CAMPOS, C. I. The use of nanocellulose in the production of medium density particleboard panels and the modification of its physical properties. **BioResources**,

Raleigh, v. 14, n. 3, p. 5071–5079, 2019. Disponível em:
<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/the-use-of-nanocellulose-in-the-production-of-medium-density-particleboard-panels-and-the-modification-of-its-physical-properties/>.
 Acesso em: 14 ago. 2022.

HANSTED, A. L. S.; HANSTED, F. A. S.; TOMELERI, J. O. P.; CACURO, T. A.; SETTE JR., C. R.; YAMAJI, F. M.; COSTA, V. E. Biomass in an industrial boiler: characterizing and reducing waste from the burning process. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 11, n. 9, p. e45511931948, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/31948>. Acesso em: 02 nov. 2022.

HANSTED, F. A. S.; HANSTED, A. L. S.; YAMAMOTO, H.; CHRISTOFORO, A. L.; YAMAJI, F. M.; CAMPOS, C. I. de. Potencial de reciclagem de resíduos de madeira e cinza de caldeira de biomassa em um material compósito cimentício. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/6646>. Acesso em: 02 nov. 2022.

HANSTED, A. L. S.; NAKASHIMA, G. T.; MARTINS, M. P.; YAMAJI, F. M. Physico-Chemical Characterization of *Leucaena leucocephala* Biomass for Solid-Fuel Production. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 8, n. 5, p. 1449–1460, 2016. Disponível em: http://rvq.sbq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=662&nomeArquivo=v8n5a14.pdf. Acesso em: 12 jan. 2021.

HOFSTRAND, A. D.; MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing Characteristics of Wood Particles From Nine Northern Rocky Mountain Species Mixed With Portland Cement. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 2, p. 57–61, 1984. Disponível em: <http://europepmc.org/abstract/AGR/GUA84036583>. Acesso em: 07 jul. 2021.

HOSSAIN, M. U.; POON, C. S.; KWONG WONG, M. Y.; KHINE, A. Techno-environmental feasibility of wood waste derived fuel for cement production. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 230, p. 663–671, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.132>. Acesso em: 10 maio 2022.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual Indústria Brasileira de árvores**, Brasília, p. 1–80, 2019. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2021.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual Indústria Brasileira de árvores**. Brasília, p. 1–93, 2021. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2022.

IRLE, M. A.; BARBU, M. C.; REH, R.; ROWELL, L. B.; M, R. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Madison, CRC Press, 2012. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781439853818>. Acesso em: 12 fev. 2022.

IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE CIMENTO-MADEIRA. **CERNE**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 68–74, 2008. Disponível em:

<https://www.redalyc.org/pdf/744/74414109.pdf>. Acesso em: 11 maio 2021.

IWAKIRI, S.; SILVA, L. S. da; TRIANOSKI, R.; BONDUELLE, G. M.; ROCHA, V. Y. da. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* “Paricá” e *Cecropia hololeuca* “Embaúba” para produção de painéis cimento-madeira. **CERNE**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 303–308, 2012. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-77602012000200015&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 05 jun. 2021.

JEONG, Y. K.; SONG, M.; DING, Y. Content-based author co-citation analysis. **Journal of Informetrics**, Amsterdam, v. 8, n. 1, p. 197–211, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751157713001107>. Acesso em: 10 nov. 2021.

KARADE, S. R. Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 24, n. 8, p. 1323–1330, 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061810000383>. Acesso em: 05 jun. 2021.

KASAI, Y.; KAWAMURA, M.; ZHOU, J. PRODUCTION PROCESS AND BENDING/COMPRESSIVE STRENGTH OF WOOD-CHIP CONCRETE WITH DEMOLISHED-TIMBER. **Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)**, [s. l.], v. 60, n. 473, p. 1–10, 1995. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijs/60/473/60_KJ00004100137/_article/-char/ja/. Acesso em: 08 ago. 2021.

KAUKO, H.; ROHDE, D.; KNUDSEN, B. R.; SUND-OLSEN, T. Potential of Thermal Energy Storage for a District Heating System Utilizing Industrial Waste Heat. **Energies**, Paris, v. 13, n. 15, p. 3923, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/15/3923>. Acesso em: 12 nov. 2021.

KLEIB, J.; AOUAD, G.; ABRIAK, N.-E.; BENZERZOUR, M. Production of Portland cement clinker from French Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash. **Case Studies in Construction Materials**, Amsterdam, v. 15, p. e00629, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00629>. Acesso em: 02 jun. 2021.

KUTCHKO, B.; KIM, A. Fly ash characterization by SEM–EDS. **Fuel**, Guildford, v. 85, n. 17–18, p. 2537–2544, 2006. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236106001906>. Acesso em: 07 jun. 2021.

LATORRACA, J. V. D. F. **Eucalyptus spp. na produção de painéis de cimento-madeira**. 2000. 191 f. - Universidade Federal do Paraná, [s. l.], 2000. Disponível em: [https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/25416/T - LATORRACA%2C JOAO VICENTE DE FIGUEIREDO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/25416/T - LATORRACA%2C%20JOAO%20VICENTE%20DE%20FIGUEIREDO.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 12 mar. 2021.

LI, M.; NICOLAS, V.; KHELIFA, M.; EL GANAOU, M.; FIERRO, V.; CELZARD, A. Modelling the hygrothermal behaviour of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 142, n. November, p. 111784, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926669019307940>. Acesso em: 08 nov. 2022.

LIM, C.; JUNG, E.; LEE, S.; JANG, C.; OH, C.; NAM SHIN, K. Global Trend of Cement

Production and Utilization of Circular Resources. **Journal of Energy Engineering**, New York, v. 29, n. 3, p. 57–63, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2020.29.3.057>. Acesso em: 12 ago. 2021.

LINHARES, B. T. de. **Avaliação do desempenho de cimentos CPII e ECPII F com diferentes teores de pozolanas frente ao ataque de íons sulfato**. Orientadora: Denise Carpena Coitinho. 2003. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/26024>. Acesso em: 10 fev. 2022.

LIZ CIMENTOS, São Paulo [S. l.], [s. n.]. Disponível em: <https://www.cimentosliz.com.br/>. Acesso em: 08 nov. 2022.

LOEB, A.; FERRARA, A.; ELLIS, R. S. **First Light in the Universe**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. v. 36. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-74163-3>. Acesso em: 08 out. 2021.

MAHZABIN, S.; HAMID, R.; WAN BADARUZZAMAN, W. H. Evaluation of chemicals incorporated wood fibre cement matrix properties. **Journal of Engineering Science and Technology**, Dallas v. 8, n. 4, 2013. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84883173884&origin=inward&txGid=19e7f74502844554a97bbf8b3d5713d1>. Acesso em: 12 out. 2022.

