

Efeito sinérgico das cinzas de biomassa em argamassas: desempenho em diferentes períodos de estocagem

Synergistic effect of biomass ash in mortars: performance in different storage periods

Efecto sinérgico de las cenizas de biomasa en morteros: comportamiento en diferentes periodos de almacenamiento

Camila C. Canhestro Guimarães 

Universidade Federal de Catalão; Unidade Acadêmica Especial de Engenharia; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Catalão (GO), Brasil.

Heber Martins de Paula* 

Universidade Federal de Catalão; Unidade Acadêmica Especial de Engenharia; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Catalão (GO), Brasil. heberdepaula@ufcat.edu.br

* Autor correspondente.

CRedit

Contribuição de autoria: Concepção; Curadoria de dados; Análise; Coleta de dados; Metodologia; Software; Supervisão; Validação; Visualização; Redação – rascunho original; Redação – revisão e edição: GUIMARÃES, C. C. C.; MARTINS DE PAULA, H.

Conflitos de interesse: Os autores certificam que não há conflito de interesse.

Financiamento: Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq).

Aprovação de ética: Os autores certificam que não houve necessidade de aprovação de Comitê de Ética.

Uso de I.A.: Os autores certificam que não houve uso de inteligência artificial na elaboração do trabalho.

Editores responsáveis: Daniel Sant'Ana (Editor-Chefe); Livia Santana (Editora Associada); Joara Cronemberger (Editora Associada); Vanda Alice Garcia Zanoni (Editora Associada); Pedro G. Cardoso (Assistente editorial).

Resumo

Com o emprego de novos materiais na construção civil para obtenção de componentes, elementos ou sistemas que contribuam para reduzir os impactos ambientais como, por exemplo, os materiais ecoeficientes, devem ser avaliados pelo seu desempenho e sustentabilidade, culminando com especificações técnicas. Destarte, o presente artigo objetivou validar o tempo de estocagem do traço da argamassa modificada, que substitui o cimento Portland pela mistura formada pelas cinzas da casca de arroz (CCA), do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) e do cavaco de eucalipto (CCE). Para tanto, foi produzido um traço referência, isento de substituições, e definidos os tempos de estocagem em 0, 30, 60 e 90 dias. O desempenho das argamassas foi validado por meio da dosagem e análises dos corpos de prova a cada 30 dias, executando os ensaios de *flow table*, compressão simples, tração na flexão, variação dimensional, aderência à tração, permeabilidade e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados indicaram que o traço T_{méd}, substituindo 26,75% a massa do cimento Portland por cinzas de biomassa (15,65%CCA + 6,35%CBCA + 4,75%CCE), pode ser aplicado até os 60 dias de estocagem de seus materiais pré-dosados para uso em argamassas de assentamento e revestimento, sem comprometimento do desempenho físico e mecânico.

Palavras-Chave: Materiais cimentícios suplementares; Cinzas de biomassa; MEV; Argamassa industrializada; Tempo de estocagem.

Abstract

Using new materials in civil construction to obtain components, elements, or systems that contribute to reducing environmental impacts, such as eco-efficient materials, must be evaluated for their performance and sustainability, culminating in technical specifications. Therefore, the present article aimed to validate the storage time of the modified mortar mix, which replaces Portland cement with the mixture formed by rice husk ash (RHA), sugar cane bagasse ash (SCBA), and eucalyptus chip ash (ECA). To this end, a reference trait was produced, free of substitutions, and storage times were defined as 0, 30, 60, and 90 days. The performance of the mortars was validated by means of dosage and analysis of the test specimens every 30 days, carrying out flow table, simple compression, flexural traction, dimensional variation, tensile adhesion, permeability, and scanning electron microscopy tests. The results indicated that the T_{méd} mix, replacing 26.75% of the mass of Portland cement with biomass ash (15.65%RHA + 6.35%SCBA + 4.75%ECA), can be applied up to 60 days of storage of pre-dosed materials for use in laying and coating mortars, without compromising physical and mechanical performance.

Keywords: Additional cementitious materials; Biomass ash; SEM; Industrialized mortar; Storage time.

Resumen

Con el uso de nuevos materiales en la construcción civil para la obtención de componentes, elementos o sistemas que contribuyan a reducir los impactos ambientales, como los materiales ecoeficientes, se debe evaluar su desempeño y sostenibilidad, culminando en especificaciones técnicas. Por lo tanto, el presente artículo tuvo como objetivo validar el tiempo de almacenamiento de la mezcla de mortero modificado, que reemplaza el cemento Portland por la mezcla formada por ceniza de cascarilla de arroz (CCA), bagazo de caña de azúcar (CBCA) y astillas de madera de eucalipto (CAE). Para ello se produjo un carácter de referencia, libre de sustituciones, y se definieron tiempos de almacenamiento como 0, 30, 60 y 90 días. El desempeño de los morteros se validó dosificando y analizando las probetas cada 30 días, realizando ensayos de tabla de flujo, compresión simple, tracción a flexión, variación dimensional, adhesión a tracción, permeabilidad y microscopía electrónica de barrido. Los resultados indicaron que la mezcla T_{méd}, reemplazando el 26,75% de la masa de cemento Portland por cenizas de biomasa (15,65%CCA + 6,35%CBCA + 4,75%CAE), se puede aplicar hasta 60 días de almacenamiento de materiales predosificados para su uso en la colocación y revestimiento de morteros, sin comprometer sus prestaciones físicas y mecánicas.

Palabras clave: Materiales cementosos adicionales; Cenizas de biomasa; SEM; Mortero industrializado; Tiempo de almacenamiento.

1 Introdução

As cinzas de biomassa são subprodutos da queima de resíduos agrícolas e florestais, e podem ser utilizadas substituindo parcialmente o cimento Portland, pois contêm sílica no estado amorfo e outros minerais em sua composição, que ao serem inseridas em produtos cimentícios, como em argamassas e concretos, podem contribuir para a melhoria da resistência, trabalhabilidade e durabilidade. Do ponto de vista agroindustrial, destacam-se as cinzas entre os principais resíduos gerados, por serem oriundas de diferentes processos de secagem, geração de vapor e energia e, também, por seu potencial de geração de impactos ambientais negativos (Cincotto, 1988).

O setor da construção civil é conhecido por ser um dos principais contribuintes pelo desenvolvimento econômico do Brasil, sendo, portanto, responsável por uma considerável parcela do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (IBGE, 2021). Entretanto, concomitantemente a esta potencialização do capital brasileiro, esse ramo de atividade impacta negativamente, em grande escala, o meio ambiente, principalmente no que tange as emissões de CO₂, gasto energético e utilização de recursos não renováveis (Silva, 2016).

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2018) a indústria da construção é o setor que mais consome recursos naturais e utiliza energia de forma intensiva, gerando consideráveis impactos ambientais. Nesse contexto, faz-se necessário a busca por soluções que tenham como principal meta diminuir os impactos advindos da construção civil sobre o meio ambiente.

Assim, a composição das cinzas de biomassa, principalmente as derivadas do bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e cavaco de eucalipto, por apresentarem alta concentração de sílica, um mineral componente das pozolanas, pode ser empregado em argamassas e concretos, resultando em vários benefícios, entre eles a redução do impacto ambiental e a redução do custo final do material cimentício (Silveira *et al.*, 2010; Carrasco *et al.*, 2014; Rego *et al.*, 2015; Lima *et al.*, 2022).

Dessa forma, a substituição parcial do cimento na fabricação de argamassas de assentamento e revestimento, por cinzas de biomassa, é uma alternativa que vem sendo estudada pela academia (Carrasco *et al.*, 2014; Bonfim, 2019), tendo em vista que, por se tratar de um material não estrutural, as argamassas apresentam uma predisposição para consumir maiores quantidades de resíduos em sua composição (Samiei *et al.*, 2015). A diminuição da demanda de cimento Portland está diretamente relacionada com a redução do lançamento de CO₂ na atmosfera (Montes-Hernandez *et al.*, 2009).

Para tanto, faz-se necessário considerar alguns fatores ao utilizar as cinzas de biomassa para esta finalidade. Deve-se realizar testes e estudos para determinar a quantidade ideal de cinzas a serem incorporadas, a dosagem e produção, bem como os efeitos na resistência e durabilidade dos produtos cimentícios ao longo do tempo, garantindo que as cinzas de biomassa estejam livres de impurezas e contaminantes que possam afetar a qualidade do produto final. Por isso, é recomendável utilizar cinzas de biomassa provenientes de fontes confiáveis e realizar testes de qualidade para garantir que atendam aos requisitos de desempenho desejados.

Os estudos realizados por Figueiredo e Azevedo (2002), Figueiredo e Rego (2002), Bacarji *et al.* (2013), Ferreira e Ribeiro (2018), Degen *et al.* (2019), Castro *et al.* (2020) Gonçalves *et al.* (2021), Cabral *et al.* (2022), mostram a real influência das adições minerais em concretos e argamassas. Além disso, as pesquisas sobre a cinza da queima da casca de arroz mostraram resultados

promissores quando utilizado como substituto do cimento Portland, melhorando as propriedades como trabalhabilidade (Kieling *et al.*, 2009; Moraes *et al.*, 2010), resistência mecânica (Bezerra *et al.*, 2011; Bezerra *et al.*, 2012), absorção de água (Bezerra *et al.*, 2011) e aderência (Silva; Libório, 2003; Kieling *et al.*, 2009). No mesmo sentido, a utilização das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e de cavaco de eucalipto também se mostraram viáveis nos estudos de Canova *et al.* (2015), Silveira *et al.* (2015) e Modolo *et al.* (2013).

