Recital

Revista de Educação,
Ciência e Tecnologia de Almenara/MG.

ANÁLISE NA INCORPORAÇÃO DE PÓ DE *Eucalyptus cloeziana* COMO AGREGADO E REDUÇÃO DE CIMENTO EM BLOQUETES

Analysis in the incorporating Eucalyptus cloeziana powder as aggregate and cement reduction in blocks

Rodrigo de Castro LIMA
IFNMG campus Januária
rodrigo.lima@ifnmg.edu.br

Camila Alves MEDEIROS
IFNMG campus Januária
cam11@aluno.ifnmg.edu.br

Hemerson Barbosa da SILVA
IFNMG campus Januária
hbds1@aluno.ifnmg.edu.br

Mariah Eduarda Viana ANDRADE
IFNMG campus Januária
meva1@aluno.ifnmg.edu.br

Ana Julia Santos Ferreira CAMPOS
IFNMG campus Januária
ajsfc@aluno.ifnmg.edu.br

Deividy Chaves da SILVA
IFNMG campus Januária
dcds15@aluno.ifnmg.edu.br

Elias Bertulino SOUZA
IFNMG campus Januária
ebs@aluno.ifnmg.edu.br

Sebastião RAFAEL NETTO
IFNMG campus Januária
sebastiao.r.netto5@gmail.com

Jardel Reis HEDIA
IFNMG campus Teófilo Otoni
Jardel.heredia@ifnmg.edu.br

Geraldo Corrêa MACHADO
FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
geraldocorreamachado@gmail.com

DOI: https://doi.org/10.46636/recital.v6i3.626

Resumo

A síntese de concretos ecológicos à luz da Economia Circular contribui significativamente para redução da emissão de $CO_2(g)$ na atmosfera. Neste trabalho, propomos sintetizar concretos com base na redução de 10% e 20% de cimento usual a partir da adição, em mesmo percentual, de um agregado orgânico na forma de pó de serragem da espécie *Eucalyptus cloeziana*. Confeccionamos corpos de provas para testes comparativos com relação ao aumento de resistência mecânica e eficiência frente ao traço de bloquetes à base de cimentos usuais. Confrontamos a resistência mecânica desses materiais parcialmente ecológicos e analisamos os seus limites em bloquetes para utilidade em restritas pavimentações públicas.

Palavras-chave: Economia circular. Concreto sustentável. Resistência mecânica.

Abstract

The synthesis of ecological concretes in light of the Circular Economy contributes significantly to the reduction of $CO_2(g)$ emissions in the atmosphere. In this work, we propose to synthesize concretes based on the reduction of 10% and 20% of usual cement from the addition, of the same percentage, of an organic aggregate in the form of sawdust powder from the species *Eucalyptus cloeziana*. We prepared test specimens for comparative tests regarding the increase in mechanical resistance and efficiency compared to the mix of blocks based on usual cements. We compared the mechanical resistance of these partially ecological materials and analyzed their limits in blocks for use in restricted public paving.

Keywords: Circular economy. Sustainable concrete. Mechanical resistance.

INTRODUÇÃO

As últimas décadas foram marcadas por discussões, análises e pesquisas relacionadas à degradação ambiental e suas consequências quanto à destruição massiva na atmosfera, na hidrosfera e na litosfera terrestre, devido, principalmente, às ações antropológicas. Essa

destruição vem ocorrendo numa escala exponencial desde o início da Primeira Revolução Industrial. Dentre os diversos meios que corroboram significativamente para esse impacto, pode-se destacar a síntese de cimento tradicional em indústrias, muito utilizado pela construção civil. Sua fabricação corrobora para emissões de gases de efeito estufa, com produção de dióxido de carbono $CO_2(g)$, que a Organização das Nações Unidas (ONU) pretende reduzir por meio da iniciativa global *"ambição Net Zero"*, o qual prevê uma diminuição coletiva de 2 Gt (gigatoneladas) de $CO_2(g)$ nas emissões acumuladas até 2030. As emissões de gases na produção de cimento em nível mundial são estimadas entre 5% e 7% do total das emissões antrópicas de $CO_2(g)$ (WBCSD, 2010).

Um dos conceitos mais defendidos no século XXI para diminuição dos gases de efeito estufa e tentativas em minimizar os impactos de produtos poluentes ao globo terrestre é a chamada *Circular Economy* - Economia Circular (EC) que, segundo Geissdoerfer (2020), trata-se de um modelo de produção e consumo que envolve compartilhar, alugar, reutilizar, consertar, reformar e reciclar materiais e produtos existentes pelo maior tempo possível. De maneira geral, a EC tem como visão o enfrentamento associado aos desafios globais como mudanças climáticas, destruição e perda de biodiversidade, desperdício e poluição generalizada, enfatizando a implementação em três princípios, a saber: eliminar o desperdício e a poluição, manter produtos e materiais em uso e regenerar os sistemas naturais (Reuter, 2019; Parliament, 2017; Guillot, 2015). Pictoricamente, uma ilustração por mapa conceitual que descreve a EC pode ser analisada na Figura 1:

Figura 1 –Representação esquemática do mapa conceitual cíclico da Economia Circular.



Fonte: Disponível em <https://pt.fi-group.com/economia-circular-o-que-e/>, publicada em 06 de março de 2023. Acesso em 21/09/2024.

A crescente produção de cimentos na construção civil, junto com a grande quantidade de resíduos descartados anualmente em aterros sanitários, somada à escassez de recursos naturais e do meio ambiente, que alimentam a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, são algumas motivações que impulsionam a ideia de se usar materiais sustentáveis para geração de argamassas e concretos, a fim de garantir gradativamente a ideia de edifícios e construções

verdes - ambientalmente sustentáveis. Essa concepção está totalmente alinhada com a *"ambição Net Zero"* da ONU e à EC.

