

Desempenho mecânico e durabilidade de argamassas contendo adições de resíduos de carvão vegetal amazônico

Mechanical performance and durability of mortars containing additions of Amazonian charcoal wastes

Umberto Gonçalves Ribeiro¹, Claiton de Oliveira Souza¹,
Atílio Efrain Bica Grondona², Andrea Parisi Kern², Feliciane Andrade Brehm²

¹ Faculdade de Rondônia, Coordenação de Pesquisa e Extensão, BR-364, km 6,5 s/n, Zona rural, CEP: 76815-800, Porto Velho, RO, Brasil.

² Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Núcleo de Materiais, Av. Unisinos, 950, Bairro Cristo Rei, CEP: 93.022-750, São Leopoldo, RS, Brasil.
e-mail: prof.umberto.ribeiro@gmail.com, claiton.engenheiro@gmail.com, atiliog@edu.unisinos.br, apkern@unisinos.br, felicianeb@unisinos.br

RESUMO

Este artigo analisou o desempenho físico-mecânico de argamassas cimentícias contendo adições de cinza granulada de biomassa oriunda de resíduos de carvão vegetal amazônico. Como aglomerante suplementar, foram substituídos teores de 0%, 5% e 10% em massa do aglomerante principal (cimento Portland). Foram observados e comparados aspectos de durabilidade e desempenho mecânico entre os compósitos. Para isso, foram selecionadas matérias primas – subprodutos da indústria madeireira, areia de rio (ϕ 2,36 mm), cinza granulada (CG) de carvoaria (ϕ 75 μ m) e o cimento CP II – F 40. Corpos de prova cilíndricos 50x100 mm foram confeccionados com argamassas das misturas. Análise termogravimétrica (TG/DTG) sobre a CG foi desenvolvida. O compósito cimentício em estado endurecido foi analisado nos aspectos de volume de vazios, absorção de água total e por capilaridade, perda de massa a 950 °C, resistências à tração diametral e resistência à compressão axial. Os resultados mostraram queda no desempenho mecânico dos compósitos com adição de 5%. O compósito com 10% de CG apresentou o melhor desempenho geral, porém, indicou tendência a queda na durabilidade, a partir das idades avançadas.

Palavras-chave: Gerenciamento de resíduos; porosidade; capilaridade; aglomerante suplementar.

ABSTRACT

This article analyzed the physical-mechanical performance of cementitious mortars containing additions of granulated ash from biomass Amazonian charcoal waste. As supplementary binder, contents of 0%, 5% and 10% by weight of the main binder (Portland cement) were replaced. Aspects of durability and mechanical performance were observed and compared between composites. For this, raw materials were selected - by-products from the timber industry, river sand (ϕ 2.36 mm), granulated ash (CG) from coal (ϕ 75 μ m) and CP II - F 40 cement. Cylindrical specimens 50x100 mm were produced with mortar from the mixtures. Thermogravimetric analysis (TG / DTG) on CG was carried out. The cementitious composite in a hardened state was analyzed in terms of void volume, total and capillary water absorption, loss of mass at 950 °C, diametrical tensile strength and axial compressive strength. The results showed a decrease in the mechanical performance of the composites with an addition of 5% CG. The composite with 10% CG showed the best overall performance, however, it indicated a trend to decrease the durability, from advanced ages.

Keywords: Waste management; porosity; capillarity; supplementary binder.

1. INTRODUÇÃO

A partir da pirólise de biomassa são produzidas cinzas, cujas origens estão na combustão de resíduos de madeiras, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, além de outros resíduos agroflorestais como cacau, coco, bambu, capim, etc [1-3].

A pirólise da madeira é uma das técnicas mais antigas para a obtenção de alguns subprodutos de interesse do homem, entre eles o carvão vegetal. A ação do calor, de forma controlada sobre a madeira, produz um material rico em carbono (~75%), por isso denominado de carbonização [4].

Na Amazônia ocidental brasileira, precisamente no Estado de Rondônia, existem produtores de carvão vegetal, o qual se destina à geração de energia de uso doméstico e/ou industrial. No município de Triunfo, a cerca de 180 km de Porto Velho, uma cooperativa produz o carvão e gera a CG, devido à carbonização de resíduos madeireiros, às quais localmente denominam-se ‘munha’. Doravante, neste trabalho, serão referidas como *cinzas granuladas* (CG), diferenciando-as das cinzas de fundo de forno, mais escassas, cuja granulometria característica se apresenta mais fina. A CG acumula-se junto aos fornos, devido à fragmentação do carvão, já resfriado.

Em geral, a qualidade do carvão de madeira produzido depende das características da planta, idade, diâmetro de corte e da química da madeira [5], assim como dos parâmetros de pirólise (tempo, temperatura) a que foi submetida [6]. A quantidade em massa das cinzas geradas também depende desses fatores. No entanto, a CG não depende diretamente do processo de carbonização, mas da qualidade do carvão produzido e da fragmentação que este sofre durante a retirada dos fornos (ensacamento), conforme informações obtidas dos carvoeiros de Triunfo. Na verdade, as CG são adicionadas à cinza de carbonização gerada durante a pirólise e que se acumula no fundo dos fornos.

Levando-se em conta a necessidade de destinação correta dos resíduos do carvão de biomassa, COSENTINO *et al* [6] analisou suas partículas, adicionadas a compósito cimentício. Como agregados ou aglomerantes, verificaram sua significativa importância, na medida em que pode substituir parte do cimento Portland, conhecido por altas emissões de CO₂ [7], durante o processo de clínquerização do calcário. Outras aplicações já conhecidas incluem o resíduo como melhorador da fertilidade dos solos [8].

As cinzas de biomassa florestal, quando obtidas na forma de pó fino (de menos de 60 µm) e avaliadas como componente em argamassa geopolimérica à base de metacaulim, apresentaram teores elevados de SiO₂, Fe₂O₃, e Al₂O₃, garantindo propriedades pozolânicas no compósito metacaulínico [9]. Porém, o desempenho em termos de durabilidade é apontado como inconclusivo. Para os compósitos cimentício com adição de cinzas de biomassa é interessante aprofundar investigação dos fatores de comprometimento da durabilidade, como a absorção de água, por exemplo. Sendo a queima não controlada, ou controlada empiricamente, os testes de porosidade e fluxo de umidade podem ajudar a entender o comportamento do compósito quanto aos fatores desconhecidos ligados à durabilidade e resistência, a exemplo dos algoritmos de regressão estatística [10].