Apesar de apresentarem bons resultados de desempenho, ainda não existem estudos aprofundados que investiguem os impactos do tempo de estocagem das argamassas com incorporação de cinzas de biomassa, o que torna o material refém do uso imediato e dificulta o processo de fabricação, compra e venda. Dessa forma, para que a argamassa modificada com cinzas de biomassa aumente sua viabilidade é necessário que suas propriedades atendam aos requisitos de desempenho, tanto para o estado fresco quanto para o estado endurecido, após intervalos de tempo de armazenamento.

Neste contexto, a criação, produção e o emprego de novos materiais na construção civil, além de contribuir para mitigar os impactos ambientais deverão garantir as condições para validar a qualidade e o desempenho dos mesmos, em conformidade com os requisitos de sustentabilidade e desempenho estabelecidos pela NBR 15575-4 (ABNT, 2021).

Destarte, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho ao longo do tempo de estocagem do traço de argamassas com biomassa utilizando a cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), a cinza de casca de arroz (CCA) e a cinza de cavaco de eucalipto (CCE), associadas, em substituição parcial, com o cimento Portland. Essas argamassas modificadas com cinzas de biomassa serão pré-dosadas, misturadas, embaladas e armazenadas, aproximando-se das condições das argamassas industrializadas, para posterior dosagem, nos tempos de estocagem t0, t30, t60 e t90 dias, buscando identificar como o tempo de armazenamento interfere em suas propriedades. Contribuindo assim, com os estudos voltados para materiais ecoeficientes, que atenuam a quantidade de consumo de cimento Portland em produtos cimentícios.

2 Metodologia

2.1 Cinzas e misturas de biomassa

As cinzas de biomassa utilizadas nesta pesquisa foram coletadas em diferentes regiões industriais. A cinza da casca de arroz (CCA) foi coletada diretamente no pátio de uma indústria de produtos alimentícios, localizada em Araguari, MG, cujos principais produtos beneficiados são: arroz, feijão e café. Após o beneficiamento do arroz, a sua casca é utilizada como material combustível para geração de calor durante o processo de torra do café.

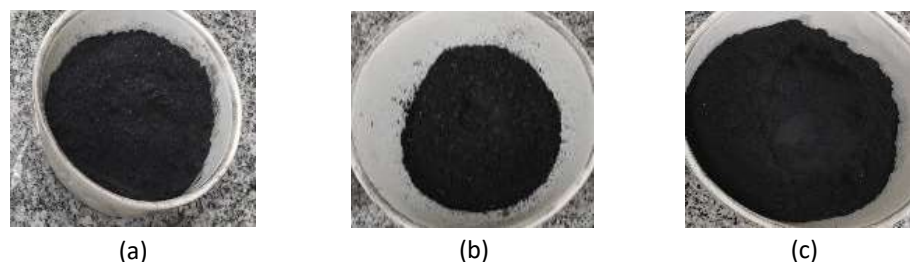
A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), foi adquirida em uma usina de etanol localizada em João Pinheiro, MG. Segundo a empresa, a CBCA é obtida durante o processo de geração de energia por meio da queima do bagaço e da palha da cana-de-açúcar, para que seja feita a produção de etanol.

A cinza do cavaco de eucalipto (CCE) foi fornecida por uma indústria de mineração, situada em Catalão, GO, que atua no beneficiamento de nióbio e fosfatos utilizados em fertilizantes para agricultura. O cavaco de eucalipto é utilizado pela empresa na geração de calor através de fornalhas que atingem temperaturas entre 1000 e 1100°C com o intuito de secar a rocha fosfática.

Após a coleta das cinzas de biomassa *in loco*, as mesmas foram transferidas para o laboratório de Materiais de Construção e Estruturas da Faculdade de Engenharia (FENG) da Universidade Federal de Catalão (UFCat), para homogeneização e uniformização.

A homogeneização das cinzas de biomassa seguiu os mesmos procedimentos de uniformização aplicada nos estudos de Guimarães *et al.* (2023), de forma a reduzir e simplificar processos com tratamentos preliminares. As cinzas de biomassa após a homogeneização estão apresentadas na Figura 1.

Figura 1: Cinzas de biomassa após homogeneização CCA (a), CBCA (b) e CCE (c).



Após a uniformização, foi possível obter as misturas das cinzas de biomassa formadas pela combinação entre a CCA, CBCA e CCE (%CCA + %CCE + %CBCA), seguindo os teores apresentados na Tabela 1, baseados no estudo de Bonfim (2019), o qual estabeleceu por meio da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), as faixas de otimização do traço de argamassas de assentamento e revestimento com adição das cinzas CCA, CBCA e CCE, considerando os melhores resultados no desempenho mecânico das argamassas para as maiores parcelas de substituição do cimento Portland pelas biomassas. Estas misturas de cinzas de biomassa foram intituladas de Cmín, Cméd e Cmáx, fazendo alusão aos teores totais de cinzas, sendo, Cmín a menor porcentagem, Cméd a porcentagem média, e Cmáx a porcentagem máxima de substituição ao cimento Portland (Guimarães *et al.*, 2023).

Tabela 1: Misturas de cinzas de biomassa.

Misturas	%CCA	%CBCA	%CCE	(%CCA+%CBCA+%CCE)
Cmín	12,50	3,20	0,00	15,70
Cméd	15,65	6,35	4,75	26,75
Cmáx	18,80	9,50	9,50	37,80

Fonte: Baseado em Bonfim (2019) e Guimarães *et al.* (2023).

Guimarães *et al.* (2023), em seus estudos avaliaram a atividade pozolânica por meio do método *Chapelle* modificado, das cinzas de biomassa e do efeito sinérgico, por meio das combinações de CCA, de CBCA e de CCE, formando as misturas Cmín, Cméd e Cmáx. Os autores notaram que Cméd mostrou-se como a melhor mistura para o desenvolvimento de um material cimentício, por apresentar-se como a maior porcentagem em substituição ao cimento Portland e, ainda, apresentar perfil pozolânico de 534,20 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ de amostra. Nesse sentido, o presente estudo elegeu a mistura Cméd para compor o traço da argamassa modificada (Tméd).

2.2 Traço ideal para a argamassa modificada com cinzas de biomassa

A definição do traço ideal utilizando as cinzas de biomassa foi embasada nos traços ótimos estudados por Bonfim (2019), mantendo os mesmos materiais e as proporções do traço em massa para a argamassa. Ainda, foi escolhida a mistura de cinzas de biomassa com porcentagem média (Cméd) em substituição ao cimento Portland, estudada por Guimarães *et al.* (2023), pois mostrou-se como a melhor mistura para o desenvolvimento de um material cimentício.

Para fins comparativos, além da definição do traço ideal para a argamassa modificada com a mistura Cméd (Tméd), foi definido um traço referência isento de cinzas de biomassa (Tref). Essa argamassa referência é do tipo mista, com traço em volume dado por 1:1:6. O cimento utilizado foi o de alta resistência inicial (CPV-ARI). Este cimento possui elevado teor de clínquer em sua fabricação, entre 90 a 100%, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018). É o cimento disponível no mercado com menores adições em sua composição, sendo empregado em estudos voltados para a real influência das adições minerais em concretos e argamassas, como os realizados por Cabral *et al.* (2022), Gonçalves *et al.* (2021), Castro *et al.* (2020), Degen *et al.* (2019) e Ferreira e Ribeiro (2018). A cal adotada foi a hidratada com carbonatos, classificada como CH-III, conforme a NBR 7175 (ABNT, 2003). O agregado miúdo utilizado, foi a areia natural (AR) seca com denominação comercial “média”. Cabe destacar que, todos os materiais foram selecionados por serem adequados para a produção de argamassas e tradicionalmente utilizados na região, facilitando a sua obtenção.

A composição, em massa, das argamassas adotadas em cada traço está indicada na Tabela 2. Assim, a partir do traço referência (Tref), sem a inserção de cinzas de biomassa, foi definido o traço ideal (Tméd) com 26,75% de mistura (Cméd) em substituição em massa do cimento Portland.

Tabela 2: Traço em massa dos materiais secos utilizados na produção das argamassas Tref e Tméd.

Argamassa	Cimento	Mistura	Cal	Areia
Tref	1,000	0,000	0,66	7,67
Tméd	0,732	0,268	0,66	7,67

Fonte: Baseado em Bonfim (2019) e Guimarães *et al.* (2023).

2.3 Desempenho da argamassa modificada por tempo de estocagem

Após a determinação dos traços, iniciou-se a etapa de validação do tempo de uso, por meio da análise do desempenho da argamassa ideal modificada com cinzas de biomassa (Tméd) em seu tempo de estocagem. Assim, partindo das proporções de incorporação das cinzas de biomassa definidas no traço ideal, item 2.2, foi realizada a análise do desempenho da argamassa modificada após diferentes períodos de estocagem.