Os cimentos sustentáveis podem ser sintetizados a partir de substituições parciais e controladas de resíduos orgânicos de origem vegetal, levando em conta a seleção de materiais para manutenção das propriedades ligantes, mecânicas e térmicas, mantendo-se as propriedades características viáveis, na perspectiva da engenharia civil, daquilo que se encontrariam nos cimentos tradicionais de escala industrial. Os estudos associados à síntese de cimentos sustentáveis são abrangentes, uma vez que foram iniciados há mais de uma década, como é possível notar nas análises desenvolvidas por Saccani *et al.* (2005), Phair (2006), Bignozzi (2011), Schneider *et al*. (2011) e Suhendro (2014). Além disso, os avanços e melhorias para tratamento dos cimentos verdes se destacam até os dias atuais, com diversidade de propostas atualizadas, como podemos observar nos trabalhos recentes de Kusuma *et al.* (2022), Abdellatief *et al.* (2023) e Jin *et al.* (2024) .

O presente trabalho é resultado de um estudo de aplicação e análise da incorporação de pó de serragem da espécie *Eucalyptus cloeziana* como agregado na redução do uso parcial de cimento para síntese de bloquetes em pavimentação de vias públicas. Motivado pela ideia de EC e cimento verde, a escolha desse tema deve-se à necessidade de compreender como esse tipo específico de material orgânico pode corroborar para diminuição do uso de cimento na construção civil. Tal trabalho foi realizado a partir de um projeto de iniciação científica interdisciplinar, por discentes do curso de Bacharelado em Engenharia Civil com interesse em ciência dos materiais e de sua aplicação na construção civil, focado na sustentabilidade, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais - IFNMG, *Campus* Januária, entre os anos de 2023 e 2024. É importante destacar que a utilização do material neste trabalho, na forma de pó, difere de cinzas para ligações pozolânicas provindas de materiais orgânicos, comumente utilizadas para redução de cimento em diversos estudos na literatura. Partimos da premissa de reduzir parcialmente a massa de cimento em 10% e 20%, para substituição direta, em igual quantidade, de agregado orgânico - pó de *Eucalyptus cloeziana*, de 10% e 20%, respectivamente, direcionando uma confecção de corpos de prova e bloquetes com traço apropriado para pavimentações públicas.

Este trabalho encontra-se estruturado da seguinte maneira: na Seção 1 - Referencial teórico, levantamos uma série significativa de trabalhos existentes na literatura que tangem uma linha próxima da abordagem que estamos interessados, divulgando distintas técnicas de redução de cimento para fins ecológicos; na Seção 2 - Metodologia, descrevemos, em detalhe, os materiais e percurso metodológico empregado para elaboração dos traços de concretos base e ecológico, usando o pó de de *Eucalyptus cloeziana,* para confecção de corpos de prova e bloquetes de 16 faces, que são comuns em pavimentações públicas; na Seção 3 - Resultados, apresentamos as tabelas e os gráficos emergentes das análises comparativas entre os corpos de prova, evidenciando as diferenças evolutivas, percentuais e de eficiência no quesito de resistência mecânica entre os diferentes traços e intervalos de curas; na Seção 4 - Discussão dos resultados, tratamos as comparações, explicando os fatores desses resultados e ponderando em quais limites os traços ecológicos podem ser úteis frente ao traço usual.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

Estudos relacionados ao uso de serragens como matéria prima para substituição parcial do cimento são apresentados na literatura há muitos anos, em que podemos dar um destaque especial ao trabalho desenvolvido por Raheem *et al.* (2012), que analisaram, de forma completa, a redução em 5%, 10%, 15%, 20% e 25% do peso de cimento pozolânico *Portland* usual com adição de cinzas de serragens, para fabricação de concretos ecologicamente viáveis. Enfatizamos, também, que nos primeiros anos dessa década de 2020, Meko e Ighalo (2021) exploraram a utilização de cinzas de serragem de madeira de Cordia africana como substituição parcial de cimento em concreto C25, averiguando particularidades dessa madeira e sua influência quanto à síntese de cinzas. Adebola, Odubela e Aluko (2022) investiram nas propriedades do concreto laterizado incorporando cinzas de serragem como substituição parcial do cimento, sob análises qualitativa e quantitativa. Enquanto isso, o trio Onueka, Igbadumhe e Okeke (2023) desenvolveram um projeto relacionado à produção de meios-fios de concreto para construção de pavimentos feitos com cinzas de serragem como substituição parcial de cimento, numa abordagem mais aplicada.

Mais recentemente, Asif *et al.* (2024) investigaram a utilização de cinzas de serragem como aditivo de cimento em concreto e estudo de suas propriedades mecânicas, diferenciando de seus pares no quesito funcional das cinzas produzidas para o concreto. Tiegoum *et al.* (2024) estudaram o uso de diferentes tipos de cinzas de serragens, de distintas espécies de árvores, e suas modificações quando substituídas parcialmente ao cimento, na forma de cinzas. Já, Chary *et al*. (2024) trouxeram algo mais ousado ao analisar a mistura de cinza de serragens com casca de ovo para fracionar o uso de cimento em fabricação de concretos, inserindo um novo ingrediente somado ao tradicional uso de cinzas puras da matéria prima arbórea. Os engenheiros civis Gift, Temple e Samuel (2024) estudaram a resistência à tração por fissura de cinzas de serragem como um ligante sustentável em concreto do tipo geopolímero, que tem em sua estrutura uma combinação alcalina de resíduos ricos em sílica e alumina com agregados graúdos e miúdos convencionais. Além disso, o uso potencial de cinzas de serragem como um substituto parcial do cimento também foi averiguado nas propriedades da argamassa espumada, incluindo suas propriedades frescas, mecânicas, de transporte, térmicas e microestruturais, como pode ser constatado em Majeed (2024).