MANTEGAZINI, D. Z.; XAVIER, T. P.; BACELOS, M. S. Recuperação de resíduos de embalagens cartonadas através da pirólise: um estudo bibliométrico. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 7, p. e144973827, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/3827>. Acesso em: 11 nov. 2021.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. das. Painéis De Madeira No Brasil : Panorama e Perspectivas. **BNDS setorial**, Brasília, v. 1, n. 1, p. 127–156, 2008. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2526>. Acesso em: 10 fev. 2021.

MOHAMAD, N.; MUTHUSAMY, K.; EMBONG, R.; KUSBIANTORO, A.; HASHIM, M. H. Environmental impact of cement production and Solutions: A review. **Materials Today: Proceedings**, Kidlington, v. 48, p. 741–746, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785321012943>. Acesso em: 08 nov. 2022.

MOREIRA, L. Medição de Temperatura Usando-se Termopar. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 7, n. 5, p. 51–53, 2002. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657157f8c9d6e028b467d/pdf/ci-7-5-587657157f8c9d6e028b467d.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2021.

NA, B.; WANG, Z.; WANG, H.; LU, X. Wood-cement compatibility review. **Wood Research**, Kyoto, v. 59, n. 5, p. 813–825, 2014. Disponível em: <http://www.woodresearch.sk/wr/201405/10.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2021.

NAZERIAN, M.; GHALEHNO, M. D.; GOZALI, E. Effects of wood species, particle sizes and dimensions of residue obtained from trimming of wood–cement composites on physical and mechanical properties of cement-bonded particleboard. **Wood Material**

Science and Engineering, kopenhagen, v. 6, n. 4, p. 196–206, 2011. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17480272.2011.601816>. Acesso em: 12 out. 2022.

NOLASCO, Adriana Maria. Resíduos da colheita e beneficiamento da caixeta - Tabebuia cassionides (Lam.) DC.: caracterização e perspectivas. Orientador: Virgílio Maurício Viana 2000. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Disponível em: http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_13037_Disserta%E7%E3o Davila.pdf. Acesso em: 10 out. 2022.

OBERNBERGER, I.; BIEDERMANN, F.; WIDMANN, W.; RIEDL, R. Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 12, n. 3, p. 211–224, 1997. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953496000517>. Acesso em: 13 out. 2022.

OKINO, E. Y. A.; DE SOUZA, M. R.; SANTANA, M. A. E.; ALVES, M. V. D. S.; DE SOUSA, M. E.; TEIXEIRA, D. E. Physico-mechanical properties and decay resistance of Cupressus spp. cement-bonded particleboards. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 27, n. 3, p. 333–338, 2005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946504000836>. Acesso em: 08 jul. 2021.

OKINO, E. Y. .; SOUZA, M. R. d.; SANTANA, M. A. .; ALVES, M. V. d. S.; SOUSA, M. E. de; TEIXEIRA, D. E. Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 26, n. 6, p. 729–734, 2004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946503000611>. Acesso em: 12 jun. 2021.

PARCHEN, C. F. A. Compósito Madeira Cimento De Baixa Densidade Produzido Com Compactação Vibro Dinâmica. (Tese De Doutorado) **Universidade Federal Do Paraná**, Curitiba, n. 41, p. 236, 2012. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/28935>. Acesso em: 11 jun. 2021.

PASSUELLO, A.; RODRÍGUEZ, E. D.; HIRT, E.; LONGHI, M.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L.; KIRCHHEIM, A. P. Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 166, p. 680–689, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617317225>. Acesso em: 07 abr. 2021.

POSI, P.; LERTNIMOOLCHAI, S.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. Pressed lightweight concrete containing calcined diatomite aggregate. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 47, p. 896–901, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.094>. Acesso em: 11 nov. 2021.

RAJAMMA, R.; BALL, R. J.; TARELHO, L. A. C.; ALLEN, G. C.; LABRINCHA, J. A.; FERREIRA, V. M. Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 172, n. 2–3, p. 1049–1060, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389409012308>. Acesso em: 08 nov. 2022.

RAJAMMA, R.; SENFF, L.; RIBEIRO, M. J.; LABRINCHA, J. A.; BALL, R. J.; ALLEN, G. C.; FERREIRA, V. M. Biomass fly ash effect on fresh and hardened state properties of

cement based materials. **Composites Part B: Engineering**, Kidlington, v. 77, p. 1–9, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836815001389>. Acesso em: 12 ago. 2022.

RAUPP, D. T.; PROCHNOW, T. R.; DEL PINO, J. C. História e contextualização no ensino de estereoquímica: uma proposta de abordagem para o ensino médio. **Contexto & Educação**, Ijuí, v. 35, n. 112, p. 432–455, 2020. Disponível em: <https://www.revistas.unijui.edu.br/index.php/contextoeducacao/article/view/8453>. Acesso em: 09 jan. 2021.

RIBEIRO, A. V. S.; PRUDÊNCIO JR, L. R.; MATOS, P. R. de; TAIRA, A. Influência de adições minerais na elevação da temperatura de concretos massa de elevada resistência à compressão. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, 2021. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762021000100302&tlng=pt. Acesso em: 08 jun. 2022.

RIXOM, M. R.; MAILVAGANAM, N. P.; MAILVAGANAM, N. P. **Chemical Admixtures for Concrete**. 3ed. Boca Raton: CRC Press, 1986. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=yNJTAAAMA AJ>. Acesso em: 13 out. 2022.

RONQUIM, R. M.; FERRO, F. S.; ICIMOTO, F. H.; CAMPOS, C. I.; BERTOLINI, M. da S.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composite with Lignocellulosic Grading Waste Variation. **International Journal of Composite Materials**, Lancaster, v. 4, n. 2, p. 69–72, 2014. Disponível em: <http://article.sapub.org/10.5923.j.comaterials.20140402.05.html>. Acesso em: 11 jun. 2021.

SADIKU, N. A.; SANUSI, A. Wood pre-treatment influence on the hydration of Portland cement in combination with some tropical wood species. **Pro Ligno**, Brasov, v. 10, n. 2, 2014. Disponível em: https://www.academia.edu/75805740/Wood_Pre_Treatment_Influence_on_the_Hydration_of_Portland_Cement_in_Combination_with_Some_Tropical_Wood_Species. Acesso em: 11 jun. 2021.

SANDARUWAN, S. M. D. T.; PALLEGEDERA, A. Modelling & simulation of the hydration process of cement for rapid concrete constructions. *In: 2019 INTERNATIONAL RESEARCH CONFERENCE ON SMART COMPUTING AND SYSTEMS ENGINEERING (SCSE)*, 2019, Kelaniya, . **Anais [...]: IEEE**, 2019. p. 204–211. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8842689/>. Acesso em: 13 out. 2022.