Dessa forma, foram produzidos, tal como definido na NBR 16541 (ABNT, 2016a), 4 lotes de argamassa modificada com cinzas de biomassa definidos pelo traço Tméd. A estocagem do material foi realizada conforme parâmetros recomendados pela NBR 14081 (ABNT, 2012), longe de umidade e luz, aproximando ao máximo do padrão de armazenamento das argamassas industrializadas. A pré-dosagem e o acondicionamento em sacos plásticos do traço ideal da argamassa modificada com cinzas de biomassa, está representada na Figura 2.

Figura 2: Traço ideal da argamassa modificada com cinzas de biomassa: pré-dosagem (a) e acondicionamento em sacos plásticos (b).



Os tempos de estocagem foram definidos como $t_0 = 0$ dias, $t_{30} = 30$ dias, $t_{60} = 60$ dias e $t_{90} = 90$ dias. Para cada uma dessas idades de armazenamento dos materiais secos, foram ensaiados também 4 lotes da argamassa referência, sem incorporação de cinzas de biomassa, para fins comparativos.

Os quantitativos para os traços Tméd e Tref, das argamassas em estudo, estão indicados na Tabela 3. Os materiais constituintes dos respectivos traços foram secos em estufa à uma temperatura de 50°C até apresentarem massa constante. Após o resfriamento os materiais foram pesados, para tanto, foi utilizada uma balança de precisão decimal, exceto para as cinzas de biomassa, que foram pesadas em balança com precisão de 0,0001 g. Feito isso, os materiais constituintes de cada traço foram acondicionados em sacos plásticos nas quantidades especificadas (por saco) em gramas (Tabela 3), fechados e misturados manualmente, agitando a própria embalagem até a homogeneização dos materiais, e colocou-se um novo saco plástico para garantir a vedação.

Em seguida as embalagens, contendo em torno de 3 kg de argamassa pré-dosada, de Tméd e Tref, foram estocadas, separadas em 4 lotes. Para a aplicação do estudo do tempo de estocagem, cada lote possuía em média 4 embalagens de cada traço pré-dosado, totalizando 12 embalagens de Tméd e 12 embalagens de Tref.

Tabela 3: Quantitativos dos materiais secos das argamassas Tméd e Tref, pré-dosados, acondicionados e armazenados.

Materiais		Quantidades			Procedimentos	Tempo de estocagem $t(i)$, i =dias
		por saco (g)	por lote (g)	total (g)		
ARGAMASSA	Tref	CH-III	215	860	3440	t ₀ , t ₃₀ , t ₆₀ e t ₉₀
		CPV-ARI	325	1300	5200	
		AR	2500	10000	40000	
		CH-III	215	860	3440	
		CPV-ARI	238	952	3810	
	Tméd	CCA	50,847	203,388	810	
		CBC	20,860	83,44	330	
		A	15,640	62,56	250	
		CCE	2500	10000	40000	
		AR				

Tméd: traço para argamassa modificada com cinzas de biomassa.

Tref: traço para argamassa referência.

CH-III: cal tipo hidratada com carbonatos.

CPV-ARI: cimento Portland de alta resistência inicial.

Cméd: mistura composta pela combinação da cinza da casca de arroz (CCA), cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) e da cinza do cavaco de eucalipto (CCE).

AR: areia natural, denominação comercial "média".

*A pesagem dos materiais secos foi realizada em uma balança de precisão decimal, exceto as cinzas de biomassa que foram pesadas em balança com precisão de 0,0001g.

Para cada um dos lotes da argamassa modificada (Tméd) e de referência (Tref), foram realizados os ensaios de índice de consistência pelo método espalhamento na mesa (*flow table*) NBR 13276 (ABNT, 2016b), tração na flexão e compressão simples NBR 13279 (ABNT, 2005a), retração e expansão NBR 15261 (ABNT, 2005b), aderência à tração (arrancamento) 13528-2 (ABNT, 2019) e permeabilidade *Test Method No. 11. 4* (RILEM, 1987).

A quantidade de água foi determinada no tempo de estocagem de 0 dia (t_0), por meio do ensaio de consistência, método prescrito pela NBR 13276 (ABNT, 2016b). O preparo da mistura para realização do ensaio seguiu a metodologia contida na NBR 16541 (ABNT, 2016a). Foi fixado o índice de consistência alvo em 265 ± 5 mm para ambos os traços, Tref e Tméd, a fim de determinar uma dosagem padrão para essas argamassas. Este método prevê uma tentativa inicial da quantidade de água necessária para alcançar a trabalhabilidade desejada, configura-

se em um processo iterativo por tentativas da quantidade de água até alcançar o índice de trabalhabilidade desejado. É importante destacar que a argamassa ensaiada em cada tentativa não pode ser utilizada em outros ensaios ou na produção de corpos de prova, posto que, pode interferir em sua reologia e comprometer o seu desempenho. Logo, na realização desta etapa, caso a argamassa ensaiada não atingisse a consistência alvo, a mesma era descartada e então iniciado um novo ensaio.

Dessa maneira, a dosagem padrão foi realizada exclusivamente em t0, definindo a quantidade de água utilizada em todos os demais tempos de estocagem, t30, t60 e t90, para a produção das argamassas. O objetivo de adotar a dosagem padrão é verificar o tempo ao qual a argamassa ainda manterá as propriedades desejáveis, principalmente a trabalhabilidade, sem necessidade de acréscimos de água.

No entanto, além das dosagens padrão realizadas em t0 para Tméd e Tref, e mantida para todos os demais tempos de estocagem na produção dos corpos de prova, foi realizada uma adequação das dosagens através do ensaio de consistência (*flow table*) em t30, t60, t90, para registrar o acréscimo de água necessário para atingir o índice de consistência de 265 ± 5 mm, almejando identificar uma faixa para a quantidade de água requerida pela argamassa no decorrer dos 90 dias de estocagem.

Assim, para o ensaio de consistência (*flow table*) a fim de adequar a dosagem, ao término da aferição dos diâmetros, caso necessitasse de água adicional, esta era acrescentada em 5% do volume inicial e misturada por mais 3 minutos na argamassadeira na velocidade de 650 rpm, e assim sucessivamente até atingir o índice de consistência desejado. Diferente do que prescreve a normativa, a argamassa, neste caso, foi reutilizada até atingir o índice de consistência desejado. Esta metodologia foi aplicada em todos os tempos de estocagem t30, t60 e t90, a fim de propor uma faixa para adequar a dosagem ao longo do tempo de estocagem.

Na sequência, com a dosagem padrão definida em t0, foi possível o preparo das argamassas Tref e Tméd. Assim, para o preparo de cada argamassa com os traços pré-dosados, Tméd e Tref, para cada lote (t0, t30, t60 e t90) foi aplicada a metodologia prescrita pela NBR 16541 (ABNT, 2016a). Os procedimentos metodológicos para a análise do desempenho das argamassas Tméd e Tref, nos tempos de estocagem t(i), estão indicados na Tabela 4.

Tabela 4: Metodologia para análise do desempenho dos lotes de argamassas Tméd e Tref, nos tempos de estocagem t(i).

Descrição	Metodologia	Argamassas	Tempo de estocagem t(i), i=dias
Determinação do índice de consistência (<i>flow table</i>)	NBR 13276 (ABNT, 2016b)		
Preparo da mistura para realização de ensaios	NBR 16541 (ABNT, 2016a)		
Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão simples	NBR 13279 (ABNT, 2005a)		
Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear)	NBR 15261 (ABNT, 2005b)	Tméd e Tref	t0, t30, t60 e t90
Determinação da resistência de aderência à tração	NBR 13528-2 (ABNT, 2019)		
Permeabilidade (cachimbo)	Test Method No. 11. 4 (RILEM, 1987)		

Objetivando analisar e comparar o desempenho mecânico das argamassas no tempo de cura de 28 dias em cada tempo de estocagem, foram produzidos 3 corpos de prova da argamassa Tméd e 3 corpos de prova da argamassa Tref, a cada 30 dias, totalizando 12 corpos de prova da argamassa modificada e 12 corpos de prova da argamassa referência. O rendimento foi de aproximadamente 6 corpos de prova prismáticos, nas dimensões 4x4x16 cm para cada

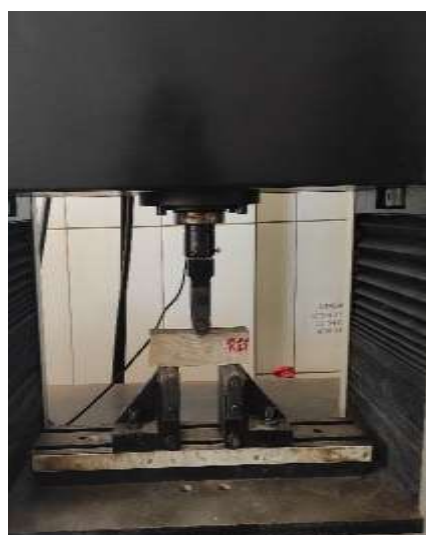
embalagem contendo 3 kg das argamassas pré-dosadas, T_{méd} e T_{ref}. Está representada na Figura 3 os corpos de prova prismáticos 4x4x16 cm para T_{ref} e T_{méd} dosados em t₀.

Figura 3: Corpos de prova prismáticos 4x4x16 cm T_{ref} e T_{méd}, dosados em t₀.