Todas essas recentes pesquisas têm algo em comum: o uso de cinzas de serragem para substituição parcial de cimento, visto a possibilidade físico-química de ligações pozolânicas, que contribuem para formação de compostos cimentícios no concreto, desde sua síntese até os testes de resistência mecânica e outros de interesse na construção civil. Nosso intuito, no entanto, é propor e analisar uma abordagem original que visa a desbravar a possibilidade de recorrer ao uso de pó de serragem como adicional orgânico ao agregado na mesma medida que se reduz o cimento usual, durante o preparo de concretos para corpos de prova e bloquetes de pavimentação pública. Uma forte justificativa para nosso trabalho advém do fato de que a síntese de cinzas de serragens (ou outros materiais orgânicos) também geram emissão de gás carbônico durante o processo de queima, embora o número de partículas seja muito menor ao que é gerado na produção de escala industrial dos cimentos usuais - entre 5 % e 7 % de danos à atmosfera. O uso do pó de serragem de maneira direta, como agregado ao traço do concreto, por sua vez, não necessita de queima e, portanto, traz uma contribuição de 0% de emissão de $CO_2(g)$ na atmosfera.

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 6, n. 3, set/dez 2024.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

2 METODOLOGIA / MATERIAIS E MÉTODOS

Este manuscrito pode ser caracterizado como uma pesquisa documental e experimental, sendo gerado a partir da junção entre abordagens qualitativas e quantitativas, que, por sua vez, nos permitiu analisar e discutir a viabilidade técnica, ecológica e social do uso de um bloquete sintetizado a partir de um agregado orgânico, especificamente o pó de serragem da espécie *Eucalyptus cloeziana*, na mesma escala percentual de redução de cimento. Todo percurso metodológico empregado na pesquisa ocorreu nas dependências dos laboratórios de Física, dos Solos e de Construção Civil no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais - IFNMG, *Campus* Januária.

Para efetivação e análises experimentais, utilizamos os seguintes materiais instrumentais e de consumo, conforme explicitado na Tabela 1:

Tabela 1 – Materiais instrumentais e de consumo.

Materiais	Unidades	kg	l
Estufa de secagem e esterilização SL-100 220V SOLAB	1	-	-
Betoneira M-150 1-2 CV MONO 220V MAQTRON	1	-	150
Mesa vibratória 50x25x40 cm	1	-	-
Corpo de prova cilíndrico 10x20 cm	18	-	1,6
Peneiras (4,75; 2,00; 1,18) mm	6	-	-
Vareta de alumínio	1	-	-
Espátula de mão	2	-	-
Caixa plástica para massa de concreto	1		20
Forma para piso bloquete duplo 16 faces 24x10x8 cm	3	-	-
Balança eletrônica Marte 10 kg (precisão de 0,1 g)	1	-	-
Prensa eletro-hidráulica I-3025-B	1	-	-
Cimento CPII-E-32 RS	-	10	-
Brita 01 (9,5 a 19,0) mm (50%)	-	30	-
Areia fina	-	30	-
Pós de serragem da espécie *Eucalyptus cloeziana*	-	1,2	-
Desmoldante siliconado de lote 32-09	-	-	1
Água	-	-	8,3

Fonte: Autoria própria.

As seguintes etapas para execução de pesquisa de campo foram seguidas:

a) Obtenção, secagem e separação do agregado orgânico;

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 6, n. 3, set/dez 2024.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

b) Divisão das proporções do agregado orgânico no traço: (0%), (10%) e (20%);
c) Confecção dos corpos de prova com e sem a incorporação do agregado orgânico;
d) Ensaio de resistência à compressão dos traços;
e) Análises comparativas.

Cada item (a)-(e) dos passos metodológicos está clarificado na sequência.

2.1 Obtenção, secagem e separação do agregado orgânico

O agregado orgânico escolhido para nosso objeto de estudo de resistência mecânica dos corpos de prova e, consequentemente, do bloquete sustentável (concreto ecológico), foi o pó de serragem da espécie *Eucalyptus cloeziana*. A opção por esse objeto deve-se ao fato de que, em termos de dimensões granulares, após peneirações simultâneas em 4,75 mm, 2,00 mm e 1,18mm, era o mais próximo do granulamento de outro agregado tradicional, a areia. Desse modo, sua mistura no processo, por hipótese, seria suficientemente homogênea, além de garantir um acréscimo de (10 e 20)% de massa para cada redução de (10 e 20)% de massa de cimento nos traços de concretos comparativos T_2 e T_3, que são descritos com mais detalhes abaixo. É importante destacar que antes das confecções dos traços, o pó de serragem foi submetido a um processo de secagem à temperatura de $\theta = 105\ ^{\circ}C$ por um intervalo de tempo de $\Delta t \simeq 24h$ em uma estufa de secagem e esterilização SL-100 220V, para minimizar taxas de umidade no material, antes da mistura.

2.2 Divisão das proporções do agregado orgânico no traço - (0%), (10%) e (20%)

O traço adotado como base comparativa foi denominado traço 1 (T_1), caracterizado por ser tradicional, ou seja, sem adicional de agregado orgânico (0%). Para a moldagem dos corpos de prova de concreto, o traço T_1 foi do tipo 1:3:3 (cimento, brita e areia). As normas seguidas foram ABNT NBR 15.953/2011 e ABNT NBR 9781/2013, com fator água-cimento de 0,65 l/kg, admitindo uma tolerância de acréscimo em até 10%, devido aos fatores de evaporação e perdas de umidade no processo de contato e mistura na betoneira.
A partir da base do T_1, o traço 2 (T_2) e o traço 3 (T_3) foram desenvolvidos fracionando a parcela 1:7 do cimento, com a intenção de reduzir a massa desse material no concreto. Logo, a partir de T_1 (1:3:3), as seguintes proporções foram estabelecidas para confecções: T_2 [0,9:0,1:3:3] (10%) (cimento, pó de *Eucalyptus cloeziana*, brita e areia), sendo 90% de cimento e 10% de pó de serragem *Eucalyptus cloeziana*; T_3 [0,8:0,2:3:3] (20%) (cimento, pó de *Eucalyptus cloeziana*, brita e areia), sendo 80% de cimento e 20% de pó de serragem *Eucalyptus cloeziana*.

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 6, n. 3, set/dez 2024.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

Tabela 2 – Composição percentual dos traços.

Materiais	Traço 1 (T_1)	Traço 2 (T_2)	Traço 3 (T_3)
Cimento CPII-E-32 RS	14,40%	12,96%	11,52%
Serragem *Eucalyptus cloeziana*	00,00%	1,44%	02,88%
Areia fina	42,80%	42,80%	42,80%
Brita 01 (9,5 a 19,0) mm (50%)	42,80%	42,80%	42,80%

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 2 elucida as diferenças percentuais dos materiais utilizados para fabricação dos corpos de prova e das formas de bloquetes em cada tipo de traço.