SANTOS, R. F.; RIBEIRO, J. C. L.; FRANCO DE CARVALHO, J. M.; MAGALHÃES, W. L. E.; PEDROTI, L. G.; NALON, G. H.; LIMA, G. E. S. de. Nanofibrillated cellulose and its applications in cement-based composites: A review. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 288, p. 123122, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821008825>. Acesso em: 09 jan. 2022.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 114, n. March, p. 2–26, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>. Acesso em: 22 jan. 2022.

SHARMA, S.; ARORA, S. Economical graphene reinforced fly ash cement composite

made with recycled aggregates for improved sulphate resistance and mechanical performance. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 162, p. 608–612, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.027>. Acesso em: 11 mar. 2021.

SHI, C.; LI, Y.; ZHANG, J.; LI, W.; CHONG, L.; XIE, Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 112, p. 466–472, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652615011488>. Acesso em: 11 dez. 2019.

SILVA, R. B.; FONTES, C. M. A.; LIMA, P. R. L.; GOMES, O. da F. M.; LIMA, L. G. L. M.; MOURA, R. C. de A.; TOLEDO FILHO, R. D. Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 15, n. 4, p. 321–334, 2015. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212015000400321&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 09 jan. 2020.

SILVEIRA, V. L.; SILVA, B. E. P.; GUIMARÃES, A. C. R. Caracterização física, química e mecânica de misturas solo/cinza de caldeira a coque para emprego em camadas de base e sub-base. **Instituto Militar de Engenharia**, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/7851/1/ESTABILIZA%20C3%87%20C3%83O%20DE%20SOLOS%20COM%20CINZA%20DE%20CALDEIRA%20A%20COQUE%20PARA%20CAMADAS%20DE%20PAVIMENTOS.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2021.

SIMIONI, F. J.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; DEBONI, T. L.; DOS PASSOS, B. M. Cadeia produtiva de energia de biomassa florestal: O caso da lenha de eucalipto no polo produtivo de itapeva - SP. **Ciencia Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 310–323, 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212015000400321&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 19 fev. 2021.

SNIC. **Consumo Mensal de Cimento 2020**. Rio de Janeiro, [s. n.], 2021. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>. Acesso em: 08 nov. 2022.

SOARES DEL MENEZZI, C. H.; GOMES DE CASTRO, V.; RABELO DE SOUZA, M. PRODUCTION AND PROPERTIES OF A MEDIUM DENSITY WOOD-CEMENT BOARDS PRODUCED WITH ORIENTED STRANDS AND SILICA FUME. **Maderas. Ciencia y tecnología**, Concepcion, v. 9, n. 2, p. 105–115, 2007. Disponível em: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2007000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=en. Acesso em: 3 out. 2022.

STAFFORD, F. N.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J. A.; HOTZA, D. Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 137, p. 1293–1299, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616309386>. Acesso em: 08 nov. 2022.

STOLZ, J.; BOLUK, Y.; BINDIGANAVILE, V. Wood ash as a supplementary cementing material in foams for thermal and acoustic insulation. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 215, p. 104–113, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.174>. Acesso em: 12 jan. 2021.

- SUMMERBELL, D. L.; BARLOW, C. Y.; CULLEN, J. M. Potential reduction of carbon emissions by performance improvement: A cement industry case study. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 135, p. 1327–1339, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.155>. Acesso em: 16 fev. 2020.
- SUN, L.; HAIDRY, A. A.; LI, Z.; XIE, L.; WANG, Z.; FATIMA, Q.; YAO, Z. Effective use of biomass ash as an ultra-high humidity sensor. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, Norwell, v. 29, n. 21, p. 18502–18510, 2018. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10854-018-9966-3>. Acesso em: 12 nov. 2021.
- T. NAKASHIMA, G.; C. S. ADHMAN, I.; L. S. HANSTED, A.; B. BELINI, G.; R. WALDMAN, W.; M. YAMAJI, F. Lignocellulosic Materials: Characterization and Production of Briquettes. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 9, n. 1, p. 150–162, 2017. Disponível em: http://rvq.s bq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=688&nomeArquivo=v9n1a12.pdf. Acesso em: 08 nov. 2022.
- TAMANNA, K.; RAMAN, S. N.; JAMIL, M.; HAMID, R. Utilization of wood waste ash in construction technology: A review. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 237, p. 117654, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117654>. Acesso em: 08 nov. 2022.
- TORTOSA MASIÁ, A. A.; BUHRE, B. J. P.; GUPTA, R. P.; WALL, T. F. Characterising ash of biomass and waste. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 88, n. 11–12, p. 1071–1081, 2007. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382007001476>. Acesso em: 18 ago. 2021.
- TOSTI, L.; VAN ZOMEREN, A.; PELS, J. R.; DAMGAARD, A.; COMANS, R. N. J. Life cycle assessment of the reuse of fly ash from biomass combustion as secondary cementitious material in cement products. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 245, 2020. Acesso em: 12 fev. 2021.
- UKYO, S.; MIYATAKE, A.; SHINDO, K.; HIRAMATSU, Y. Shear strength properties of hybrid (hinoki cypress and Japanese cedar) cross-laminated timber. **Journal of Wood Science**, Kyoto, v. 67, n. 1, p. 23, 2021. Disponível em: <https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1186/s10086-021-01954-y>. Acesso em: 08 nov. 2022.
- UNITED NATIONS. **Sustainable Development Goals**. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <https://www.un.org/en/academic-impact/page/sustainable-development-goals>. Acesso em: 08 nov. 2022.
- USMAN, M.; KHAN, A. Y.; FAROOQ, S. H.; HANIF, A.; TANG, S.; KHUSHNOOD, R. A.; RIZWAN, S. A. Eco-friendly self-compacting cement pastes incorporating wood waste as cement replacement: A feasibility study. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 190, p. 679–688, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.186>. Acesso em: 10 dez. 2021.
- VARANDA, L. D.; YAMAJI, F. M.; SANTOS, L. R. O.; SILVA, D. A. L.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Physical performance of particleboards using

Castor oil-based adhesive. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 10, p. 707–712, 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662018001000707&lng=en&tlng=en. Acesso em: 12 fev. 2021.

VIECILI, M. J. C.; HASTENPFLUG, D.; GIRARDI, R. Comparativo entre o teste de Vicat e a calorimetria semi-adiabática para determinação do tempo de início e fim de pega em cimentos Portland. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762018000300425&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 11 fev. 2021.

VILLAS-BÔAS, B. T.; IWAKIRI, S.; PARCHEN, C. F. A. Production and evaluation of low-density cast-wood-cement blocks for civil construction. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, Piracicaba, v. 48, n. 126, p. 1–11, 2020. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr126/2318-1222-scifor-48-126-e3177.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2021.

VOTORANTIM CIMENTOS, Votorantim, [s. n.]. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/>. Acesso em: 11 fev. 2021.