Conforme prescrito pela NBR 13279 (ABNT, 2005a), as partes resultantes dos corpos de prova utilizadas para ensaio de tração na flexão, foram aproveitadas para a realização do ensaio de compressão simples. Tanto o ensaio de tração na flexão, quanto o de compressão simples foram realizados conforme prescreve a NBR 13279 (ABNT, 2005a). Está representada na Figura 4 o aparato para o ensaio de compressão simples e tração na flexão. Utilizou-se a máquina universal de ensaios WDW-300E do laboratório de Estruturas da FENG, com capacidade de carga de até 300 kN. Foram utilizados os apoios necessários para executar os ensaios, o equipamento foi programado com os parâmetros previstos na NBR 13279 (ABNT, 2005a). Para tanto, para a determinação da resistência à tração na flexão, foi aplicada uma carga com velocidade constante de 50 ± 10 N/s até a sua ruptura. Para a determinação da resistência à compressão simples, foi aplicada uma carga constante de 500 ± 50 N/s até a sua ruptura, registrando a força máxima.

Figura 4: Ensaio de tração na flexão e compressão simples: tração na flexão (a) e compressão simples (b).



(a)



(b)

Os cálculos das resistências mecânicas foram feitos utilizando a Equação 1 e Equação 2 contidas na NBR 13279 (ABNT, 2005a).

$$R_t = \frac{1,5 \cdot F_t \cdot L}{40^3} \quad (1)$$

Onde:

R_t = Resistência à tração na flexão, em MPa

F_t = Carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N

L = Distância entre os suportes, em milímetros

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (2)$$

Onde:

R_c = Resistência à compressão simples, em MPa

F_c = Carga máxima aplicada, em N

1600 = Área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga 40x40mm, em mm²

Vale ressaltar que para t90 com 28 dias de cura foram ensaiados apenas 3 corpos de prova na compressão simples, pois as demais partes resultantes foram utilizadas na determinação da umidade das amostras no momento da realização do ensaio. Assim, ao término do ensaio de tração na flexão, em t90 com 28 dias de cura, para as duas partes resultantes de cada corpo de prova, uma foi reservada para ensaio na compressão simples e a outra parte embalada em um saco plástico para o ensaio da determinação da umidade da amostra, seguindo a metodologia de ensaio prescrita pela NBR 13528 (ABNT, 2019), adaptada para amostra desta análise. Logo, a determinação da umidade foi calculada utilizando a Equação 3.

$$U = \left(\frac{(m_u - m_i) - m_s}{m_i} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

U = teor de umidade, em porcentagem de massa de cada corpo de prova, em %

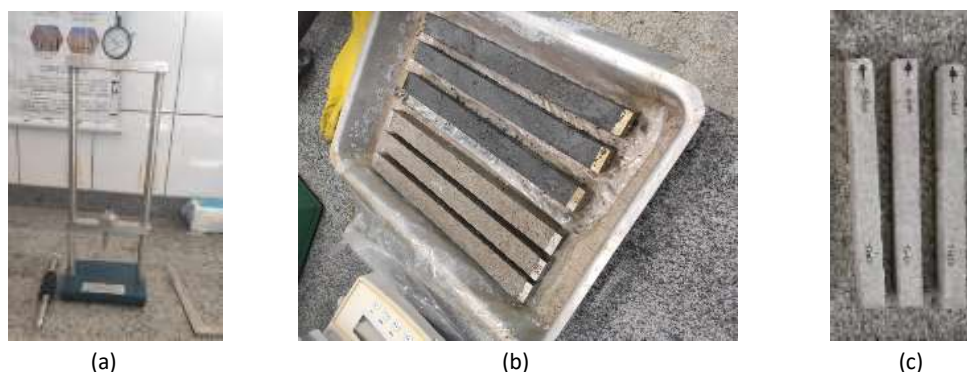
m_i = massa de cada saco plástico utilizado para acondicionar os corpos de prova, em g

m_u = massa de cada corpo de prova com o respectivo saco plástico utilizado para acondicioná-lo, em g

m_s = massa de cada testemunho após o processo de secagem, em g

Para a determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear), foram produzidos 3 corpos de prova com dimensões 25 x 25 x 285 mm, com comprimento efetivo de 250 mm entre as extremidades internas dos pinos, conforme a NBR 15261 (ABNT, 2005b), para cada traço em cada idade de estocagem. Os mesmos foram desmoldados após 48 horas e mantidos em condições de temperatura e umidade controladas, temperatura de (23±2) °C e umidade relativa do ar de (60±5) %, até o momento de ensaio. A configuração do ensaio de retração está representada na Figura 5.

Figura 5: Ensaio de retração: aparelho comparador (a), corpos de prova Tref e Tméd (b) e corpos de prova Tméd-t90dias-cura 28 dias (c).



A primeira leitura e determinação da massa dos corpos de prova foi realizada logo após a desforma (L_0 e m_0), e as demais leituras aos 7 e 28 dias (L_i e m_i) contando da leitura inicial. A

variação dimensional é calculada pela Equação 4, e a variação de massa pela Equação 5, segundo a NBR 15261 (ABNT, 2005b).

$$\varepsilon_i = \frac{(L_i - L_0)}{0,25} \quad (4)$$

Onde:

ε_i = é a medida da variação dimensional, caracterizada como retração (quando negativa) ou expansão (quando positiva) na idade “i”, arredonda ao centésimo mais próximo, em milímetros por metro

L_i = é a leitura efetuada na idade final, em milímetros

L_0 = é a leitura efetuada após a desforma, em milímetros

i = é a idade de leitura

$$\Delta_m = \left(\frac{(m_i - m_0)}{m_0} \right) \cdot 100 \quad (5)$$

Onde:

Δ_m = é a variação de massa, arredondada ao décimo mais próximo, em porcentagem

m_i = é a massa na idade final, em gramas

m_0 = é a massa após a desforma do corpo-de-prova, em gramas

i = é a idade de leitura

A determinação da resistência de aderência à tração foi realizada seguindo o procedimento descrito pela NBR 13528-2 (ABNT, 2019) utilizando como substrato o componente de alvenaria bloco cerâmico de 6 furos com dimensões de 9x19x29 cm. Esses blocos sem chapisco foram recobertos por uma camada com aproximadamente 2 cm de espessura com as argamassas em estudo, Tref e Tméd, por serem argamassas tipo mista, a referida normativa prescreve um tempo de cura de 28 dias para os corpos de prova. Assim, a produção dos corpos de prova contabilizou em pelo menos 4 amostras para o ensaio de aderência, sendo 2 em cada bloco cerâmico, para cada argamassa em estudo (Tref e Tméd) e em cada tempo de estocagem (t0, t30, t60 e t90 dias), totalizando 16 amostras para Tref e 16 amostras para Tméd, ao longo do período de estocagem.

A preparação dos cortes nos corpos de prova seguiu o padrão normativo respeitando a distância mínima de 50 mm entre um corte e outro, dos cantos e das quinas. Após marcados, utilizando uma furadeira de bancada da marca Vonder modelo FBV 013, à qual foi acoplada uma serra copo com as mesmas dimensões das pastilhas de arrancamento, foi realizado o corte, possibilitando a separação da amostra do restante da argamassa de revestimento.

Para a colagem da pastilha, foi realizada a limpeza da superfície da argamassa com um pincel de cerdas finas, a fim de garantir que não haja poeira sobre o substrato no momento da colagem da pastilha. Foi utilizada a massa plástica em camada única e após a secagem foi acoplado o tripé do equipamento de arrancamento. Na sequência, para a realização do ensaio foi posicionada a célula de carga na extremidade da pastilha, e em movimento uniforme aplicou-se a carga até a ruptura do corpo de prova.

Assim ao término do ensaio, registrou-se a força e o tipo de ruptura, e então a resistência de aderência determinada através da Equação 6, segundo a NBR 13528-2 (ABNT, 2019).

$$R_a = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Onde:

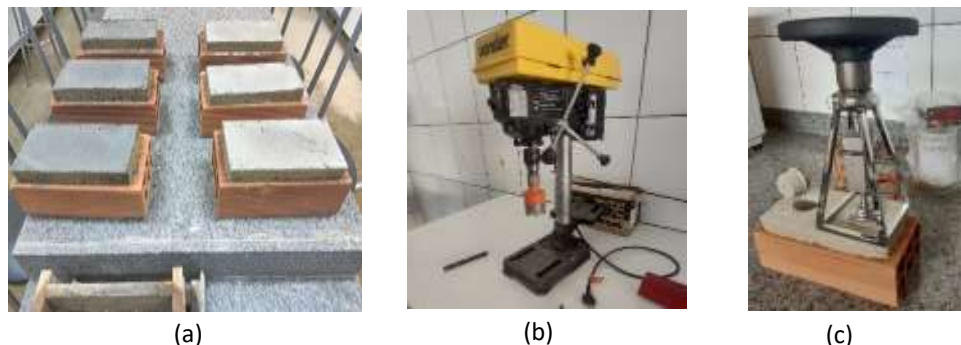
R_a = é a resistência de aderência a tração ao substrato, expressa em megapascals

F = é a força de ruptura, expressa em newtons

A = é a área do corpo de prova, expressa em milímetros quadrados

A Figura 6 representa o aparato utilizado no ensaio de aderência à tração.