As aplicações das cinzas como componente aglomerante têm sido desenvolvidas com a sua fração mais fina, e, quando necessário, faz-se a redução dos grãos (para < 100 µm), perto da finura do aglomerante principal. A relação água-aglomerante tem sido testada próximo de 0,5 [11, 12] e a ampla faixa granulométrica das cinzas (menor que 1 µm até maior que 100 µm), sugere um alto potencial para alcançar melhor densidade de empacotamento [12].

FAVA *et al* (2018) [13] relataram testes de substituição do aglomerante cimentício por cinzas de madeira com limite superior de 30%, enquanto CHEAH & RAMLI (2012) [14] testaram até 25%, porém os melhores resultados foram alcançados com menos de 15% de substituição, permitindo, inclusive a manutenção da trabalhabilidade de referência e resistência à carbonatação [14].

Devido no local pesquisado haver acúmulo de CG sem destinação apropriada, e diante das novas tendências visando a sua aplicação como material de construção, substituindo o aglomerante cimentício, o objetivo principal deste trabalho é colaborar com o aprofundamento no conhecimento, quanto ao desempenho físico-mecânico das CG, quanto a absorção de água total e por ascensão capilar, e suas implicações na resistência e durabilidade.

Este artigo apresenta os efeitos da adição da CG de carvão vegetal como aglomerante suplementar, substituindo teores de 0%, 5% e 10% do aglomerante principal. Foram observados aspectos de durabilidade (absorção de água por ascensão capilar, absorção total por imersão e perda de massa na variação da temperatura) e desempenho mecânico. A cinza utilizada neste estudo foi coletada da cooperativa localizada no município de Triunfo, Estado de Rondônia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CG de carvão

As CG utilizadas foram encontradas no Município de Triunfo, em Rondônia, Brasil. São resultado da carbonização de refugos de indústrias de beneficiamento de madeira (Figura 1a), acumulando-se junto aos fornos durante a limpeza (Figura 1b).

O material foi coletado na forma de grãos de diversos diâmetros e, inicialmente, foram eliminados lascas e corpos estranhos, por peneiramento (1,18 mm), visando facilitar a sua preparação e aplicação. A amostragem foi realizada imediatamente após o esvaziamento de um dos fornos, no momento em que operadores realizavam a retirada dos resíduos para novo ciclo de carbonização. Na Figura 1 é possível observar os refugos do beneficiamento da madeira (1a) e a CG obtida dos fornos (1b).



Figura 1: Refugos de beneficiamento de madeira (1a) e CG geradas na carbonização (1b).

Conforme informações obtidas dos operadores de fornos, as espécies florestais das quais se originam os refugos para a produção do carvão são múltiplas, sendo economicamente inviável selecionar apenas um tipo de madeira para esse fim. Assim, torna-se difícil o monitoramento da qualidade do carvão quanto a este parâmetro, visto que a maior parte do material vem de serrarias de beneficiamento onde não há uma adequada segregação (por espécie). Contudo, conforme relato dos técnicos locais, as espécies mais comuns são: cedro (*Cedrela fissilis*), maracatiara (*Astronium lecointei*) e cerejeira (*Amburana Caerensis*), uma vez que ainda ocorrem extrações autorizadas de madeira nativa.

Posteriormente à coleta, o material foi submetido a três ciclos de moagem utilizando um moinho de grãos, seguidos por peneiramento, obtendo-se o material passante na peneira de malha 0,075 mm (n° 200), e descartando-se os resíduos retidos.

A caracterização física mostrou massa específica de 1,55 g/cm³ em picnômetro Micromeritics Accupyc II 1340 a gás hélio e perda ao fogo (PF) de 91,88 %. A análise química qualitativa foi desenvolvida pelo método de fluorescência de raios-X (FRX), em espectrômetro SHIMADZU EDX-720, ambos os ensaios foram realizados no laboratório LCVMat-UNISINOS, com o fim de esclarecer aspectos da composição físico-química do material.

2.2 Areia

A areia foi coletada na jazida localizada no Município de Candeias do Jamary, em Rondônia, Brasil, à margem do Rio Candeias, onde se encontravam pilhas do material em condições de expedição. Com observância à representatividade da amostra [15], foram coletadas porções de duas pilhas diferentes, totalizando aproximadamente 60kg, acondicionadas em recipientes plásticos. Estando o material excessivamente úmido, este foi deixado secar naturalmente ao ar, por uma semana, à sombra, antes de iniciar a sua caracterização. A análise granulométrica do agregado miúdo, realizada conforme procedimentos da NBR NM 248 [16], está representada na Figura 2. A peneira de malha 0,6 mm deixou passar 39,52% do material, o que levou a curva granulométrica para acima do limite da zona ótima, a partir desse diâmetro, mas permanecendo dentro dos limites de utilização. Contudo, o módulo de finura de 2,81 caracteriza o agregado como dentro da zona ótima, conforme a NBR 7211 [17]. Os grãos acumulados na peneira de malha 6,3 mm (0,87 %) foram descartados,

antes dos demais ensaios. A areia foi caracterizada quanto à sua massa específica, seguindo os procedimentos da NBR 9776 [18], apresentando um índice de $2,65 \text{ g/cm}^3$, para as frações de diâmetro de 4,75 mm ou menos.