VU, V.-A.; CLOUTIER, A.; BISSONNETTE, B.; BLANCHET, P.; DUCHESNE, J. The Effect of Wood Ash as a Partial Cement Replacement Material for Making Wood-Cement Panels. **Materials**, Basel, v. 12, n. 17, p. 2766, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/17/2766>. Acesso em: 25 fev. 2021.

WEBER, A. M.; CECHIN, L.; TOKARSKI, R. B.; MATOSKI, A. Análise da influência do traço nas propriedades do compósito cimento-madeira. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, v. 1, n. 36, p. 50, 2017. Disponível em: <http://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/1029>. Acesso em: 25 fev. 2022.

WEI, Y. M.; ZHOU, Y. G.; TOMITA, B. Study of hydration behavior of wood cement-based composite II: effect of chemical additives on the hydration characteristics and strengths of wood-cement composites. **Journal of Wood Science**, Kyoto, v. 46, n. 6, p. 444–451, 2000. Disponível em: <https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1007/BF00765802>. Acesso em: 15 ago. 2022.

YASUDA, S.; IMA, K.; MATSUSHITA, Y. Manufacture of wood-cement boards VII: cement-hardening inhibitory compounds of hannoki (Japanese alder, *Alnus japonica* Steud.). **Journal of Wood Science**, Kyoto, v. 48, n. 3, p. 242–244, 2002. Disponível em: <https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1007/BF00771375>. Acesso em: 12 jan. 2021.

YE, K.; SHEN, L.; ZUO, J. Utilizing the linkage between domestic demand and the ability to export to achieve sustainable growth of construction industry in developing countries. **Habitat International**, Oxford, v. 38, p. 135–142, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0197397512000252>. Acesso em: 12 mar. 2020.

YIN, C.; ROSENDAHL, L. A.; KÆR, S. K. Grate-firing of biomass for heat and power

production. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 34, n. 6, p. 725–754, 2008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360128508000245>. Acesso em: 08 abr. 2021.

ZHUANG, X. Y.; CHEN, L.; KOMARNENI, S.; ZHOU, C. H.; TONG, D. S.; YANG, H. M.; YU, W. H.; WANG, H. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 125, p. 253–267, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616300798>. Acesso em: 22 jan. 2022.

Anexo A - Montagem do programa de Arduino

Para que fosse possível realizar um cálculo mais assertivo do índice de inibição o programa indicado a seguir foi escrito em linguagem C++ e adaptado para a utilização com a plataforma do Arduino (Figura 39).

Figura 39 - Programa em Arduino

```
#include "max6675.h" //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA DO SENSOR QUE LEVA O TERMOPAR

int ktcSO = 31; //PINO DIGITAL (SO)
int ktcCS = 33; //PINO DIGITAL (CS)
int ktcCLK = 35; //PINO DIGITAL (CLK / SCK)
int ktcSO2 = 37; //PINO DIGITAL (SO)
int ktcCS2 = 39; //PINO DIGITAL (CS)
int ktcCLK2 = 41; //PINO DIGITAL (CLK / SCK)
int ktcSO3 = 43; //PINO DIGITAL (SO)
int ktcCS3 = 45; //PINO DIGITAL (CS)
int ktcCLK3 = 47; //PINO DIGITAL (CLK / SCK)
int ktcSO4 = 49; //PINO DIGITAL (SO)
int ktcCS4 = 51; //PINO DIGITAL (CS)
int ktcCLK4 = 53; //PINO DIGITAL (CLK / SCK)
int ktcSO5 = 30; //PINO DIGITAL (SO)
int ktcCS5 = 32; //PINO DIGITAL (CS)
int ktcCLK5 = 34; //PINO DIGITAL (CLK / SCK)
int ktcSO6 = 36; //PINO DIGITAL (SO)
int ktcCS6 = 38; //PINO DIGITAL (CS)
int ktcCLK6 = 40; //PINO DIGITAL (CLK / SCK)

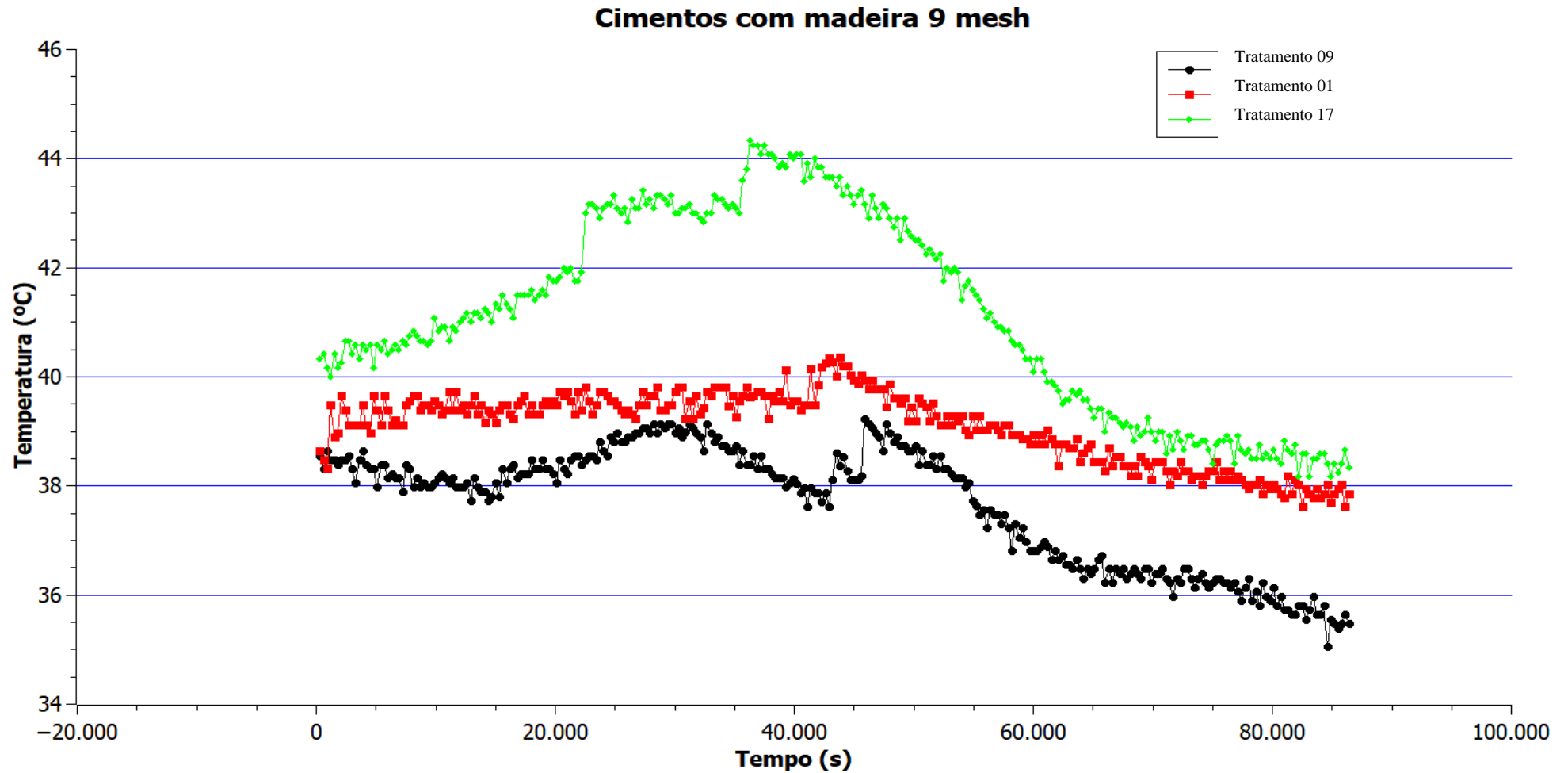
MAX6675 ktc6(ktcCLK, ktcCS, ktcSO); //CRIA UMA INSTÂNCIA UTILIZANDO OS PINOS (CLK, CS, SO)
MAX6675 ktc5(ktcCLK2, ktcCS2, ktcSO2); //CRIA UMA INSTÂNCIA UTILIZANDO OS PINOS (CLK, CS, SO)
MAX6675 ktc1(ktcCLK3, ktcCS3, ktcSO3); //CRIA UMA INSTÂNCIA UTILIZANDO OS PINOS (CLK, CS, SO)
MAX6675 ktc2(ktcCLK4, ktcCS4, ktcSO4); //CRIA UMA INSTÂNCIA UTILIZANDO OS PINOS (CLK, CS, SO)
MAX6675 ktc3(ktcCLK5, ktcCS5, ktcSO5); //CRIA UMA INSTÂNCIA UTILIZANDO OS PINOS (CLK, CS, SO)
MAX6675 ktc4(ktcCLK6, ktcCS6, ktcSO6); //CRIA UMA INSTÂNCIA UTILIZANDO OS PINOS (CLK, CS, SO)

void setup() {
  Serial.begin(9600); //INICIALIZA A SERIAL
  delay(173000); //INTERVALO DE 173000 MILISSEGUNDOS
}

void loop() {
  Serial.print(ktc1.readCelsius()); //IMPRIME NO MONITOR SERIAL A TEMPERATURA MEDIDA
  Serial.print(","); // NECESSÁRIA PARA SEPARAR OS CANAIS
  Serial.print(ktc2.readCelsius()); //IMPRIME NO MONITOR SERIAL A TEMPERATURA MEDIDA
  Serial.print(","); // NECESSÁRIA PARA SEPARAR OS CANAIS
  Serial.print(ktc3.readCelsius()); //IMPRIME NO MONITOR SERIAL A TEMPERATURA MEDIDA
  Serial.print(","); // NECESSÁRIA PARA SEPARAR OS CANAIS
  Serial.print(ktc4.readCelsius()); //IMPRIME NO MONITOR SERIAL A TEMPERATURA MEDIDA
  Serial.print(","); // NECESSÁRIA PARA SEPARAR OS CANAIS
  Serial.print(ktc5.readCelsius()); //IMPRIME NO MONITOR SERIAL A TEMPERATURA MEDIDA
  Serial.print(","); // NECESSÁRIA PARA SEPARAR OS CANAIS
  Serial.print(ktc6.readCelsius()); //IMPRIME NO MONITOR SERIAL A TEMPERATURA MEDIDA
  Serial.print(","); // NECESSÁRIA PARA SEPARAR OS CANAIS
  Serial.println(); //IMPRIME A LINHA ADICIONAL NO MONITOR SERIAL - PRECISA PARA O EXCEL
  delay(173000); //INTERVALO DE 173000 MILISSEGUNDOS
}
```