Figura 6: Ensaio aderência à tração ao substrato: corpos de prova componente de alvenaria sem chapisco com argamassa Tméd e Tref para t0 dias (a), equipamento utilizado para cortes (b) equipamento para aplicação de carga (c).



Para a determinação da permeabilidade (cachimbo) seguiu-se a metodologia prescrita pelo *The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures - Rilem Test Method No. 11.4*, RILEM (1987). Este ensaio caracteriza-se por ser um método de maior facilidade de execução, complementar aos ensaios de absorção por capilaridade, permitindo a avaliação em laboratório ou *in loco* da quantidade de água que penetra no material.

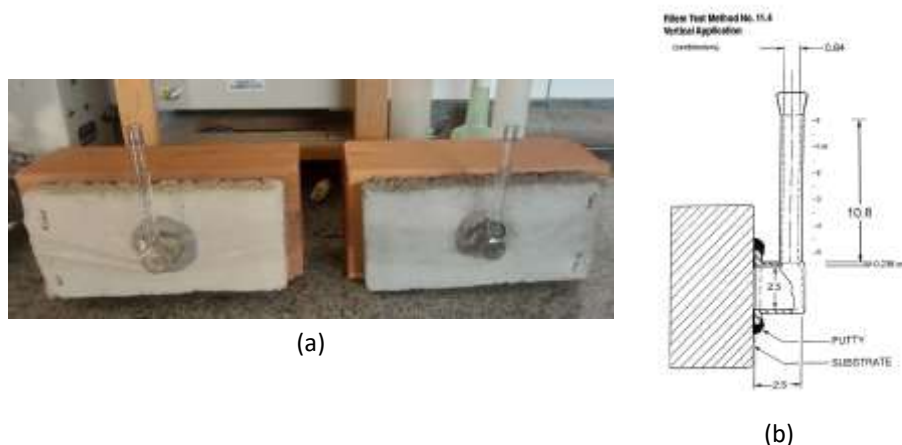
O procedimento consiste na fixação na superfície vertical, de um tubo de vidro em forma de L graduados de 0 a 4 cm³, denominados Tubos de Carsten. Este tubo possui uma parte inferior em formato cilíndrico cujo fundo é fechado. A seção do tubo que encosta na superfície de ensaio é aberta, com 5,7 cm² e constitui um bordo circular plano onde é fixado o tubo, por meio da aplicação de silicone e massa de calafetar, na superfície a ensaiar. O total da altura da coluna de água aplicada à superfície, medida desde o meio da seção até a graduação superior, é de 9,8 cm, o que corresponde a uma pressão de 961,38 Pa, ou ainda a uma pressão dinâmica de vento de 39,6 m/s ou 142,6 Km/h.

Para este ensaio foram moldados 2 corpos de prova para cada argamassa em estudo (Tref e Tméd), em cada tempo de estocagem (t0, t30, t60 e t90 dias). A moldagem dos corpos de prova seguiu igualmente aos preparados para o ensaio de arrancamento. Aos 28 dias de cura, fixou-se os tubos graduados (cachimbos), após 20 minutos, preencheram-se os tubos com água até à graduação 0 cm³ e então foram realizadas as leituras em cada um dos cachimbos, verificando o deslocamento da lâmina d'água nestes tubos aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos, para a verificação do volume de água que percolou nos corpos de prova. Sugere-se repor a água durante o ensaio, caso necessário, segundo o *Test Method No. 11. 4* (RILEM, 1987), porém estes intervalos são sugestivos, e podem ser alterados conforme a porosidade do material a ser ensaiado. Dessa forma, a fim de garantir uma leitura apropriada, padronizou-se a leitura com o registro do tempo necessário para que percolasse os 4 cm³ (4 ml) do Tubo de Carsten, sem a necessidade de repor a água a cada verificação. A Figura 7 representa o aparato utilizado no ensaio de permeabilidade (cachimbo).

Ao término da análise dos desempenhos dos lotes em seus tempos de estocagem, as amostras com 56 dias de cura de Tméd e Tref do último lote, representando a dosagem do material estocado à seco por 90 dias (t90), foram submetidas aos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS), pela Rede de Laboratórios

Multiusuários (RELAM) da Universidade Federal de Uberlândia – UFU, utilizando microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca Tescan, modelo VEJA 3 LMU. Esta técnica permitiu identificar a morfologia das amostras através de imagens com aparência tridimensional.

Figura 7: Ensaio de absorção de água sob baixa pressão ou permeabilidade (cachimbo): aparato para ensaio (a) e esquema do Tubo de Carsten para superfícies verticais (b).



Fonte: Baseado em *Test Method No. 11.4*, RILEM (1987).

3 Resultados e Discussão

3.1 Desempenho da argamassa modificada por tempo de estocagem

Os resultados das caracterizações no estado fresco e no estado endurecido da produção das argamassas T_{méd} e T_{ref}, estão apresentados nos subitens a seguir.

3.1.1 Avaliação das propriedades no estado fresco

No estado fresco as argamassas foram avaliadas pelo método do espalhamento na mesa (*flow table*), NBR 13276 (ABNT, 2016b), Figura 8, a qual expressa os valores obtidos com a dosagem inicial (dosagem padrão) proposta com relação água/materiais secos (a/ms) para T_{méd} e T_{ref}, respectivamente de 0,24 e 0,20.

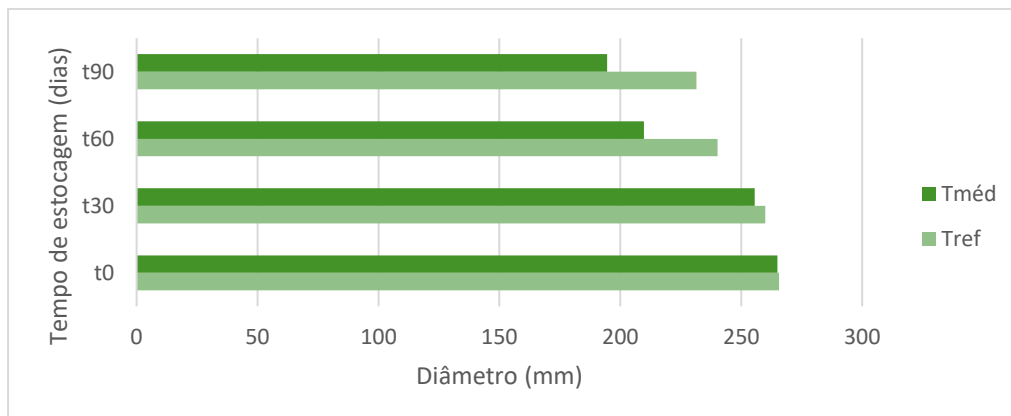
Figura 8: Consistência da argamassa modificada com cinzas de biomassa.



Logo, para a mesma dosagem padrão, a/ms de 0,24 para T_{méd} e de 0,20 para T_{ref}, definida inicialmente em t₀ e replicada para t₃₀, t₆₀ e t₉₀ dias, resultados apresentados na Figura 9, foi

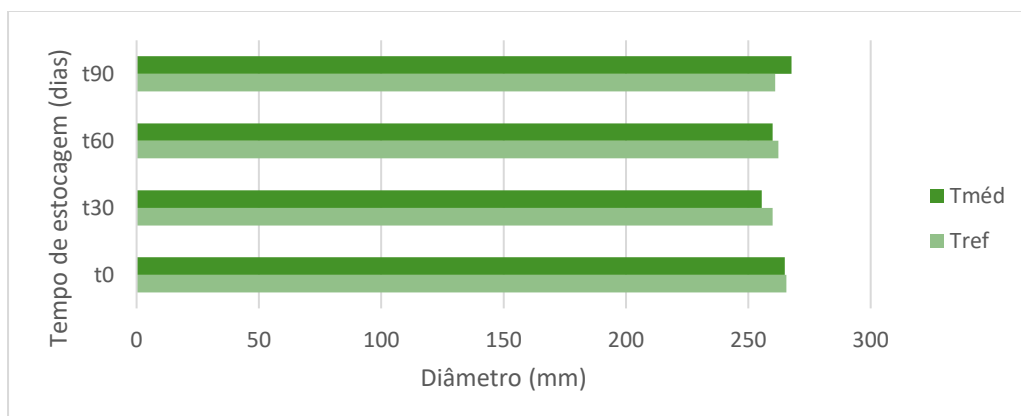
possível verificar a redução da trabalhabilidade das mesmas no ensaio de consistência (*flow table*), para Tméd e Tref. Entretanto, até os 30 dias de estocagem, tanto Tméd quanto Tref mantiveram boa trabalhabilidade, acima de 256 mm.

Figura 9: Dosagem padrão: resultados obtidos no ensaio *flow table*, para Tméd e Tref, relação a/ms respectivamente 0,24 e 0,20.



Para a nova dosagem realizada, chamada de adequação da dosagem, a relação água/materiais secos (a/ms) para Tméd e Tref, são respectivamente de 0,25 e 0,21. Os resultados podem ser observados na Figura 10, e poderão contribuir com futuras aplicações e estudos, análise do desempenho mecânico ao longo do tempo de estocagem.