2.3 Confecção dos corpos de provas

Após a definição das composições dos traços, iniciamos o processo de pesagem dos materiais para uso na produção dos respectivos T_1, T_2 e T_3. Uma das cenas de pesagem pode ser conferida na Figura 2. Nessa etapa, utilizamos uma balança eletrônica limitada até 10 kg de massa, com precisão de 0,1 g, com tara e higienização da bandeja de pesagem na mudança de um material para outro. Na sequência, demos início à confecção dos corpos de prova em si, seguindo a ABNT NBR 9781/2013, com fator água-cimento de 0,65 l/kg, obedecendo as composições na Betoneira M-150 1-2 CV e moldando-os nos cilindros/formas - vide Figura 3.

Figura 2 – Pesagem dos materiais utilizados para produção dos corpos testes de traços T_2 e T_3: (a) cimento CPII-E-32 RS; (b) brita 01; (c) areia fina; (d) pó de serragem de *Eucalyptus cloeziana*.

(a)  (b)  (c)

 (d) 

Fonte: Autoria própria.

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 6, n. 3, set/dez 2024.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

Figura 3 – Materiais: (a) forma para corpo de prova cilíndrico 10x20 cm com desmoldante siliconado de lote 32-09; (b) forma piso bloquete duplo 16 faces 24x10x8 cm e mesa vibratória de porte pequeno.

(a)  (b) 

Fonte: Autoria própria.

2.4 Ensaios de resistência à compressão

Os corpos de prova nas formas cilíndricas 10x20 cm e o bloquete duplo de 16 faces 24x10x8 cm para os traços T_1, T_2 e T_3, ficaram em tempo de cura entre 7 e 28 dias[9], conforme a Figura 4. Foram construídos 3 corpos de prova para cada traço/intervalo de cura, com finalidade de obter uma média significativa nas medidas das amostragens.

Figura 4 – Etapas de: (a) preparação dos corpos de prova nas formas cilíndricas 10x20 cm e no bloquete duplo 16 faces 24x10x8 cm; (b) reservatório para cura de 7 a 28 dias dos traços T_1, T_2 e T_3.

(a)  (b) 

Fonte: Autoria própria.

Passados os respectivos intervalos de cura, realizamos os ensaios das resistências mecânicas desses objetos na prensa eletro-hidráulica I-3025-B, seguindo os padrões estabelecidos pelas normas NBR 5738/2016 e NBR 16886/2020 - vide Figura 5.

[9] Diferentemente da definição canônica de 7, 14, 21 e 28 dias, optamos pelo uso de 7 e 28 dias no intervalo de cura porque, de modo geral, as alterações de resistências nos dias 14 e 21 são pouco significativas frente ao 28º (último dia de comparação). Desse modo, por registros, comparar diretamente o primeiro com o último *gap* de intervalo para curas revelaria diferenças mais claras nas resistências dos traços dos materiais estudados.

Figura 5 – Padrão geral de rompimento dos traços pela máquina de prensa eletro-hidráulica I-3025-B (a). Caso particular do traço T_1 de 07 dias: (b) | (c) antes | após o rompimento.

(a)  (b)  (c) 

Fonte: Autoria própria.

2.5 Análises comparativas

Por fim, a partir do *Software Pavitest* associado às leituras de resistência mecânica da prensa eletro-hidráulica I-3025-B, geramos os gráficos dos picos máximos de resistências R_i $(i = 1,2,3)$, relacionadas aos i-ésimos corpos de prova de traços T_i $(i = 1,2,3)$, para cada j-ésima medida $(j = 1,2,3)$, em seus respectivos dias de cura (vide Anexo I). Com esses dados, computamos as tabelas, os gráficos e as comparações entre as resistências mecânicas, a saber: evolução; médias; aumentos percentuais em cada T_i ; eficiência dos traços parcialmente orgânicos (T_2 e T_3) com relação ao traço base T_1.

3 RESULTADOS

Com as medidas extraídas pelo *Software Pavitest*, revelamos os picos máximos de resistências mecânicas dos nossos i-ésimos traços, com suas respectivas j-ésima medidas, nos 7º e 28º dias de cura. A Tabela 3 fornece a base das informações que necessitamos para descrição e interpretação dos resultados oriundos desta pesquisa.

Tabela 3 – Ensaio de resistência máxima à compressão dos corpos de prova.

Traços e tempos de curas	R_1 [MPa]	R_2 [MPa]	R_3 [MPa]	$\underline{R}$ [MPa]
T1 Cimento|0% 07 dias	8,2	10,0	10,1	9,4
T1 Cimento|0% 28 dias	16,3	13,8	15,1	15,1
T2 Cimento|Serragem 07 dias	4,4	2,7	3,6	3,6
T2 Cimento|Serragem 28 dias	3,5	2,7	5,1	3,8
T3 Cimento|Serragem 07 dias	1,6	1,5	1,3	1,5
T3 Cimento|Serragem 28 dias	1,9	3,3	1,7	2,3

Fonte: Autoria própria.

As médias e incertezas das resistências mecânicas R_i $(i = 1,2,3)$, devido aos i-ésimos traços T_i $(i = 1,2,3)$, levando em conta cada j-ésima medida máxima de resistência mecânica de cada traço nos respectivos 07 e 28 dias de cura, são expressas, respectivamente, como:

$$\underline{R_i} = \left(\frac{\sum_{j=1}^{3} R_j}{\sum_{j=1}^{3} j}\right)_i, \sigma_i = \sqrt{\left(\frac{1}{3}\right)\sum_{j=1}^{3} (R_j - \underline{R_i})^2}, j = 1,2,3, \quad (1)$$

admitindo amostras sem pesos estatísticos nas medidas de resistências mecânicas.