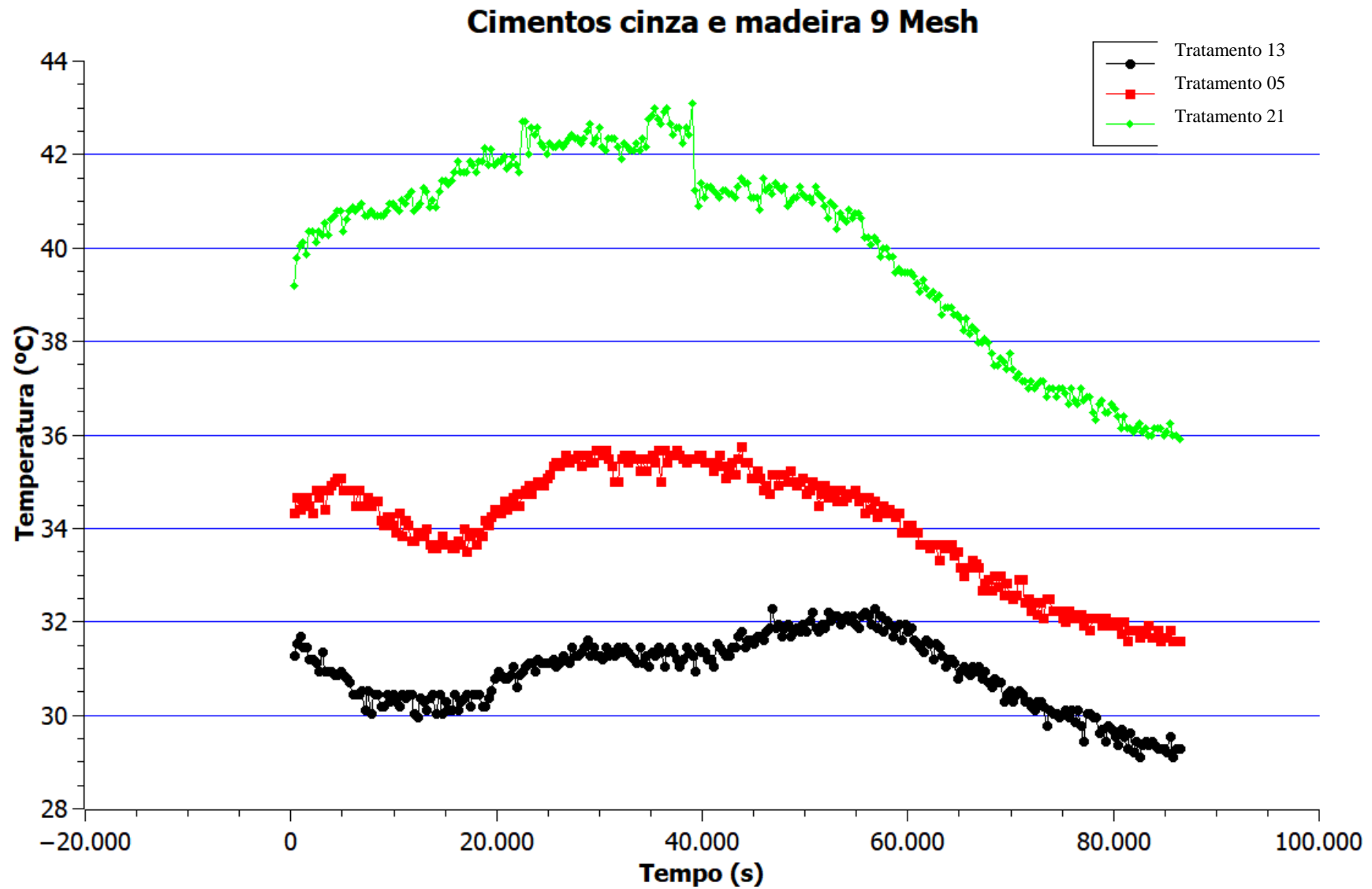
Anexo B – Gráficos de Curva de hidratação de todos os tratamentos