Figura 10: Adequação da dosagem: Resultados obtidos no ensaio *flow table*, para Tméd e Tref, relação a/ms respectivamente 0,25 e 0,21.

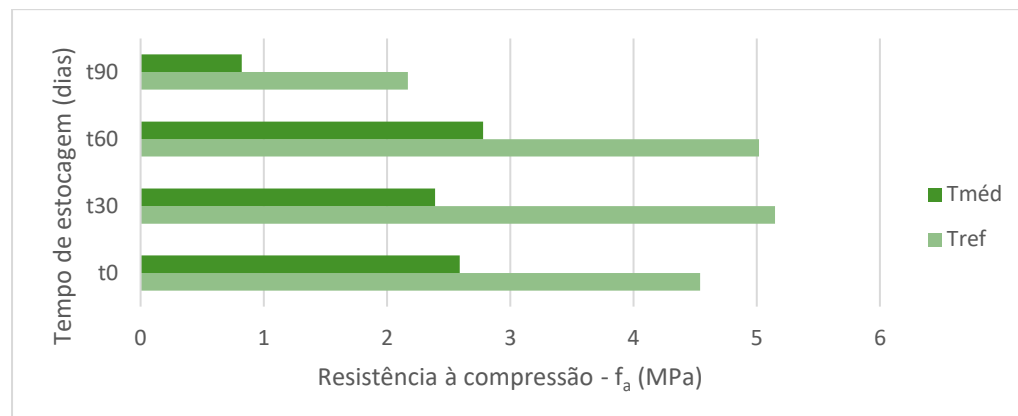


3.1.2 Avaliação das propriedades no estado endurecido

Na Figura 11 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de compressão simples aos 28 dias de cura das argamassas Tméd e Tref ao longo do tempo de estocagem t0, t30, t60 e t90 dias. Nota-se uma redução considerável da resistência à compressão (f_a) aos 90 dias, tanto para Tméd, quanto para Tref. Entretanto, até 60 dias, essas argamassas se enquadram em argamassas de assentamento e fixação para as unidades de alvenaria.

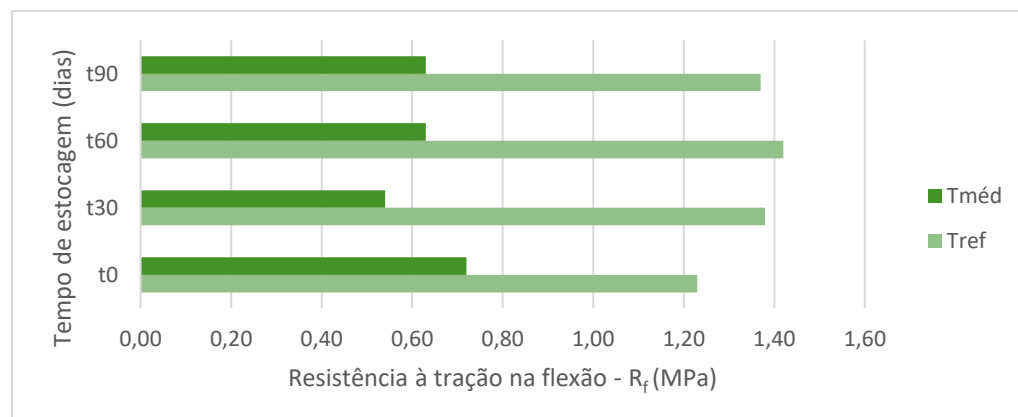
No tempo de estocagem de 60 dias, para o requisito, segundo a NBR 13281-2 (ABNT, 2023), a argamassa Tref pode ser classificada como argamassa AAE argamassa para assentamento de unidades de alvenaria estrutural, $f_a \geq 5,0$ MPa), enquanto Tméd pode ser classificada em AAV (argamassa para assentamento de unidades de alvenaria sem função estrutural, apenas vedação, $2,0 \leq f_a < 5,0$ MPa) ou AAF (apenas para fixação horizontal da alvenaria, encunhamento, $1,5 \leq f_a < 5,0$ MPa).

Figura 11: Resistência à compressão (f_a) aos 28 dias de cura para t0, t30, t60 e t90.



Na Figura 12 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de tração na flexão das argamassas Tméd e Tref ao longo do tempo de estocagem t0, t30, t60 e t90 dias. Observa-se que em todos os tempos de estocagem as argamassas atingiram a classificação R2 ($0,5 \leq R_f < 1,5$ MPa), e podem ser designadas, requisito informativo, em argamassas para revestimento de tetos e paredes, segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023). Os resultados para a umidade dos corpos de prova ensaiados em t90 dias de estocagem para as argamassas Tméd e Tref, aos 28 dias de cura, foram respectivamente, 7,08% e 5,49%.

Figura 12: Resistência à tração na flexão (R_f) aos 28 dias de cura para t0, t30, t60 e t90.



A variação dimensional, é requisito classificatório para as argamassas de revestimento de paredes e tetos (ARV-I, ARV-II, ARV-III e AET), o requisito também é aplicado na classificação de argamassas para assentamento (AAV e AAE) e fixação (AAF), segundo a NBR 13281 (ABNT, 2023). Assim, analisando os resultados obtidos para o ensaio de retração ou expansão linear (ϵ_i) apresentados na Tabela 5, as argamassas Tméd e Tref ao longo do tempo de estocagem t0, t30, t60 e t90 dias, podem ser classificadas tanto em VD4 (retração entre 0 e 0,70) para argamassas de revestimento de paredes e tetos, segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), quanto em argamassas para assentamento e fixação (retração menor ou igual a 0,80), segundo a NBR 13281-2 (ABNT, 2023).

Tabela 5: Resultados obtidos no ensaio de variação dimensional.

Argamassa	Idade de cura dos corpos de prova (i=28dias)							
	ϵ_{28} (mm/m)				Δ_{28} (%)			
	Tempo de estocagem (dias)				Tempo de estocagem (dias)			
	t0	t30	t60	t90	t0	t30	t60	t90
Tref	-0,20	-0,21	-0,27	-0,46	-2,05	-2,08	-2,30	-2,90
Tméd	-0,17	-0,17	-0,19	-0,44	-2,14	-2,23	-2,43	-3,94

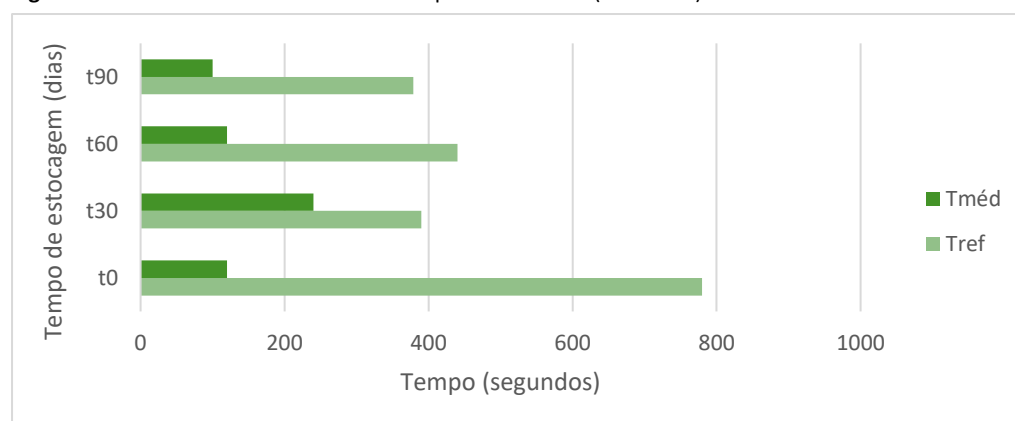
Ainda, na Tabela 5, está apresentado o resultado para a variação de massa (ΔI) dos corpos de prova utilizados no ensaio de retração. Nota-se que os corpos de prova moldados com as argamassas Tméd e Tref estocadas por 90 dias e ensaiados conforme a NBR 15261 (ABNT, 2005b), apresentaram maiores retrações e perda de massa concomitantemente, mas ainda assim permaneceram dentro da classificação VD4, AAV, AAE e AAF. Os resultados para a resistência potencial de aderência à tração ao substrato (R_a) no tempo de estocagem t0, t30, t60 e t90 dias, utilizando o método de ensaio prescrito pela NBR 13528-2 (ABNT, 2019) estão apresentados na Tabela 6. Nota-se que até os 30 dias para a estocagem (t30) a argamassa Tméd e Tref atingiram o melhor desempenho, com 0,18 MPa para Tméd e 0,24 MPa para Tref. No entanto, apenas Tref alcançou o requisito mínimo ($R_a \geq 0,20$ MPa) para ser classificadas na classe RA1 como argamassa de revestimentos interno de paredes e tetos destinados à aplicação de pintura e/ou textura (ARV-I, ARV-II e ARV-III), segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), ou em argamassas para assentamento (AAV e AAE) e fixação (AAF) segundo a NBR 13281-2 (ABNT, 2023).

Tabela 6: Resultados obtidos no ensaio de arrancamento.