Computamos os dados das resistências mecânicas relacionadas à Tabela 3, levando em consideração os desvios padrões e incertezas nas medidas com uso da equação (1), na Tabela 4, abaixo:

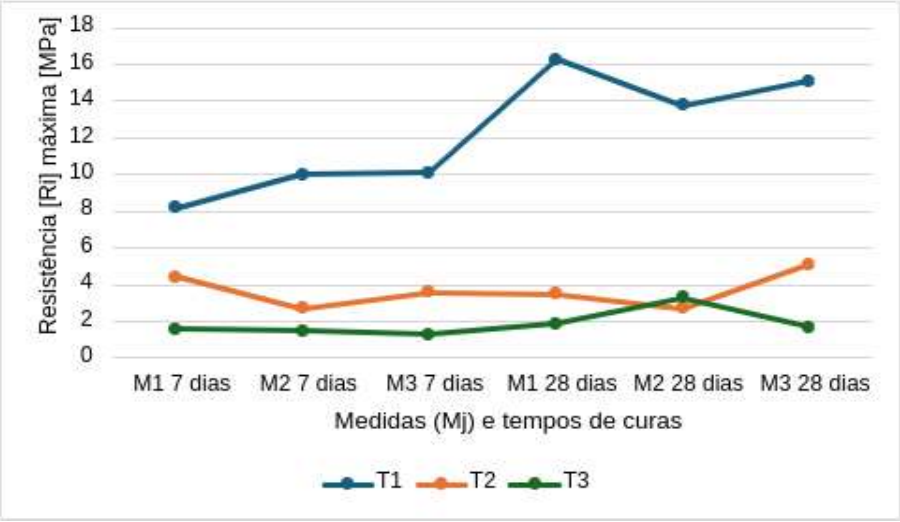
Tabela 4 – Resistências média à compressão dos corpos de prova.

Traços e tempos de curas		$\underline{R_i} \pm \sigma_i$ [MPa]
T1 Cimento|0%	07 dias	9,4±0,9
T1 Cimento|0%	28 dias	15,1±1,0
T2 Cimento|Serragem	07 dias	3,6±0,7
T2 Cimento|Serragem	28 dias	3,8±1,0
T3 Cimento|Serragem	07 dias	1,5±0,1
T3 Cimento|Serragem	28 dias	2,3±0,7

Fonte: Autoria própria.

Na sequência, plotamos o Gráfico 1 emergente da Tabela 3, que revela a evolução das resistências mecânicas para cada medida em seus respectivos tempos de cura, sendo possível visualizar a diferença do crescimento dessas resistências entre os distintos traços e entre os traços em si.

Gráfico 1 – Resistência entre os traços T_1, T_2 e T_3 nas três medidas R_1 , R_2 e R_3 entre 7 e 28 dias.



Fonte: Autoria própria.

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 6, n. 3, set/dez 2024.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

Além disso, comparamos os aumentos percentuais entre as médias das resistências mecânicas dos i-ésimos traços R_i $(i = 1,2,3)$, com os respectivos 07º e 28º dias de cura, para análises individuais:

$$A_i(\%) = \left[\frac{\underline{R_i}\,(28\ dias)}{\underline{R_i}\,(07\ dias)} - 1\right] \cdot 100\%, i = 1,2,3. \quad (2)$$

A partir da equação (2) e da Tabela 4, geramos a relação na Tabela 5:

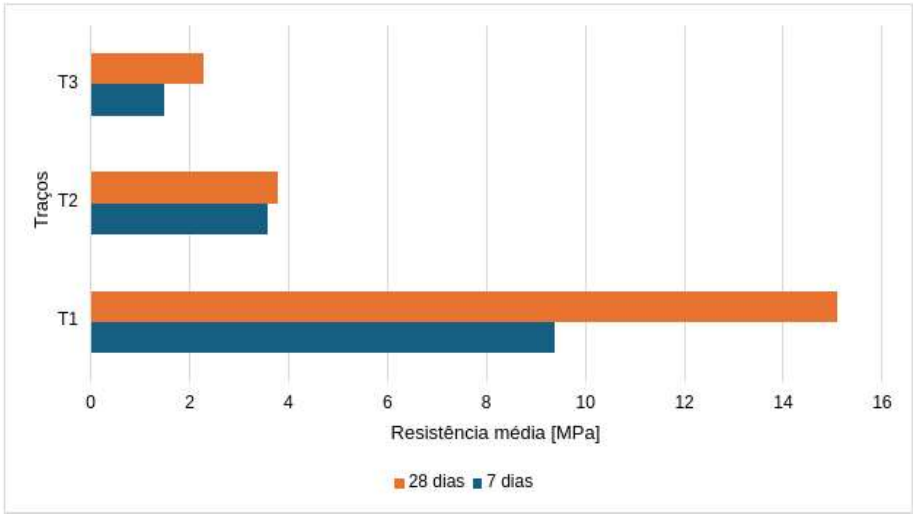
Tabela 5 – Aumento percentual em resistência mecânica - relação entre 7 e 28 dias.

Traços	Aumento % em resistência $[A_i(\%)]$
T1 Cimento|0%	60,6
T2 Cimento|Serragem	05,6
T3 Cimento|Serragem	53,3

Fonte: Autoria própria.

Tomando como base a Tabela 4, plotamos o Gráfico 2, que compara os aumentos entre as médias das resistências mecânicas de cada traço nos seus respectivos 7º e 28º dias de cura.

Gráfico 2 – Resistência média $\underline{R_i}$ [MPa] dos traços T_1, T_2 e T_3 - relação entre 7 e 28 dias.



Fonte: Autoria própria.