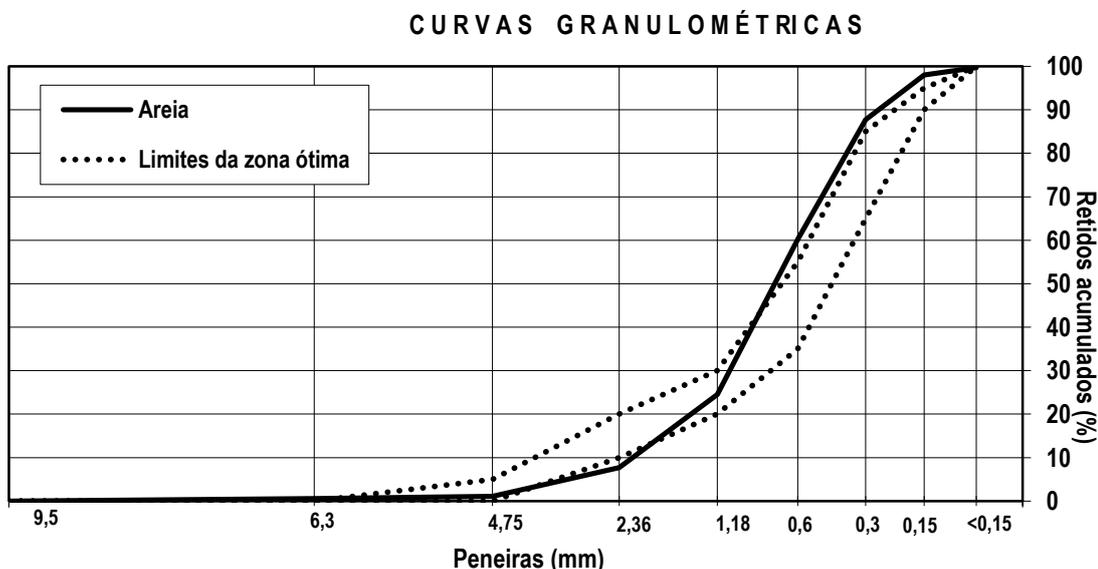


Figura 2: Curvas granulométricas da areia com limites da zona ótima padronizados [17].

2.3 Cimento

O cimento Portland utilizado foi o CP II F-40 o qual possui indicação de alto desempenho nas primeiras idades, isto para prevenir possíveis incompatibilidades na sua hidratação, uma vez que, em trabalho anterior de RIBEIRO (2018) [19], relata-se inibição de pega na presença de material orgânico. A massa específica foi determinada através de picnômetro Micromeritics Accupyc II 1340, a gás hélio. Resultados de massa específica, PF e finura são apresentadas na Tabela 1. A caracterização química quantitativa do cimento, via técnica de FRX, está apresentada na Tabela 2. Os ensaios foram realizados em espectrômetro de FRX marca SHIMADZU modelo EDX-720, a cargo do laboratório LCVMat-UNISINOS.

Tabela 1: Características físicas do cimento CP II F-40.

NOME	CP II F-40
Massa específica (g/cm^3)	2,965
PF (%)	9,274
Finura (%)	2,74

Tabela 2: Composição química do cimento CP II F-40.

COMPOSIÇÃO	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	ZnO	SrO
Concentração (%)	0,918	3,322	2,172	12,800	0,124	2,227	0,680	50,729	0,234	0,005	0,109	2,414	0,047	0,182

Com o intuito de verificar alterações no tempo de reações químicas, quando da hidratação do cimento, foram realizados testes de tempos de pega, conforme NBR NM 65 [20]. Para estes ensaios as pastas de consistência normal foram preparadas com teor ótimo de água de 36% em relação à massa do cimento, determinado segundo os procedimentos descritos na NBR NM 43 [21].

2.4 Procedimentos experimentais

Ao selecionar o agregado miúdo, optou-se por utilizar a fração passante na peneira de malha 2,36 mm, cor-

respondente a 92,3% do material coletado (Figura 2), caracterizada pela NBR 7211 [17] como grãos de média granulometria, haja vista possível utilização em elementos de vedações verticais de alvenaria, dado que a areia mais fina traz benefícios quanto à produtividade e economicidade [22]. Admite-se, porém a possibilidade de utilização até o limite granulométrico de diâmetro de 4,75 mm para fabricação de concretos.

As CG foram coletadas em grãos de diâmetros variados, depois peneiradas, inicialmente na malha de 1,18 mm, sendo reduzidas posteriormente à fração passante na malha de 0,075 mm (n° 200), por moagem, chegando-se à finura do cimento Portland [23]. Esta finura melhora a interação físico-química dos materiais e, uma vez que as cinzas substituirão parte do cimento, ressalta-se que as propriedades pozolônicas, devido a presença do composto ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) são potencializadas quando é aumentada a superfície específica [24, 25]. Os teores percentuais de 5% e 10%, adotados neste trabalho, seguem resultados anteriores de FAVA *et al* [13] e CHEAH & RAMLI [14], que apresentaram os melhores resultados para até 10% de substituição, pois os resultados com teores de substituição acima deste limite, na literatura consultada, não foram satisfatórios.

Após a adequação de agregado e aglomerantes, passou-se a execução de estudo de dosagem para a mistura, baseando-se na padronização especificada na norma NBR 7215 [26]. Essa Norma Técnica estabelece uma relação de 1:3 entre aglomerante e agregado para argamassa, com fator água/cimento (*a/c*) de 0,48 nos testes de compressão para o aglomerante. Esta relação *a/c* é similar à utilizada em outros experimentos com misturas contendo cinzas [11, 12]. Os teores de cada material participante da mistura e o consumo de cimento são apresentados no estudo de dosagem da Tabela 3. As amostras representando as misturas são nomeadas de CG-0 (sem adições de CG), CG-5 (com adição de 5% de CG) e CG-10 (com adição de 10% de CG).

Com o material utilizado e produzido neste trabalho também foram realizados testes para auxiliar na interpretação dos resultados, como tempos de pega [20], análise química, consumo de cimento – calculado através da Equação 1 para cada tipo de mistura, massas específicas e volume de vazios do compósito endurecido [28].

$$C_c = \frac{1000}{\frac{C}{\gamma_c} + \frac{A}{\gamma_A} + \frac{CG}{\gamma_{CG}} + a/c} \quad (1)$$

Sendo, C_c = consumo de cimento por m^3 ; C=massa do cimento; A=massa da areia; CG=massa da cinza; *a/c*=fator água-cimento; γ_c , γ_A , γ_{CG} = massas específicas do cimento, areia e CG, respectivamente.

Tabela 3: Estudo de dosagem para os testes da argamassa e respectivo consumo de cimento.

TRAÇO CIMENTO	CG	AREIA	FATOR A/C	TRAÇO [C:CG:A+A/C]*	CONSUMO DE CIMENTO (KG/M ³)
CG-0	1	0		1:0:3+0,48 (Referência)	513,14
CG-5	0,95	0,05	3	0,95:0,05:3+0,48	509,11
CG-10	0,90	0,10		0,90:0,10:3+0,48	505,15

* NOTA: partes de C – cimento; CG – cinzas granuladas; A – areia; *a/c* – fator água/cimento.

O consumo de cimento traz o nível de redução no uso do clínquer Portland, aspecto essencial na avaliação de ganhos em produção ambientalmente correta, na medida em que favorece diretamente a redução de emissões de CO_2 . Os cálculos mostram que a redução do aglomerante principal é proporcional ao teor de adições. A variação entre o consumo do CG-0 e do CG-10 foi de 1,6%.