Figura 40 - Compósitos com cimentos e madeira 9 mesh



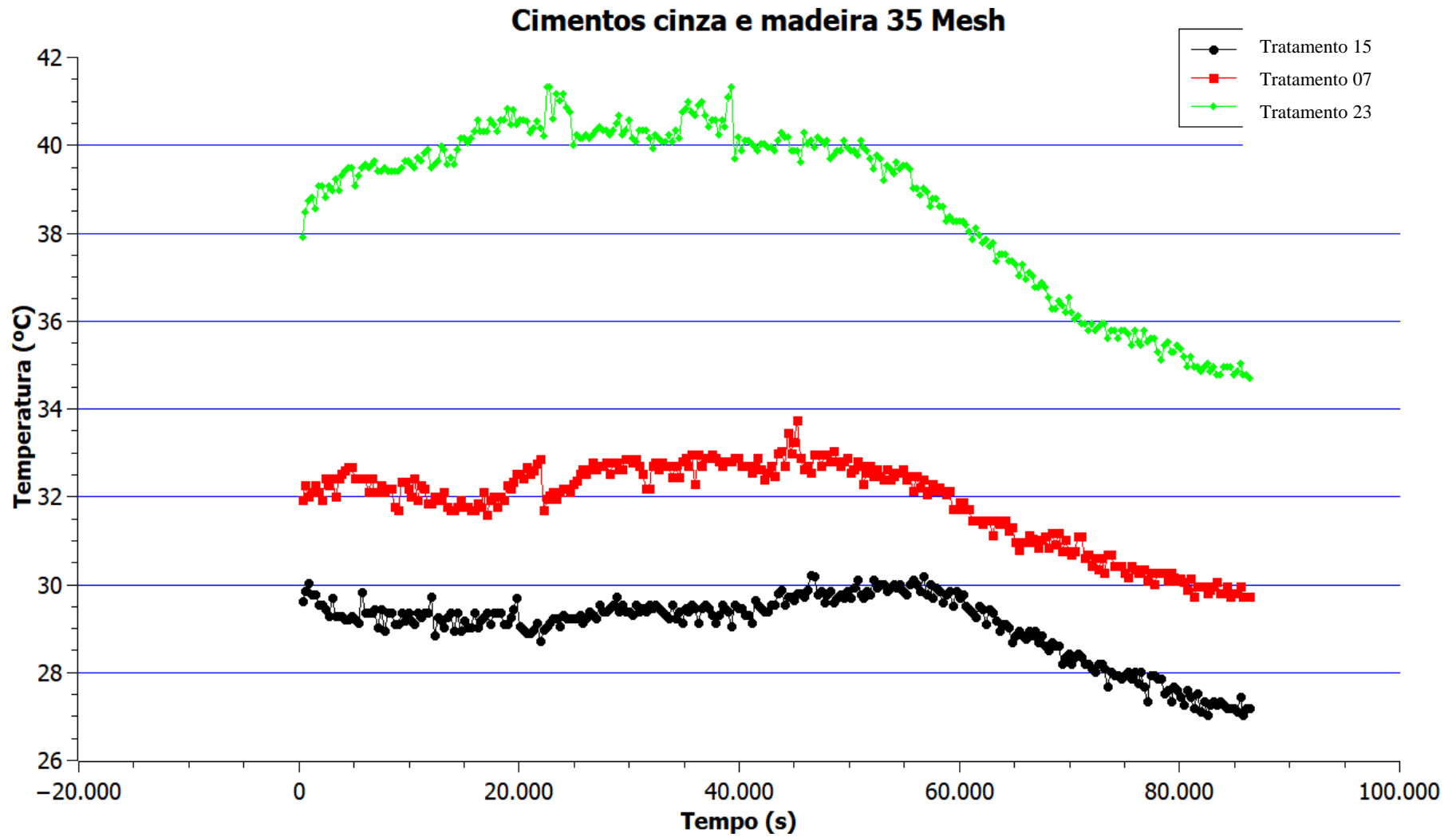
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 42– Compósitos com cimentos e madeira 9 mesh e cinza.