Com o intuito de comparar as médias de resistências mecânicas máximas no 28º (último) dia de cura, dos diferentes traços, elucidamos a Tabela 6 e o Gráfico 3, normalizados ao traço base T_1, frente aos respectivos traços parcialmente orgânicos T_2 e T_3:

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 6, n. 3, set/dez 2024.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

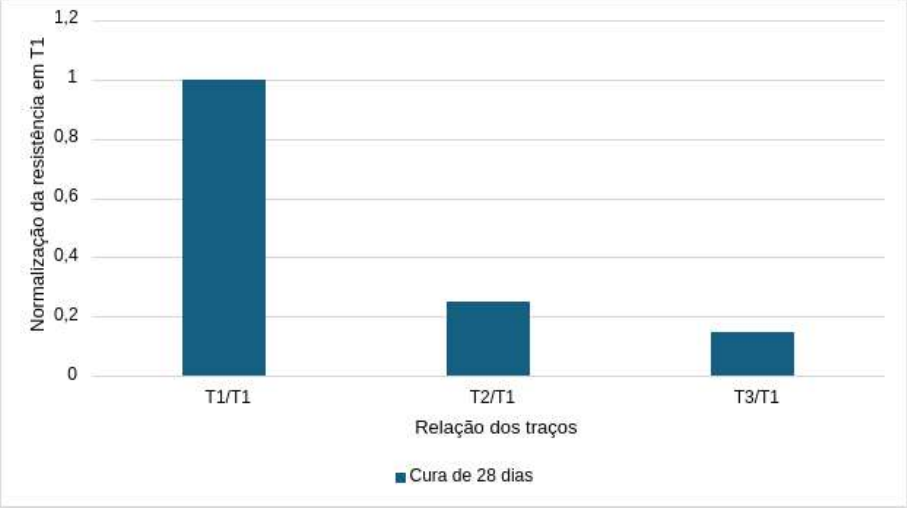
Tabela 6 – Resistências médias de 28 dias normalizadas ao traço T_1 .

Traços	Normalização da resistência
T1 Cimento|0%	1,00
T2 Cimento|Serragem	0,25
T3 Cimento|Serragem	0,15

Fonte: Autoria própria.

cujo gráfico associado é:

Gráfico 3 – Normalização das resistências dos traços com relação a T_1 no 28º dia de cura.



Fonte: Autoria própria.

Por último, e não menos importante, mensuramos a eficiência (rendimento) das médias das resistências mecânicas dos traços T_2 e T_3 em relação ao T_1, em seu 28º dia de cura:

$$\eta_{1i} = \left(1 - \frac{\underline{R_1} - \underline{R_i}}{\underline{R_1}}\right) \cdot 100\%, i = 2,3, \quad (2)$$

o que nos permitiu gerar a Tabela 7, abaixo:

Tabela 7 – Eficiência (rendimento) das resistências mecânicas médias frente a T_1 de 28 dias.

Traços	Eficiência η_{1i} (%)
T2 Cimento|Serragem	25
T3 Cimento|Serragem	15

Fonte: Autoria própria.

Em posse dessas tabelas e dos gráficos advindos das nossas análises experimentais, podemos interpretar os resultados, detalhadamente, na próxima seção.

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 6, n. 3, set/dez 2024.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com os resultados da Seção 3, podemos notar, primeiramente, que os todos os traços (T_1, T_2 e T_3) tiveram um aumento em suas resistências mecânicas médias $\underline{R_i}(i = 1,2,3)$, entre os 7º e 28º dias de cura. Os ganhos percentuais de resistências mecânicas foram de 60,6%, 05,6% e 53,3%, respectivamente. Supomos que os maiores ganhos de resistência em T_1 e T_3 podem estar associados com menor nível de absorção de água nos espaços porosos, durante seus tempos de cura. A Figura 6 compara os distintos traços na confecção final de cura dos bloquetes de 16 faces, usualmente presente em pavimentações públicas.

Figura 6 – Fotografia dos bloquetes nas formas de 16 faces 24x10x8 cm, do 28º dia de cura, associados aos traços T_1, T_2 e T_3, nessa respectiva ordem, da esquerda para direita.



Fonte: Autoria própria.

Além disso, a redução de 10% e 20% de cimento industrial, com acréscimo de 10% e 20% de agregado orgânico na forma de pó de serragem *Eucalyptus cloeziana* (T_2 e T_3) revelou rendimentos de 25% e 15% na resistência mecânica frente ao traço base T_1, respectivamente. Nossa hipótese para uma eficiência menor que a esperada se deve ao papel desempenhado pelo pó de serragem que, ao assumir a forma de agregado em redução ao cimento, não preservou algo similar a uma ligação pozolânica com o cimento durante o preparo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS / CONCLUSÃO

Os traços que minimizam emissão de $CO_2(g)$, T_2 e T_3, geraram eficiência/rendimento de somente 25% e 15% da resistência mecânica usual (T_1). Contudo, ainda é possível pensar a utilidade desses bloquetes parcialmente ecológicos, à luz da EC e cimento sustentável, aceitando melhorias no traço T_2, para confecção de bloquetes em pavimentações públicas restritas a parques ou regiões com passagens de pedestres, bicicletas e veículos de pequeno porte, onde resistências à pressão desses objetos em trânsito poderiam ser suportadas. Salientamos que mais testes com percentuais distintos podem ser analisados em trabalhos futuros, com possibilidade de alterações nos materiais orgânicos para redução do cimento.

REFERÊNCIAS

ABDELLATIEF, Mohamed et al. Production and optimization of sustainable cement brick incorporating clay brick wastes using response surface method. **Ceramics International**, v. 49, n. 6, p. 9395-9411, 2023.

ADEBOLA, ODUBELA Christiana; ALUKO, Oluwatobi Gbenga. Properties of Laterized Concrete Incorporating Sawdust Ash as A Partial Replacement for Cement. **Journal of Civil Engineering Research & Technology. SRC/JCERT-129. DOI: doi. org/10.47363/JCERT/2022 (4)**, v. 128, p. 2-6, 2022.

ASIF, Ifrah et al. Utilization of Sawdust Ash as an additive of cement in concrete and study of its mechanical properties. **Memoria Investigaciones en Ingeniería**, n. 26, p. 54-69, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15.953/2011. Pavimentação intertravada com peças de concreto sujeitas ao tráfego de pedestres, de veículos dotados de pneumáticos e áreas de armazenamento de produtos.

_____. ABNT NBR 9781/2013. Peças de concreto para pavimentação Especificação e métodos de ensaio.

_____. ABNT NBR 5738/2014 . Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

_____. ABNT NBR 16886/2020. Concreto — Amostragem de concreto fresco.

BIGNOZZI, Maria Chiara. Sustainable cements for green buildings construction. **Procedia Engineering**, v. 21, p. 915-921, 2011.