Com o estudo de dosagem definido, foram preparadas as argamassas utilizando um misturador mecânico e moldadas, conforme a NBR 7215 [26], duas séries de 12 corpos de provas, sendo 3 amostras de 4 exemplares. Uma série de 12 corpos de prova foi destinada às verificações de absorção de água por ascensão capilar [27] e absorção de água total por imersão [28], efetuadas leituras em quadruplicatas e duplicatas, respectivamente. Foram registradas também as resistências à tração por compressão diametral [29]. A segunda série de 12 corpos de prova foi destinada à verificação do desempenho mecânico por compressão axial [30].

Após 24h da moldagem foram desenformados e submetidos à cura úmida por imersão em água, onde permaneceram por 21 dias até retirada para preparação dos ensaios de absorção de umidade e por 28 dias para os testes de compressão axial.

Após 21 dias a primeira série de 12 corpos de prova foi preparada para verificação dos efeitos de absor-

ção de água por capilaridade. Para isso foram sendo secos em estufa a 110° C por 24h e, após resfriamento natural até a temperatura ambiente, acondicionados em recipientes de vidro, sobre fios plásticos de $\phi = 3$ mm, afastados do fundo do recipiente, a fim de garantir total contato da base com água. Os recipientes, em número de dois, foram nivelados adequadamente e inundados com água até a marca de 5 mm entre a base dos corpos de prova e a marcação circular feita previamente em torno de cada espécime (Figura 3).



Figura 3: Espécimes sendo preparados para verificação da absorção de água por ascensão capilar.

Os corpos de prova dos compósitos CG-0, CG-5 e CG-10 permaneceram em contato com a água durante 72 horas, sendo feitas leituras das respectivas massas nos intervalos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas após a inundação dos recipientes. A maior ou menor massa verificada representa maior ou menor quantidade de água absorvida. Após 72 horas foram comparadas as massas final e inicial de cada compósito e calculado o nível de absorção capilar através da Equação 2.

Em seguida, os corpos de prova foram testados quanto à resistência à tração por compressão diametral (Figura 4a), seguindo-se os procedimentos padronizados [29], nos quais cada elemento é posicionado no sentido do seu diâmetro (50 mm) sob o equipamento de compressão, sendo a resistência à tração, após ruptura, calculada através da Equação 3.

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (2)$$

Sendo, C = absorção de água por capilaridade em g/cm^3 ; A = massa do corpo de prova que permanece em contato com a água por um determinado período de tempo, em g; B = massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de 23 ± 2 °C, em g; S = área da seção transversal em cm^2 .

$$f_{ct,sp} = \frac{2 F}{\pi d \ell} \quad (3)$$

Sendo, $f_{ct,sp}$ = resistência à tração por compressão diametral, em megapascals (MPa); F = força máxima obtida no ensaio, expresso em newtons (N); d = diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm); ℓ = comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

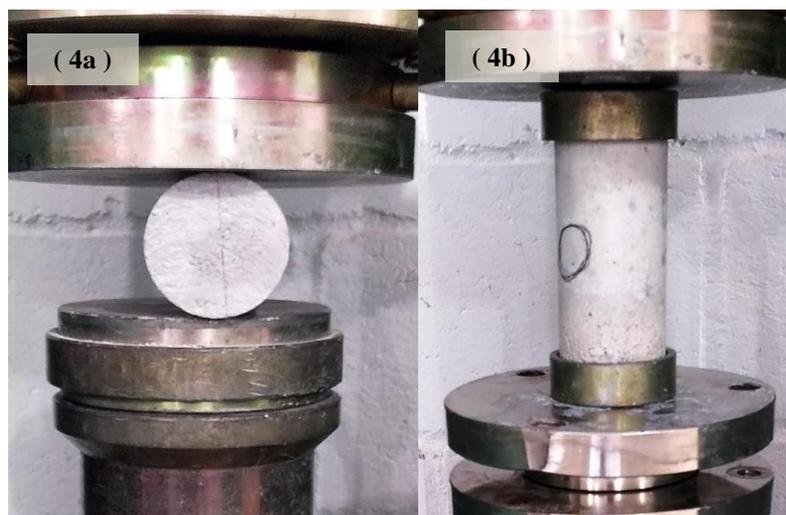


Figura 4: Preparação dos corpos de prova para compressão diametral (4a) e axial (4b).

Aos 28 dias de cura, a segunda série de corpos de prova foi preparada e submetida ao ensaio de compressão axial (Figura 4b), conforme os procedimentos descritos na NBR 5739 [30], segundo a qual os espécimes são posicionados, devidamente ajustados para compressão com o auxílio de pratos e anéis circulares de Neoprene®. As resistências por compressão axial foram então registradas, depois de calculadas através da fórmula da Equação 4.

$$f_c = \frac{4 F}{\pi D^2} \quad (4)$$

Onde, f_c é a resistência à compressão axial (MPa); F é a força máxima alcançada (N); D é o diâmetro do corpo de prova (mm).

Em etapa anterior à aplicação da CG como material pozolânico foi essencial buscar conhecimentos sobre suas características *in loco*. Os fornos que produzem os resíduos estudados são do tipo “colmeia”, de superfície. A temperatura empregada para carbonização da madeira não é precisamente monitorada, mas relata-se que pode variar entre 300-700 °C [31], concentrando-se, em geral, bem próximo de ~500 °C [32]. Como praticamente todo o processo é artesanal e empírico, é possível haver material não carbonizado e/ou impurezas dentre os resíduos. Então, aplicou-se a termogravimetria (TG/DTG) nas CG coletadas, o que permite identificar temperaturas instantâneas em que ocorrem as reduções de massas e estimar momentos de volatilização e decomposição química, dentre outras reações [33], e a verificação de PF a 950 °C, sobre os compósitos em estado endurecido e o cimento.

A análise das curvas TG/DTG foi realizada com equipamento Perkin Elmer Simultaneous Thermal Analyzer STA 8000, com uma amostra com cerca de 23,267 mg, em cadinho de Alumina, no intervalo de temperatura entre 25-1000 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, em atmosfera de N₂, solicitado ao Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais – UNISINOS.