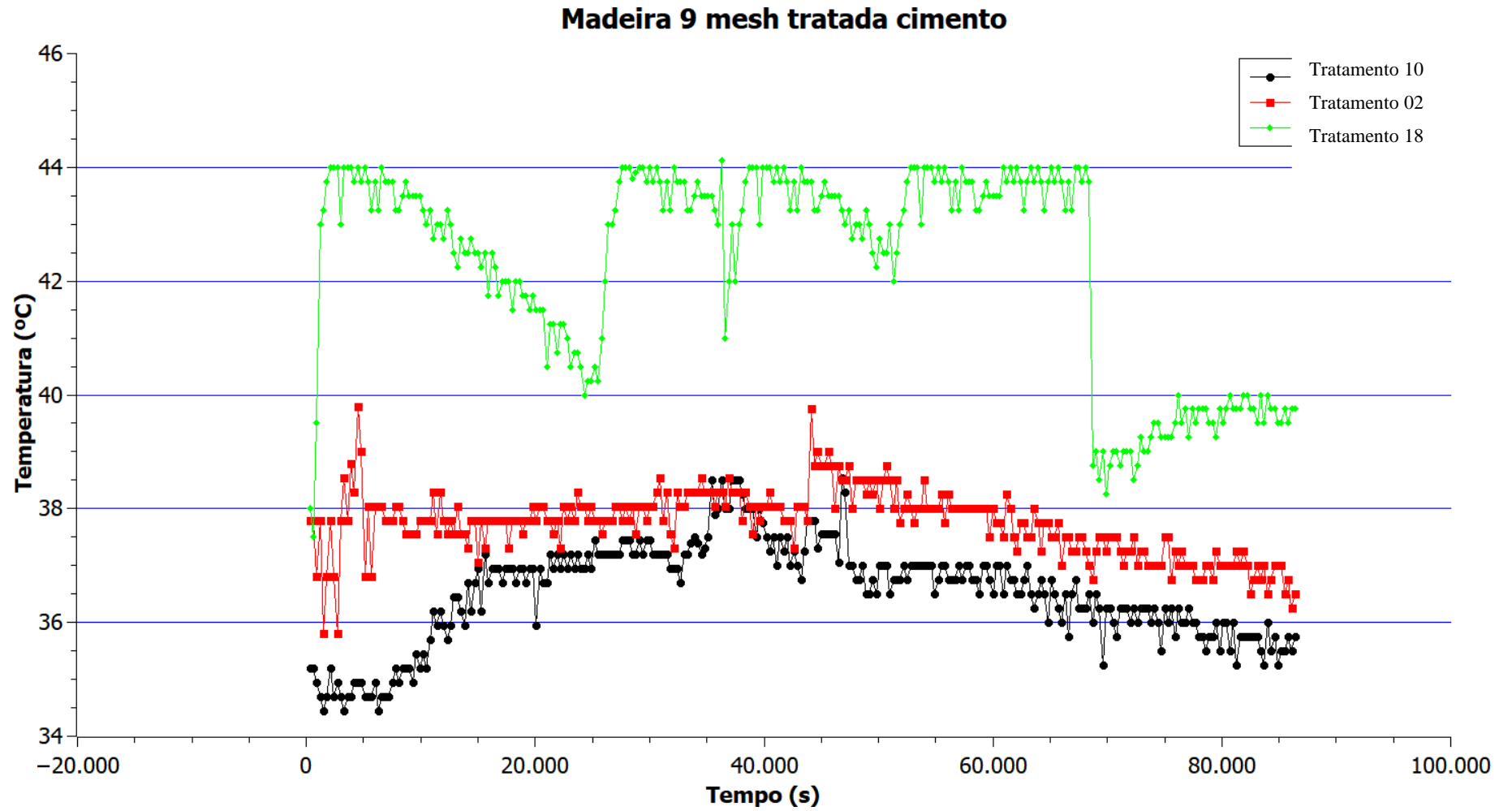
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 43- Compósitos com cimentos e madeira 35 mesh e cinza



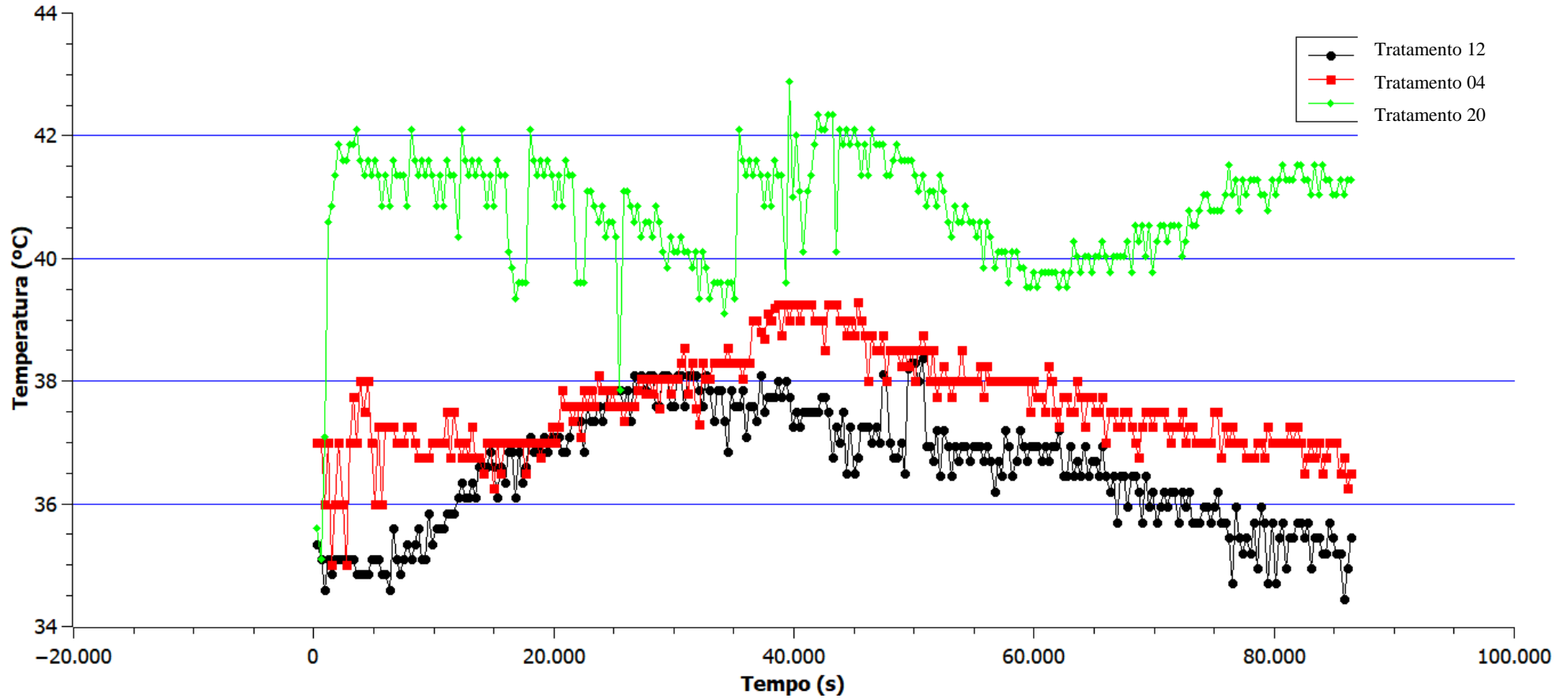
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 44– Compósitos com cimentos e madeira tratada 9 mesh