CHARY, M. Rathna et al. Properties of concrete by partial replacement of cement by using sawdust and eggshell powder material Metakaolin. In: **AIP Conference Proceedings**. AIP Publishing, 2024.

GEISSDOERFER, Martin et al. Circular business models: A review. **Journal of cleaner production**, v. 277, p. 123741, 2020.

GIFT, Osere; TEMPLE, Nwofor; SAMUEL, Sule. Sawdust Ash as a Sustainable Binder in Geopolymer Concrete: A Study on Split Tensile Strength. **Asian Journal of Engineering and Applied Technology**, v. 13, n. 1, p. 8-19, 2024.

GUILLOT, J. Duch. Circular Economy: Definition, Importance and Benefits. **European Parliament.** PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www. europarl. europa. eu/pdfs/news/expert/2015/12/story/20151201STO05603/20151201STO05603_en. pdf [viitattu 4.11. 2021], 2015.

JIN, Fei et al. Maximising the benefits of calcium carbonate in sustainable cements: opportunities and challenges associated with alkaline waste carbonation. **npj Materials Sustainability**, v. 2, n. 1, p. 1, 2024.

KUSUMA, Ravi Teja et al. Sustainable transition towards biomass-based cement industry: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 163, p. 112503, 2022.

MAJEED, Samadar S. Formulating Eco-Friendly Foamed Mortar by Incorporating Sawdust Ash as a Partial Cement Replacement. **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 2612, 2024.

MEKO, Bikila; IGHALO, Joshua O. Utilization of Cordia Africana wood sawdust ash as partial cement replacement in C 25 concrete. **Cleaner Materials**, v. 1, p. 100012, 2021.

ONYEKA, F. C.; IGBADUMHE, A. O.; OKEKE, T. E. Design and Production of Concrete Kerbs for Pavement Construction Made with Saw Dust Ash as Partial Replacement of Cement. **Advances in Engineering Design Technology**, v. 5, n. 3, 2023.

PHAIR, John W. Green chemistry for sustainable cement production and use. **Green chemistry**, v. 8, n. 9, p. 763-780, 2006.

PARLIAMENT, Euro. Circular economy: definition, importance and benefits. 2017.

RAHEEM, A. A.; OLASUNKANMI, B. S.; FOLORUNSO, C. S. Saw dust ash as partial replacement for cement in concrete. **Organization, technology & management in construction: an international journal**, v. 4, n. 2, p. 474-480, 2012.

REUTER, Markus A. et al. Challenges of the circular economy: a material, metallurgical, and product design perspective. **Annual Review of Materials Research**, v. 49, p. 253-274, 2019.

SACCANI, Andrea et al. Influence of the pozzolanic fraction obtained from vitrified bottom-ashes from MSWI on the properties of cementitious composites. **Materials and structures**, v. 38, p. 367-371, 2005.

SCHNEIDER, Martin et al. Sustainable cement production—present and future. **Cement and concrete research**, v. 41, n. 7, p. 642-650, 2011.

SUHENDRO, Bambang. Toward green concrete for better sustainable environment. **Procedia Engineering**, v. 95, p. 305-320, 2014.

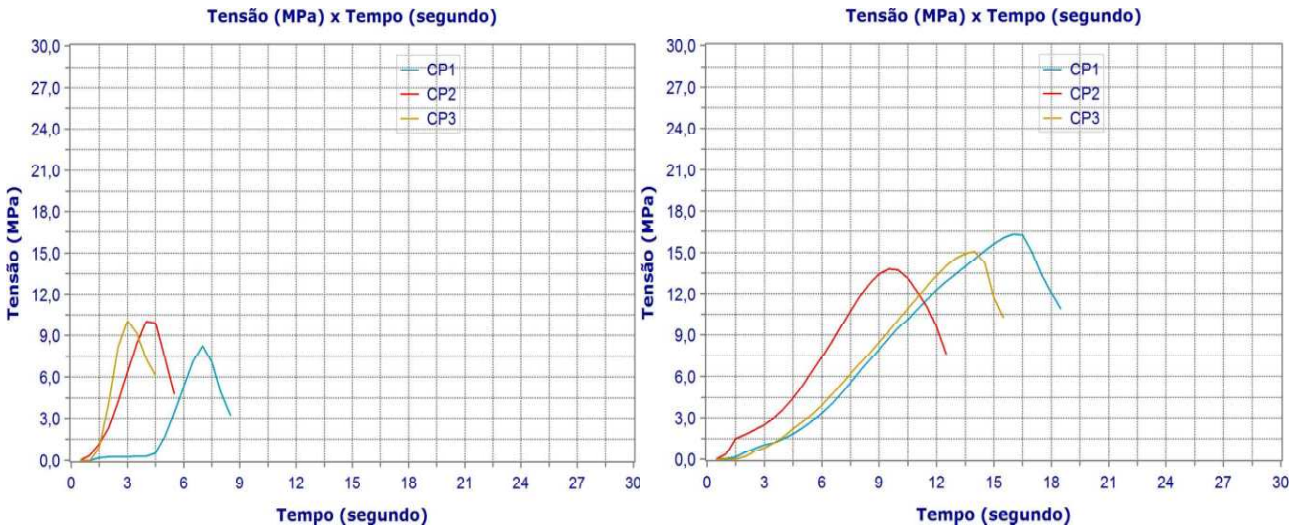
TIEGOUM WEMBE, Japhet et al. Impact of the partial substitution of cement and sand by ash from several types of wood species in cementitious materials manufacture: valorization in the industrial field. **Discover Civil Engineering**, v. 1, n. 1, p. 36, 2024.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. **Cement Sustainability Initiative. Cement technology roadmap 2009: carbon emissions reductions up to 2050**. Paris, 2010.