A PF foi desenvolvida conforme o procedimento CEMP 120 [34] nos Laboratórios de Materiais – FA-RO, onde, inicialmente as amostras foram colocadas em estufa por 2 horas a 110 °C para eliminação da umidade; feita a pesagem inicial em balança com precisão de 0,0001g; em seguida, transferidas para forno tipo mufla FORNITEC com revestimento cerâmico e capacidade térmica de 1200 °C, aquecido a uma taxa 25°C/min, até atingir temperatura de 950 °C (± 20 °C). Nesta temperatura, as amostras foram mantidas por 2 horas, resfriando-se então até ~80 °C, e passando-se ao dessecador (por 18 horas), até a temperatura ambiente, efetuando-se a pesagem final.

Os efeitos da adição de CG no compósito e respectiva perda de massa por calcinação foram submetidos à análise estatística através de aplicação do Teste-t bilateral, com 2 graus de liberdade, significância de 5%, hipótese nula de que a *massa da amostra permanece constante* e hipótese alternativa que *há indícios de perda de massa* pelo aumento do teor de CG, comparando-se as medidas emparelhadas das amostras de argamassas em estado endurecido, antes e depois da queima.

3. RESULTADOS

3.1 FRX da CG

A análise qualitativa elementar está mostrada na Tabela 4.

Tabela 4: FRX qualitativa de CG.

ELEMENTOS MAJORITÁRIOS (>50%)	MENOR QUANTIDADE (5% < X < 50%)	ELEMENTOS TRAÇOS (< 5%)
Ca	Fe, K, Si	Mn, S, Sc, Ti, Al, Sr, Zn, Cu

3.2 TG/DTG da CG

As curvas TG/DTG são mostradas na Figura 5. Mostraram picos de redução percentual de massa em pelo menos duas regiões destacadas, em 84,09 °C e na faixa entre 450 °C e 750 °C. A perda de massa total foi de 34% à temperatura de 1000 °C. Já as perdas de massas com faixas de temperaturas e respectivos picos estão apresentadas na Tabela 5.

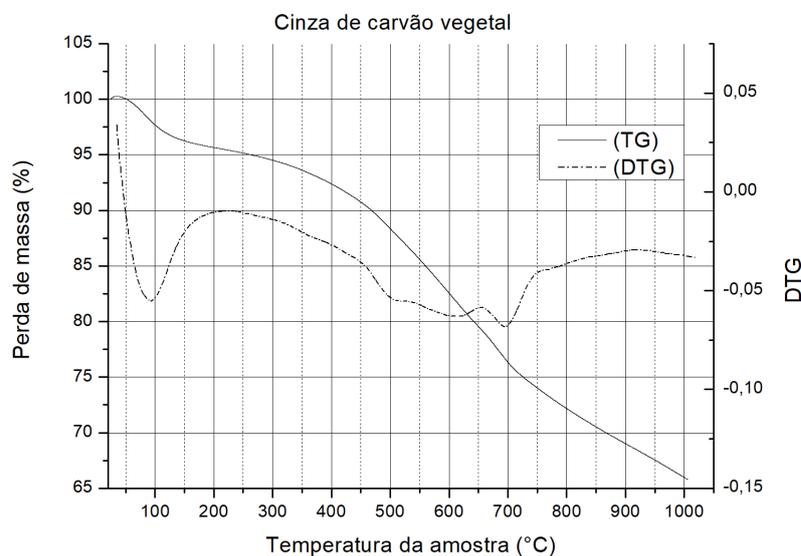


Figura 5: Curvas TG/DTG da CG.

Tabela 5: Resultado da perda de massa por análise termogravimétrica (TG/DTG) e respectivas regiões de picos.

#	FAIXA (°C)	PICOS (°C)	PERDA DE MASSA (%)
1	25-200	84,09	4,34
2	450-550	488,39	0,34
3	650-730	686,67	0,72

3.3 Absorção de água total e por capilaridade dos compósitos

Na Tabela 6 são apresentadas as médias das observações de absorção de água por imersão e por capilaridade. A absorção de água por total imersão dos corpos de prova mostrou percentual para CG-10 equivalente à referência (CG-0). Porém, a mistura CG-5 possui índices estatisticamente iguais aos demais. De fato, a análise de variância (ANOVA) não mostrou diferença significativa em nível de 5%, entre os três compósitos.

Tabela 6: Taxas de absorção de água por imersão e por capilaridade, após 72 horas de contato

ÍNDICE	CG-0	CG-5	CG-10
Absorção H ₂ O (%)	8,75 ± 0,40	9,13 ± 0,68	8,16 ± 0,33
Coefficiente de variação (%)	4,61	7,44	4,06
Capilaridade (g/cm ²)	0,94±0,13	1,08±0,21	0,93±0,06
Coefficiente de variação (%)	13,60	19,36	6,89

O coeficiente de variação para a absorção de água total também mostrou equivalência entre os compósitos CG-0 e CG-10, porém ambos parecem estar ligeiramente destacados do compósito CG-5, que apresentou o maior distanciamento entre as observações individuais e a média, ficando CG-5 e CG-10, respectivamente, 61% maior e 12% menor que a mistura CG-0.

A capilaridade do compósito segue a mesma tendência da absorção de umidade por imersão total. O material de referência aproxima-se do maior teor de adição (CG-10) e ambos distanciam-se da mistura CG-5. Isto está demonstrado pelo índice de água absorvida, mas também aparece nos valores dos coeficientes de variação, que neste caso aproximou-se 42% maior para CG-5 e 49% menor para CG-10. Por outro lado, a análise estatística não mostrou diferenças consideráveis ao nível de 5% de significância, entre os três compósitos testados.

3.4 Desempenho mecânico dos compósitos

Na Tabela 7 são apresentadas as resistências médias resultantes e coeficiente de variação para os testes de desempenho mecânico. Pode-se observar que a adição de 5% de CG influencia o desempenho de maneira diferenciada entre os testes. Para os esforços de compressão axial, CV difere de 14%(CG-0) para 16%(CG-5) – aumentando 12,5%, e na compressão diametral essa variação sai de 11%(CG-0) para 8%(CG-5), diminuindo cerca de 27%. Já para o CG-10 essa variação permaneceu equivalente na compressão e apresentou um acréscimo de 45% na tração diametral. Os gráficos das Figuras 6 e 7 auxiliam na visualização das distribuições dos valores encontrados nos conjuntos de dados. Apesar das oscilações, a ANOVA sobre as médias de compressão e também de tração não demonstraram diferenças, ao nível de confiança de 95%.