Argamassa	R_a (MPa)			
	Tempo de estocagem (dias)			
	t0	t30	t60	t90
Tref	0,25	0,24	0,10	0,02
Tméd	0,10	0,18	0,04	0,03

Ainda, é importante salientar que apesar do principal aspecto estudado no ensaio de arrancamento ser o valor obtido da resistência de aderência (R_a), a análise do tipo de ruptura também é um fator importante, os valores são menos preocupantes, exceto que sejam muito baixos (Carasek, 2010). Logo, foram registrados o Tipo de ruptura de cada corpo de prova, conforme prescrito pela NBR 13528-2 (ABNT, 2019), os resultados contabilizados, em sua totalidade, ocorreram na interface argamassa/substrato (ruptura Tipo B). Os resultados da permeabilidade para as argamassas Tméd e Tref nos tempos de estocagem t0, t30, t60 e t90 dias, estão apresentados na Figura 13.

Figura 13: Resultados obtidos no ensaio de permeabilidade (cachimbo).



Aos 28 dias de cura Tméd apresentou melhor estanqueidade no tempo de estocagem 30 dias (t30), os resultados foram similares para t0, t60 e t90 dias. As reações pozolânicas podem justificar o comportamento mais poroso da matriz cimentícia em Tméd, apresentando compostos não hidratados, comparados aos resultados de Tref.

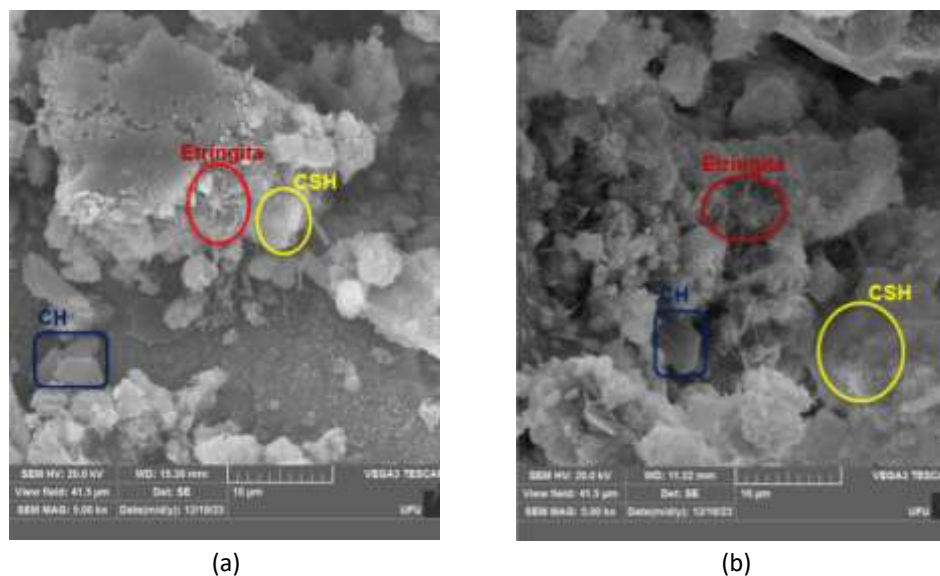
3.1.3 Microscopia eletrônica de varredura

Os resultados das análises realizadas na microestrutura das argamassas Tref e Tméd, estão representadas na Figura 14, contendo a avaliação microestrutural com aproximação de 5000x, aos 56 dias de cura das argamassas dosadas aos 90 dias (t90), referente ao último lote em estudo para o tempo de estocagem.

Estão indicados na Figura 14 alguns produtos de hidratação nos poros das matrizes das argamassas Tref (Figura 14a) e Tméd (Figura 14b), sendo eles o C-S-H (silicato de cálcio hidratado), o CH (hidróxido de cálcio, conhecido como portlandita), e a etringita (o trissulfoaluminato de cálcio ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$)). O C-S-H apresenta-se com estruturas pequenas e fibrilares pouco cristalinas e até mesmo redes reticulares (Pontes, 2019). O CH apresenta grandes cristais com morfologia prismática hexagonal (Cascudo *et al.*, 2018). E a etringita com cristais de morfologia prismática aciculares (agulhas) (Zhang *et al.*, 2020).

Verifica-se que a argamassa modificada (Tméd) por ter em sua composição as cinzas de biomassa com estrutura mesoporosa, promovem a absorção da água e liberação continuamente ao sistema para as reações de hidratação, que por serem reações lentas contribuem para promover a cicatrização dos poros, uma vez que a alta quantidade desses aglutinantes permanecem não hidratados, mesmo em maiores idades. Além disso, as pozolanas tendem a diminuir o CH na composição da pasta cimentícia (Ferreira *et al.*, 2016; Amin *et al.*, 2019). Essas reações pozolânicas apresentam tanto importância química, com a formação do gel de C-S-H secundário, como importância física, pois este produto preenche os poros maiores, favorecendo assim à durabilidade e à resistência mecânica (Dal Molin, 2011; Mehta e Monteiro, 2014).

Figura 14: MEV: Tref-5000x (a) e Tméd-5000x (b).



4 Considerações finais

A utilização da argamassa modificada com cinzas de biomassa, Tméd, foi avaliada ao longo do tempo de estocagem t0, t30, t60 e t90 dias em condições que se aproximam ao padrão de argamassas industrializadas, com seus materiais secos pré-dosados. Observou-se que no estado fresco a argamassa Tméd manteve uma boa trabalhabilidade, com índice de consistência de massa acima de 256 mm, até a dosagem realizada aos 30 dias de estocagem (t30). No estado

endurecido, para a resistência à compressão simples (f_a), aos 28 dias de cura, $T_{méd}$ apresentou f_a variando entre 2,0 a 5,0 MPa, até os 60 dias de estocagem (t_{60}), após esse tempo houve queda considerável na resistência, mas ainda assim podem ser classificadas em AAV (argamassa para assentamento de unidades de alvenaria sem função estrutural, vedação), ou AAF (argamassas apenas para fixação horizontal da alvenaria, encunhamento). Diferentemente, a resistência à flexão (R_f) apresentou em todas as idades de estocagem a classificação R2 para argamassas de revestimento de paredes e tetos, com R_f variando entre 0,5 a 1,5 MPa. Ainda, no estado endurecido, a retração linear (ϵ_i) aos 28 dias de cura aumentou concomitantemente ao tempo de estocagem do material, mesmo assim manteve-se dentro dos requisitos classificatórios para as argamassas de assentamento e revestimento. No entanto, a resistência potencial de aderência à tração ao substrato (R_a), atingiu o melhor desempenho aos 30 dias de estocagem (t_{30}) com 0,18 MPa para $T_{méd}$ e 0,20 para T_{ref} .

Para utilização dessa argamassa modificada como argamassa colante industrializada para aplicação de revestimentos de placas cerâmicas faz-se necessário um estudo mais aprofundado, uma vez que, apesar dos valores obtidos para resistência à compressão de $T_{méd}$, até os 90 dias apresentar-se dentro dos valores mínimos para utilização como argamassa colante industrializada para revestimento de placas cerâmicas (0,5 MPa para áreas internas e 1,0 MPa para áreas externas), prescritos pela NBR 14081 (ABNT, 2012), no que tange a resistência à tração na flexão, a argamassa $T_{méd}$ não atingiu o mínimo requerido (1,0 MPa para áreas internas e 1,5 MPa para áreas externas). De modo similar, apesar da variação dimensional aos 28 dias de cura não ultrapassar em nenhum dos tempos de estocagem o valor da retração (áreas internas 0,5 mm/m e áreas externas de 1,0 mm/m), a argamassa modificada não atingiu o valor mínimo para seu uso como argamassa colante no quesito resistência potencial de aderência à tração ao substrato em áreas internas ou externas de 0,3 MPa. Esses valores são importantes para garantir que a argamassa colante tenha a resistência necessária para suportar as cargas e as solicitações mecânicas as quais será submetida durante a vida útil do revestimento cerâmico, evitando problemas como o descolamento das peças.

Por tudo isso, a argamassa modificada com o traço $T_{méd}$ substituindo 26,75% a massa do cimento Portland por cinzas de biomassa (15,65%CCA + 6,35%CBCA + 4,75%CCE), tem utilização até os 60 dias de estocagem de seus materiais pré-dosados para uso em dosagens de argamassas de assentamento e revestimento, sem comprometimento do desempenho físico e mecânico.

Por fim, sugere-se para futuros trabalhos aplicar a adequação da dosagem a/ms de 0,25, proposta nesta pesquisa, para a produção dos corpos de prova e análise do desempenho ao longo do tempo de estocagem. Além disso, realizar os ensaios no estado endurecido também para as idades mais avançadas de cura. Determinar a influência do tempo de estocagem nas propriedades da argamassa modificada utilizando exclusivamente a cinza da casca de arroz. Analisar o desempenho da argamassa modificada com cinzas de biomassa para utilização como argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo financiamento desta pesquisa (Projeto número 552118/2011-7).