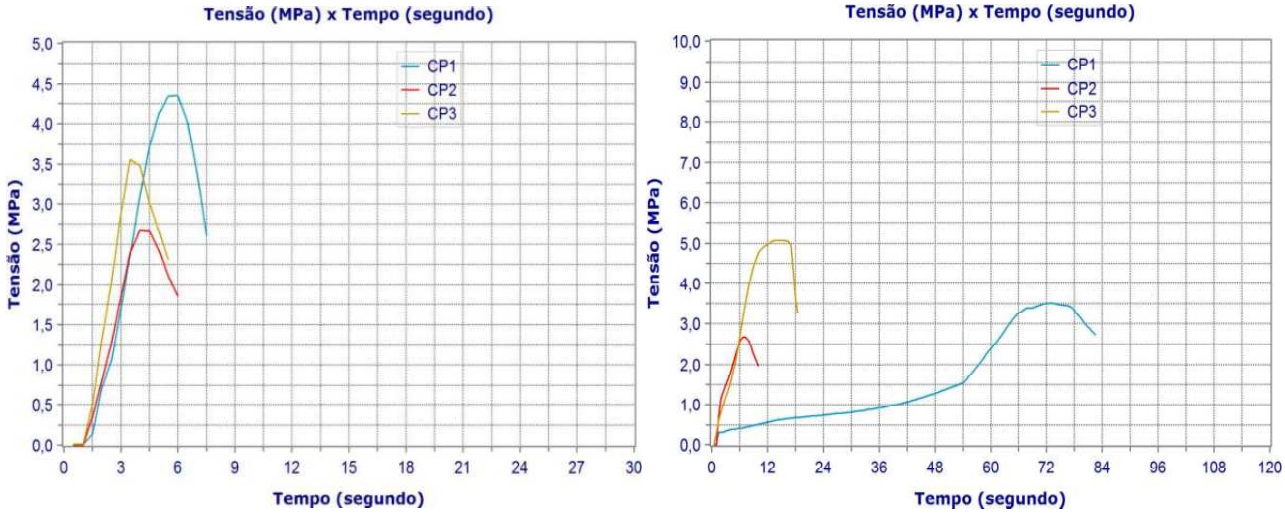
ANEXO – EVOLUÇÃO (t [s], T[MPa]) DOS CORPOS DE PROVA

Gráficos gerados pelo *Software Pavitest*, associados aos rompimentos dos corpos de provas dos traços T_1, T_2 e T_3 (t[s], T[MPa]) nos 7º e 28º dias, via prensa eletro-hidráulica I-3025-B.

1. Evolução, em segundos, das resistências mecânicas R_1, R_2 e R_3 - Tensão [MPa] dos corpos de prova (CP) = medidas (M) do traço T_1 de 7 e 28 dias, respectivamente:



Fonte: Autoria própria.



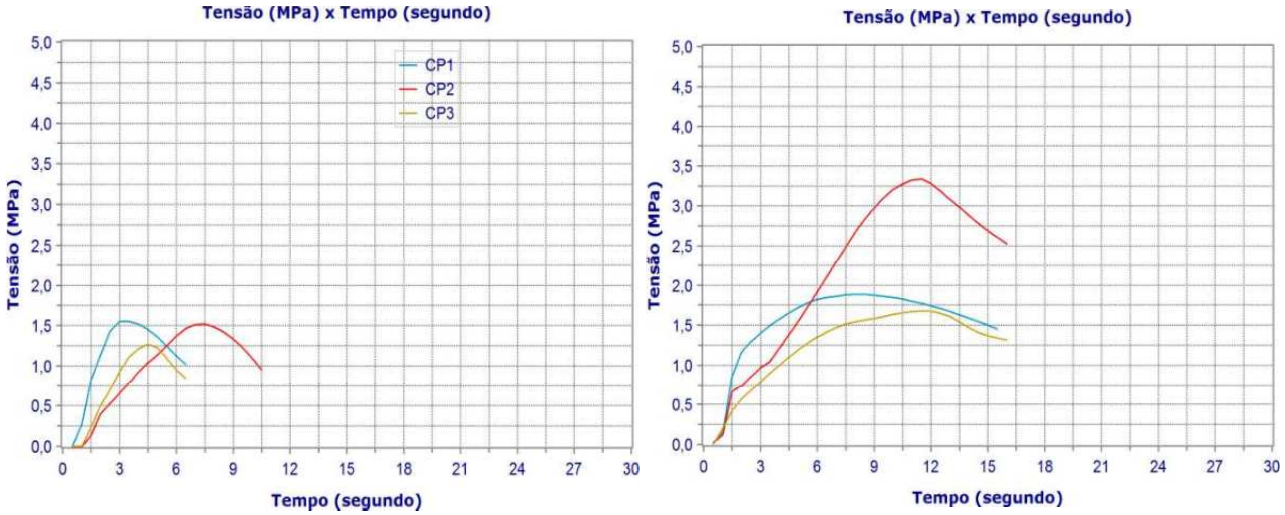
2. Evolução, em segundos, das resistências mecânicas R_1, R_2 e R_3 - Tensão [MPa] dos corpos de prova (CP) = medidas (M) do traço T_2 de 7 e 28 dias, respectivamente:

Fonte: Autoria própria.

RECITAL - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara, v. 6, n. 3, set/dez 2024.
ISSN: 2674-9270. Disponível em: http://recital.almenara.ifnmg.edu.br/index.php/recital

3. Evolução, em segundos, das resistências mecânicas R_1, R_2 e R_3 - Tensão [MPa] dos corpos de prova (CP) = medidas (M) do traço T_3 de 7 e 28 dias, respectivamente:

Fonte: Autoria própria.



AGRADECIMENTOS

À Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PROPPI) do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG) pelo apoio financeiro e incentivo, através da contemplação do Cartão Pesquisador - Edital nº 139/2022 e da implementação de uma bolsa de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (BITI), concedida pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - Edital Nº 294/2022 [Número do processo: 164577/2022-0]. À Diretoria de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação (DPPI) do IFNMG *campus* Januária pela permissão do cadastramento do projeto de pesquisa e incentivo das iniciações científicas voluntárias.

Recebido em: *07 de outubro 2024.*

Aceito em: *04 de abril 2025.*