Tabela 7: Resistências médias e coeficiente de variação (CV) para compressão axial e tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos 50x100 mm.

MISTURA	COMPRESSÃO AXIAL (MPa)	CV (%)	TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)	CV (%)
CG-0	40,33 ± 5,84	14	2,34 ± 0,25	11
CG-5	34,67 ± 5,44	16	2,08 ± 0,16	8
CG-10	39,74 ± 5,45	14	2,45 ± 0,39	16

No gráfico da Figura 6 são apresentados os resultados de resistência à compressão. Para CG-5, 50% das maiores resistências observadas concentram-se até o 3º quartil e o maior valor delas é limítrofe a este. Para CG-10, as 50% menores resistências apresentaram-se até o 2º quartil, incluindo aí a menor das resistências observadas (35,28 MPa). Os testes mostraram resistências equivalentes entre CG-0 e CG-10 e ligeira queda com relação a CG-5, tendendo à igualdade entre as medianas.

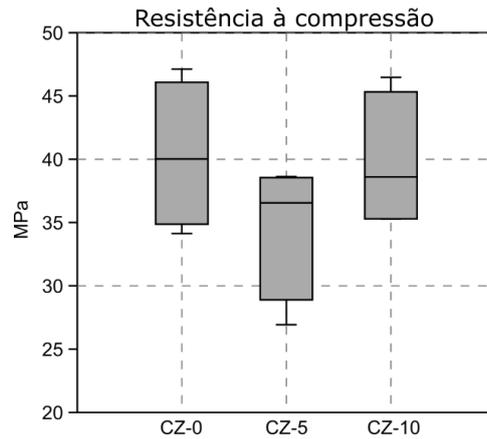


Figura 6: Gráficos de caixa para a compressão axial.

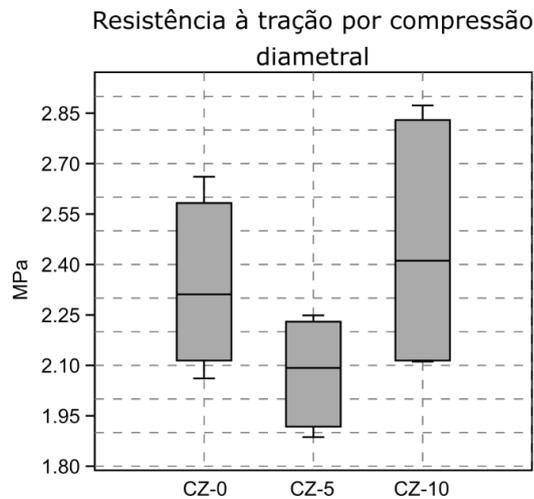


Figura 7: Gráficos de caixa para a tração por compressão diametral.

Para a resistência à tração houve uma maior variação nos resultados para o compósito CG-10 (Figura 7), com diferença visível entre este e o CG-5, porém com uma boa distribuição dos dados entre os quartis. No entanto, os menores valores de desempenho no compósito CG-5 levaram a sua média ($2,08 \pm 0,16$) para bem próxima do menor valor de CG-0, que foi de 2,06 MPa, sendo que todos os valores observados em CG-5 ficaram abaixo da mediana de CG-0. O compósito CG-10 obteve resistência à tração aumentada aproximadamente 5% em relação ao CG-0.

3.5 Retardo no tempo de pega e caracterização física dos compósitos

Na Tabela 8 são apresentados os tempos de pega, visando avaliar o quanto a adição das CG tende a afetar as reações de hidratação do cimento.

Observou-se que, conforme se adicionam as CG ao compósito de referência, há um retardo no tempo de início e fim de pega. Foi verificado que a maior diferença para o início de pega está para o compósito CG-10, com 35,2% de aumento, e para o fim de pega, este compósito apresenta a maior diferença, com 7,5% em relação ao CG-0. Observou-se que, quando se utilizou o dobro da CG, o tempo de início de pega praticamente triplicou.

Tabela 8: Tempos de início e fim de pega.

TEMPOS DE INÍCIO E FIM DE PEGA				
MISTURA	Início (min)	Fim (min)	Retardo no início (%) *	Retardo no final (%) *
CG-0	122	253	-	-
CG-5	137	268	12,3	5,9
CG-10	165	288	35,2	7,5

* NOTA: Retardo no início e no final, quando comparado com os tempos de CG-0 (referência).

Tabela 9: Volume de vazios e massa específica aparente.

MISTURA	VOLUME DE VAZIOS (%)	MASSA ESPECÍFICA APARENTE (G/CM ³)
CG-0	17,60 ± 0,82	2,01 ± 0,00
CG-5	18,28 ± 1,25	2,00 ± 0,01
CG-10	16,67 ± 0,74	2,04 ± 0,01

Índices físicos que, conforme REIS [35], podem implicar na diminuição da durabilidade e aumento da permeabilidade dos compósitos, estão apresentados na Tabela 9. O volume de vazios foi observado em 18,28% para o CG-5. Este compósito apresentou elevados desvio padrão e variância, mostrando instabilidade na porosidade do material pela adição das CG, mas com tendência à redução em CG-10. Esta redução trouxe para abaixo da referência, além dos níveis de variância, o índice de porosidade, o qual reduziu para 16,67%, o que pode implicar positivamente no desempenho físico-mecânico do material.

Quanto à massa específica aparente (Tabela 9), tanto para o compósito CG-0 quanto para os demais com adições, os resultados mostraram valores em torno de 2,0 g/cm³, com desvios padrões bem próximos de zero. Já a massa específica real (excluindo-se o volume de vazios) resultou em valores em torno de 2,45 g/cm³, para os três compósitos, com nenhuma variação estatística significativa entre eles.

3.6 PF dos compósitos

A PF aumentou quando os compósitos foram calcinados (Tabela 10) desde a temperatura ambiente até atingir 950° C, acentuando-se, como esperado, para o compósito com maior quantidade de CG, atingindo 14,71% de material volatilizado. Para um menor teor de CG (CG-5) a perda de massa apresentou-se a menor dentre os três compósitos testados.

Tabela 10: PF para os compósitos.