Referências

- AMIN M. N. *et al.* Pozzolanic Reactivity and the Influence of Rice Husk Ash on Early-Age Autogenous Shrinkage of Concrete. **Frontiers in Materials**, v. 6, n. 150, p. 1-13, 2019. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00150>
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016b.
- _____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005a.
- _____. **NBR 13281**: Argamassas inorgânicas - Requisitos e métodos de ensaios – Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos – Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. Rio de Janeiro, 2023.
- _____. **NBR 13528**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração – Parte 1: Requisitos gerais – Parte 2: Aderência ao substrato. Rio de Janeiro, 2019.
- _____. **NBR 14081-1**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005b.
- _____. **NBR 15575-4**: Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016a.
- BACARJI, E. *et al.* Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction & Building Materials**, v. 45, p. 1-10, 2013.
- BEZERRA I. M. T. *et al.* Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 6, p. 639-645, 2011. ISSN 1807-1929. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000600015>
- BEZERRA, I. M. T. *et al.* Coating mortar using rice husk ash as binding. **Materials Science Forum**, Trans Tech Publications, v. 727-728, p. 1502-1507, 2012.
- BONFIM, W. B. **Otimização do teor de incorporação de cinzas de biomassa para produção de argamassas**. Orientador: Heber Martins de Paula. 2019. 110f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão, Catalão - GO, 2019.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Construção Sustentável. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/cidadessustentaveis/urbanismosustentavel/constru%C3%A7%C3%A3osustent%C3%A1vel>>. Acesso em: 17 ago.2023.
- CABRAL, S. C. *et al.* Análise comparativa de resistência à compressão uniaxial de traço de argamassa autoadensável e concreto celular espumoso com incorporação de sílica ativa ou

- cinza de madeira de eucalipto. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, IV, 2022, Salvador. **Anais eletrônicos** [...] Feira de Santana: ABMTENC, 2022. p. 384-397. ISBN: 978-65-00-55912-5. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1_2JsuXiKwPpGW9AG35aFz6SmWk6BFttE/view
- CANOVA, J. A *et al.* Avaliação de argamassa mista de revestimento com substituição da areia natural por cinza de bagaço de cana-de-açúcar. **Revista Ciência e Engenharia**, Editora da Universidade Federal de Uberlândia - EDUFU, v. 24, n. 1, p. 125-134, 2015. <http://dx.doi.org/10.14393/19834071.2015.27888>
- CARASEK, H. **Argamassas**. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil**, 2ªed., São Paulo: IBRACON, 2010. v 1, p 885-936.
- CARRASCO, B. *et al.* An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks. **Fuel**, v. 118, p. 272–280, 2014. ISSN 0016-2361. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.077>
- CASCUDO, O. *et al.* Contribuição à caracterização nanoestrutural de pastas de cimento por meio da técnica de microscopia de força atômica. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, 2018. ISSN: 1517-7076. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0289>
- CASTRO, M. F. *et al.* Incorporação de cinza de casca de arroz para preparação de argamassas de assentamento e revestimento. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XVIII, 2020, Porto Alegre. **Anais eletrônicos** [...] Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1-8. ISBN: 978-65-00-13688-3. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/issue/view/16>.
- CINCOTTO, M. A. **Tecnologia de Edificações: utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil**. São Paulo: PINI / IPT, 1988.
- DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. (ed). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, IBRACON, 2011, p.261-309.
- DEGEN, M. K. *et al.* Estudo da lama vermelha como fíler em matrizes cimentícias. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, VI, 2019, Belém. **Anais eletrônicos** [...] Belém: ENARC, 2019. p. 340-356. ISSN 2175-1870.
- FERRARA, L. *et al.* On the use of crystalline admixtures in cement-based construction materials: from porosity reducers to promoters of self-healing. **Smart Materials and Structures**, v. 25, n. 8, p. 1-17, 2016. ISSN: 0964-1726. <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/084002>
- FERREIRA, L.; RIBEIRO, F. Estudo comparativo do concreto auto adensável com cinza da casca de arroz sem controle de queima e sílica ativa. **Revista Paranoá**, v. 20, p. 1-12, 2018. ISSN: 1679-0944. <http://dx.doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n20.2018.03>
- FIGUEIREDO, E. J. P.; LOPES, J. L. M. P. *et al.* Influence of the Marble and Granite Benefication of Residue (MGBR) as Filler on the Properties of Concrete. In: Fifth ACI/CANMET International Conference on High-Performance Concrete Structures and Materials, 2008, Manaus, AM, Brasil. Fifth ACI/CANMET International Conference on High-Performance Concrete Structures and Materials. Michigan, USA: American Concrete Institute, 2008. v. 1. p. 341-352.
- FIGUEIREDO, E. J. P.; AZEVEDO, C. S. Contribution of the mineral additions for the resistance the corrosion of reinforcing steel in concrete. In: High Performance Concrete, 2002, Recife-PE.

- High Performance Concrete - Proceedings. Michigan: AMERICAN CONCRETE INSTITUTION, 2002.
- FIGUEIREDO, E. J. P.; LOPES, J. L. M. P. *et al.* Influence of the Marble and Granite Benefication of Residue (MGBR) as Filler on the Properties of Concrete. In: Fifth ACI/CANMET International Conference on High-Performance Concrete Structures and Materials, 2008, Manaus, AM, Brasil. Fifth ACI/CANMET International Conference on High-Performance Concrete Structures and Materials. Michigan, USA: American Concrete Institute, 2008. v. 1. p. 341-352.
- FIGUEIREDO, E. J. P.; REGO, J. H. S. Technical viability of the rice husk ash burned without burned temperature control to high performance concrete. In: High Performance Concrete (ACI), 2002, Recife-PE. High-performance Concrete - Proceedings. Michigan: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2002.
- GONÇALVES, C. F. *et al.* Characterization and feasibility of using vegetable biomass ash in mortar. **Revista ALCONPAT**, v. 11, n. 2, p. 1-16, 2021. ISSN 2007-6835. <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.484>
- GUIMARÃES, C. C. C. *et al.* Efeito sinérgico das cinzas de biomassa: potencial pozolânico. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, VIII, 2023, Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos [...]** Foz do Iguaçu: ENARC, 2023. p. 1-7. ISSN 2175-1870. <https://doi.org/10.46421/enarc.v8i00.2909>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censos Demográficos**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2021.
- KIELING, A. *et al.* Influência da adição de cinza de casca de arroz na aderência de argamassas de revestimento. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, UNISINOS - Universidade do Vale do Rio Dos Sinos, v. 5, n. 2, p. 157-170, 2009.
- LIMA, C. J. F. *et al.* Durability, life cycle cost and life cycle assessment of binary mixtures with fly ash, rice husk ash and concrete demolition waste. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 1, p. 161-166, 2022. ISSN: 1678-8621. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000100585>
- MENEZES, R. M. R. O. *et al.* Hydraulic binder obtained from recycled cement and sand powder. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 11, p. 1178-1185, 2018.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk, 2014.
- MODOLO, R. C. E. *et al.* Mortar formulations with bottom ash from biomass combustion. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 275–281, 2013. ISSN 0950-0618. [10.1016/j.conbuildmat.2013.03.093](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.093)
- MONTES-HERNANDEZ, G. *et al.* Mineral sequestration of CO₂ by aqueous carbonation of coal combustion fly-ash. **Journal of Hazardous Materials**, Elsevier BV, v. 161, n. 2-3, p. 1347-1354, 2009. ISSN: 0304-3894. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.104>
- MORAES, C. A. M. *et al.* Life cycle analysis (LCA) for the incorporation of rice husk ash in mortar coating. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1170-1176, 2010. ISSN: 0921-3449. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.03.012>

- PONTES, V. C. P. **Efeitos dos sulfatos na degradação do concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Paraíba, João Pessoa, 2019.
- SAMIEI, R. R. *et al.* Properties of cement–lime mortars vs. cement mortars containing recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 84, p. 84-94, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.042>
- SALES, R. B. C. *et al.* Durability of Mortar Made with Fine Glass Powdered Particles. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, p. 1-9, 2017.
- SILVA, D. O. F. **Reaproveitamento de lamas residuais do processo de fabricação do concreto**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- SILVA, V. S.; LIBÓRIO, J. B. L. Avaliação do efeito da sílica extraída da casca de arroz na aderência de argamassas e chapiscos. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. São Paulo: [s.n.], v. 5, p. 385-399, 2003.
- SILVEIRA, D. A. *et al.* Influência da substituição parcial do cimento Portland pela cinza do bagaço de cana de açúcar residual nas propriedades mecânicas do concreto. **Concreto & Construção**, v. 77, p. 65-70, 2015.
- SILVEIRA, D. A. *et al.* Influência da Substituição Parcial do Cimento Portland pela Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar Residual nas Propriedades Mecânicas do Concreto. In: XXXIV JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 2010, San Juan - Argentina. Structural Safety, 2010. v. 1. p. 1-10.
- SOUSA, L. R. L. *et al.* Caracterização do setor sucroalcooleiro no Estado de Goiás visando o uso da CBC como adição ao cimento Portland. **A Construção em Goiás**, v. 40, p. 4-14, 2008.
- REGO, J. H. S. *et al.* Microstructure of cement pastes with residual rice husk ash of low amorphous silica content. **Construction & Building Materials**, v. 80, p. 56-68, 2015.
- RILEM – RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D’ESSAIS ET MATÉRIAUX. Water absorption under low pressure. Pipe method. **Test No.11. 4**. Recommandations provisoires, Paris, 1987.
- ZHANG, Y. *et al.* Effects of temperature on performances and hydration process of sulphoaluminate cement-based dual liquid grouting material and its mechanisms. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Budapest, v. 139, n. 1, p. 47-56, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08426-y>