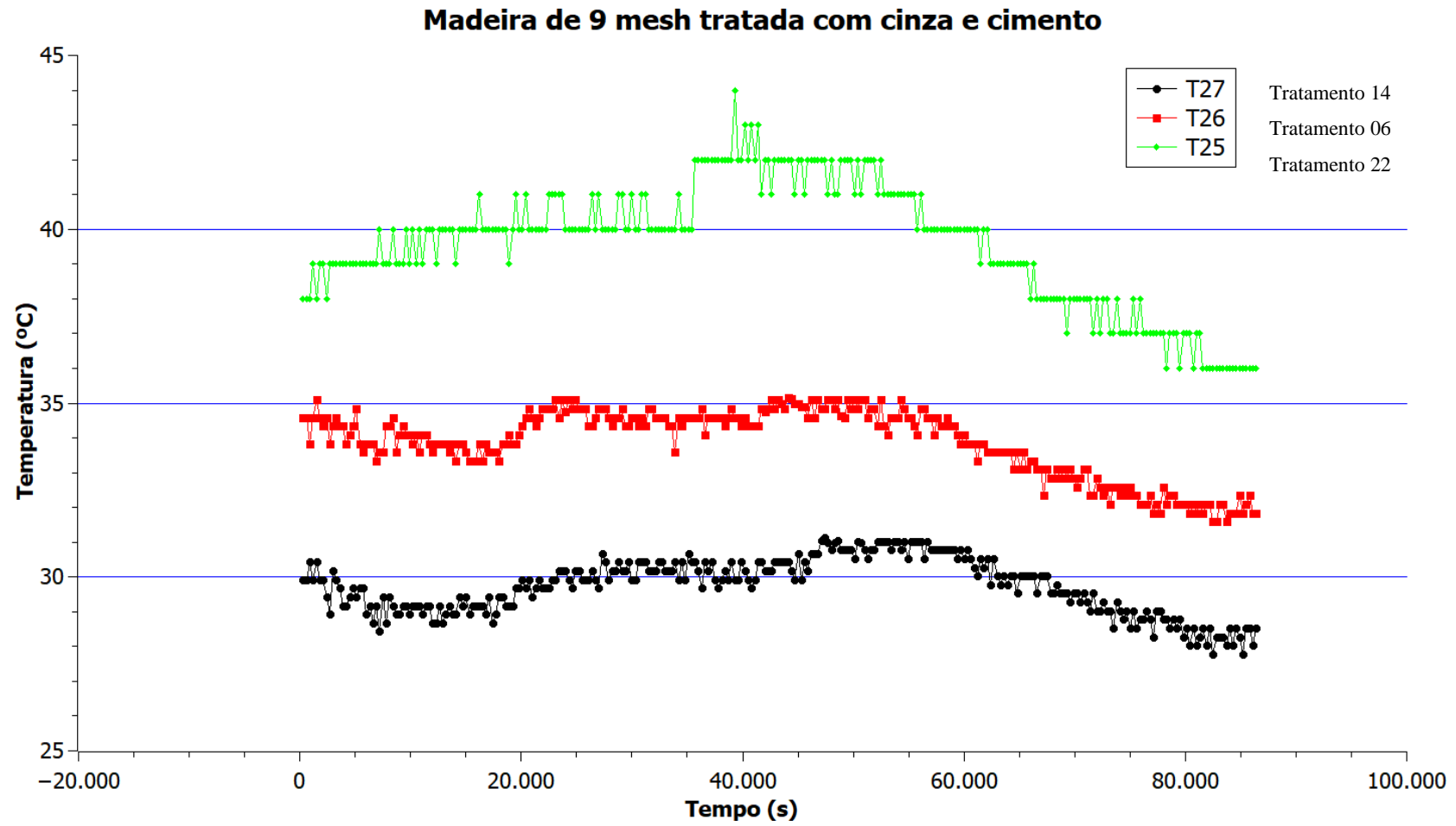
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 45- Compósitos com cimentos e madeira tratada 35 mesh

Madeira de 35 mesh tratada com cimento

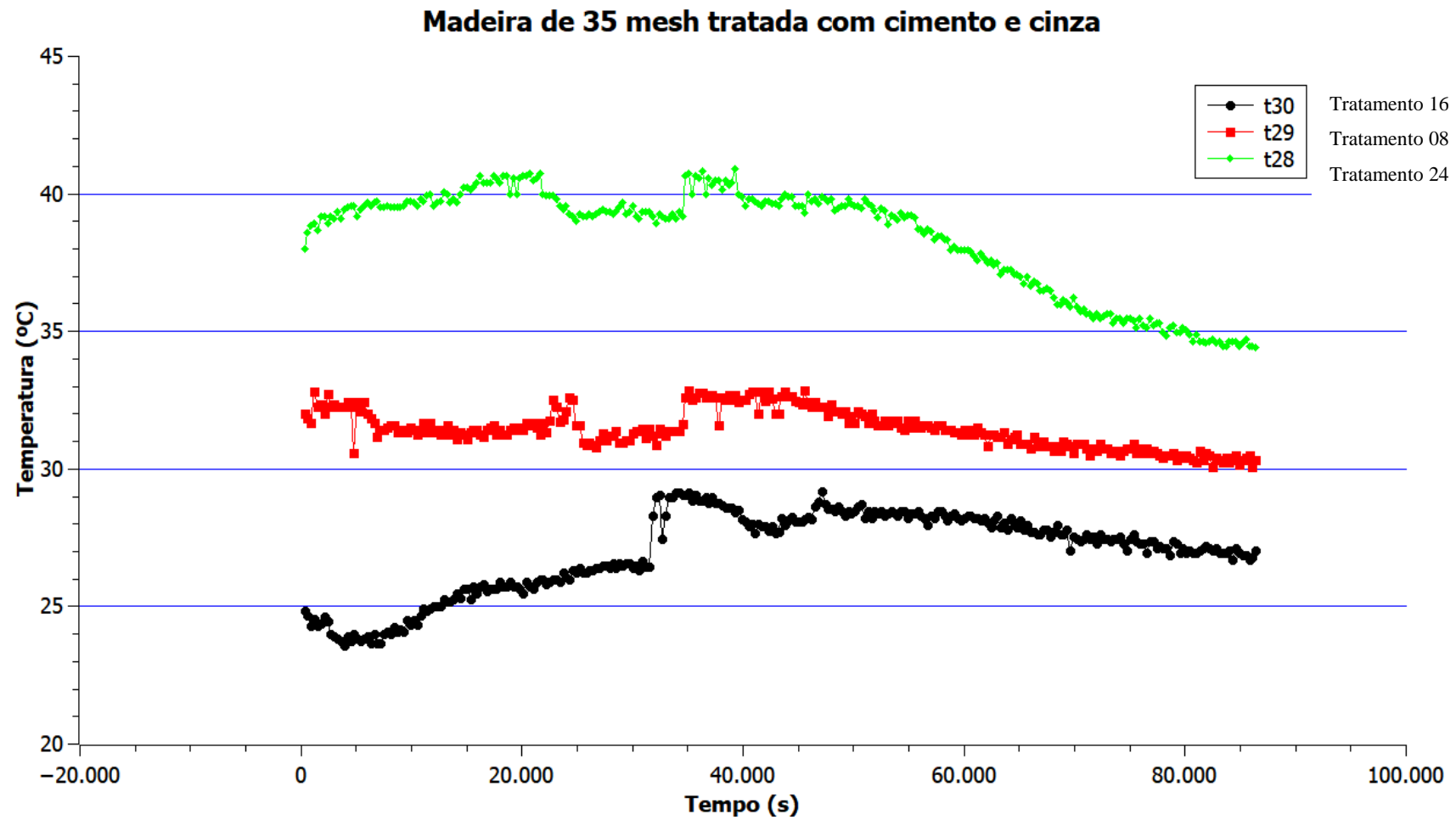
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 46- Compósitos com cimentos e madeira tratada 9 mesh e cinza



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 47- Compósitos com cimentos e madeira tratada 35 mesh e cinza



Fonte: Produção do próprio autor