MISTURA	PF – 950° C (%)
CG-0	7,02
CG-5	3,60
CG-10	14,71

4. DISCUSSÃO

4.1 FRX da CG

Conforme os resultados, a amostra apresentou teor acima de 50% de Ca; teores entre 5% e 50% contém Fe, K e Si; há ainda traços abaixo de 5% de Al, Mn, S, Sc, Ti, Al, Zn e Cu. A presença dos elementos Fe, Al e Si favorecem reações de pozolanicidade, os quais compõem os óxidos pozolânicos (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) [36]. Apesar da presença do conteúdo não mineralizado, a parcela de material com propriedades pozolânicas vai contribuir no consumo do Ca(OH)₂ livre, e auxiliar ainda nas demais reações dos compostos de hidratação do cimento [37], o que pode melhorar a adequação com materiais orgânicos. Com cinzas produzidas em condições de temperaturas similares às do presente trabalho (~500 °C), MEMON *et al* [25] relataram obtenção de material com conteúdo de óxidos (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) em 68,6%, fornecendo um índice de atividade pozolânica de 77,5%, o que o caracterizaria como material pozolânico classe E com índice de atividade pozolânica dentro dos limites estabelecidos pela norma brasileira NBR 12653 [38].

4.2 Termogravimetria (TG/DTG)

A análise de uma amostra da CG de 23,267 mg mostrou perda de massa total de ~34%. Os dados da análise termogravimétrica apresentaram redução de massa da amostra. Na faixa #1 (25-200 °C), onde ocorreu o pico de maior taxa de perda de massa (4,34%) aos 84,09 °C, pode estar ocorrendo a perda de água adsorvida nos grãos [39]. A decomposição de hemicelulose, celulose e lignina em moléculas gasosas ainda ocorrem na faixa #2 [41, 42], com temperatura de pico em 488,39 °C, devido a presença de material não carbonizado, bem como de pequenas quantidades de compostos fenólicos e hidrocarbonetos leves [41, 42]; nesta etapa acumulou-se 13,76% de perda de massa. Analisando os dados da DTG, é possível verificar que na rampa de 800-1000 °C, quando se dão as reações de gasificação da biomassa, ficou registrada uma perda de massa de 4,34%. Sendo as taxas dos 200 °C iniciais e finais equivalentes, em termos de perdas de massa, resta que a faixa central do intervalo (200-600 °C) corresponderá aos eventos de carbonização remanescente da matéria orgânica [43]; já na faixa #3 ocorre o pico a 686,67 °C, atingindo temperaturas iguais e acima de 800 °C, onde há perda de água pela condensação de grupos OH [39] e se formam compostos gasosos como CO, CO₂, além de outros compostos óxidos ou carbonáticos de Mg e Ca [33, 40].

A curva TG mostrou que cerca de metade da perda de massa total, ocorreu até a temperatura de ~550 °C. Uma vez que a carbonização dos refugos madeireiros acontece nesse limite de temperatura [35], pode ser atribuída essa taxa de perda de massa à água adsorvida ou traços de voláteis existentes [39], ficando as perdas acima dessa temperatura explicadas pelas demais decomposições gasosas [40].

4.3 Permeabilidade dos compósitos

Conforme se adicionou a CG, o percentual de absorção sofreu alterações, em geral com desvios acentuados para CG-5, inclusive o coeficiente de variação apresentando maior variabilidade (CG-5 e CG-10, respectivamente, 61% maior e 12% menor que a mistura CG-0). Já para capilaridade, a CG a 5% causou um aumento significativo na variabilidade das médias. Curiosamente, este coeficiente reduziu para menos da metade (6,89%) em CG-10, quando foi dobrado o percentual da adição. Esta redução pode ter ocorrido devido à otimização da densidade de empacotamento proporcionada pela adição de cinzas [12]. Nas conclusões de REIS [35] também foi relatado que o elevado teor de CG parece criar maiores dimensões de poros, sugerindo intertravamentos, devido à forma lamelar e alongada dos grãos. Ainda, nos estudos de SILVA *et al* [1] foram avaliados teores de cinzas de biomassa como aglomerante a 5%, mostrando aumento na absorção de água, com manutenção das propriedades mecânicas. ALCÂNTARA [44] relatou que o material fino pode influenciar a absorção, e verificou que esta caiu para cerca de 3% em média, quando as cinzas foram aplicadas em teor de 35% em relação à massa do cimento.

ŠTIRMER *et al* [36] relataram que, testes de permeabilidade em concretos com conteúdos de 5%, 10% e 15% de cinzas de madeira, apresentaram melhores resultados com 10%, em relação à referência (sem as cinzas), porém observaram que houve alguma deterioração do material após 90 dias, permitindo a penetração a mais de água nas misturas com 5% e 15%. Isso sinaliza uma queda de durabilidade para o material, em idades avançadas.

4.4 Desempenho físico-mecânico dos compósitos

As resistências mecânicas, embora tenham se mantido próximas à referência, mostraram indícios de alterações estruturais. Não houve variabilidade significativa na amplitude geral dos dados de resistência à compressão axial, porém os valores às vezes concentram-se acima (CG-5, mediana 36,55 MPa) ou abaixo da mediana (CG-10, mediana 38,60 MPa), conforme são alterados os teores de CG. Já na compressão diametral, os valores de resistência à tração se concentram em um intervalo bem menor para CG-5 do que para CG-10. Em ambos os casos, as resistências decrescem para CG-5 e aumentam para CG-10 apenas na tração, permanecendo equiparadas à referência na compressão axial, seguindo o relato da literatura que apresenta tendências à queda do desempenho, conforme se incrementam as adições de cinzas [14]. Todavia, o melhor desempenho pela redução de vazios e resistência mecânica parece estar otimizado ao nível de CG-10, uma vez que o aumento do teor de material fino melhora a compacidade e a atividade pozolânica [24].

O espalhamento dos dados no desempenho mecânico pode ter sido ocasionado por uma micro segregação surgida durante a mistura dos materiais, embora na análise visual, em estado fresco, a argamassa não tenha mostrado perda de trabalhabilidade, com os teores dos materiais adotados nesta pesquisa. No entanto, como assinala SILVA *et al* [1], a forma irregular dos grãos de cinzas pode trazer dificuldades na preparação da argamassa; consequentemente, pode levar a defeitos estruturais.

As resistências seguem tendências semelhantes para compressão e tração, reduzindo em ambas para o compósito CG-5. Comportamento semelhante foi observado [12], para teores próximos dos valores aqui uti-

lizados onde, para os teores equivalentes a 10% de adição, foi alcançada resistência à compressão média de 35 MPa.

Em idades iniciais (até os 28 dias) os materiais não apresentaram sinais de degradação físico-mecânica (fissuras, esfarelamento) significativa. A massa específica aparente mostrou valores em torno de $2,0 \text{ g/cm}^3$, com desvios não significativos, o que leva a considerar uma estabilização na densidade. Estes valores estão bem próximos aos alcançados por ALCÂNTARA [44] com cinzas de casca de arroz e de outras observações [14, 1], possivelmente devido à reduzida massa específica das cinzas, no entanto não houve diferenças consideráveis entre os compósitos. Já a massa específica real (excluindo-se o volume de vazios) resultou em valores em torno de $2,45 \text{ g/cm}^3$, sem variação significativa, para os três compósitos.

4.5 Tempos de pega das misturas

Com a inclusão das frações de CG os tempos de pega sofreram alterações negativas. Os testes mostraram que o teor de adição influencia diretamente, retardando significativamente o processo de reações na presença das CG, especialmente frente às possíveis frações de material mal queimado ou não queimado, pois entre $200 \text{ }^\circ\text{C}$ e $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ainda permanecem ácidos e extrativos [30] que podem inibir a hidratação dos compostos cimentícios. Esse retardo no tempo de hidratação foi observado em outras experiências com cinzas de biomassa, com aumento do tempo de pega relacionado à quantidade da adição e também ao diâmetro dos grãos [3].

4.6 Perda ao fogo

A calcinação dos compósitos a $950 \text{ }^\circ\text{C}$ revelou perda máxima de 14,71%. Para CG-5, o índice de 3,60%, menor entre os três testes, pode estar revelando uma combinação físico-química entre cinza-cimento, uma vez que, devido à finura dos aglomerantes utilizados ($75 \text{ }\mu\text{m}$), há uma suscetibilidade a reações, dado que parte das adições possui atividade pozolânica comprovada [12, 25]. Mas, ao incrementar o percentual de CG para 10%, cresceu também o teor de matéria não queimada, possivelmente interferindo nas reações químicas de pega. CHAUNALI *et al* [45] relatam que, para se obter a fase sílico-aluminosa mais reativa da cinza de biomassa é necessário remover, por calcinação, o material não queimado.

Como já mencionado (2.1), sendo os resíduos de espécies mistas, implica que cada espécie possui ponto de decomposição térmica diferente [43], o que ajuda a explicar a presença da matéria orgânica não queimada. Cabe ressaltar ainda que as CG, como utilizadas neste estudo, são geradas em temperatura máxima de $\sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ [32]. Diferentemente desse contexto, quando há controle tecnológico (automatizado) que permita o aquecimento monitorado, pode-se reduzir a taxa de PF, gerando resíduos com menores taxas de material orgânico [14].

5. CONCLUSÕES

Este artigo analisou o desempenho de argamassas cimentícia contendo adições de CG de biomassa oriunda de resíduos de carvão vegetal amazônico. Foram analisadas adições em 5% e 10%, substituindo igual percentual de massas do cimento e os efeitos na porosidade e nível de absorção de água, que influem diretamente na durabilidade, mas também na resistência mecânica do material produzido.

Os resultados obtidos permitiram as seguintes conclusões:

- a. As cinzas do tipo CG parece causar instabilidade estrutural nos compósitos cimentícios, levando ao aumento da variabilidade do desempenho mecânico, porém há aumento da ação adesiva do aglomerante, implicando melhores médias em relação aos esforços de tração.
- b. As cinzas em CG-5 aumentam o nível de absorção de água total e por ascensão capilar, com alto coeficiente de variação; o desempenho mecânico geral também ficou reduzido em CG-5. Isso pode ser resultado de micro segregação dos materiais, devido fator de empacotamento incompatível, fazendo ocorrer “ninhos” na estrutura.
- c. As cinzas provocam aumento no tempo de pega do cimento, chegando a 35,2% a mais em relação à CG-0, o que requer rigoroso controle da cura nas idades iniciais;
- d. Como matéria prima e no compósito cimentício endurecido, as cinzas apresentaram perda de massa de 34% e 14%, respectivamente, quando submetidas a variação de temperatura, indicando alto teor de material não queimado, o que tende a prejudicar a durabilidade a partir das idades avançadas; até 10% de adição a massa específica não apresentou variações importantes entre as misturas;
- e. Nas condições de ensaios e com os materiais utilizados a substituição de cimento por cinzas de carvão a 10% apresentou melhor desempenho geral.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte com pessoal técnico e equipamentos dos Laboratórios de Materiais da Faculdade de Rondônia-FARO, e ao LCVMat-UNISINOS, pelas caracterizações de amostras de materiais, utilizados neste trabalho. Ao engenheiro florestal Álvaro M. Amaral e técnicos pela colaboração na identificação e coleta das matérias primas. Ao CNPq pela Bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora da Feliciane Andrade Brehm, processo nº 313323/2019-4.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] SILVA, R.B., FONTES, C.M.A., LIMA, P.R.L. *et al.* “Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento”. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212015000400053>. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 15, n. 4, pp. 321-334, out./dez. 2015
- [2] CHOWDHURY, S., MIHIR M., SUGANYA, O.M. “The Incorporation Of Wood Waste Ash As A Partial Cement Replacement Material For Making Structural Grade Concrete: An Overview”. *Ain Shams Engineering Journal* 6, pp. 429-437. 2015.
- [3] ZHONGPING, W., LI, H., JIANG, Z., *et al.* “Properties Of Bamboo Charcoal And Cement-Based Composite Materials And Their Microstructure”. <http://dx.doi.org/DOI.10.1007/s11595-017-1755-y>. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* V. 32. N. 6, 2017.
- [4] BRITO, J.O.. “Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira”. Escola Superior De Agricultura “LUIZ DE QUEIROZ”, Universidade De São Paulo, Departamento de Ciências Florestais. *Documentos Florestais*, Piracicaba, v.9, pp. 1-19, mai. 1990.
- [5] PROTÁSIO, T.P., NEVES, T.A., REIS, A.A. *et al.* “Efeito Da Idade E Clone Na Qualidade Da Madeira De Eucalyptus Spp Visando À Produção De Bioenergia”. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 24, n. 2, pp. 465-477, abr.-jun., 2014.
- [6] COSENTINO, I., RESTUCCIA, L., FERRO, G.A. *et al.* “Influence of pyrolysis parameters on the efficiency of the biochar as nanoparticles into cement-based composites”. *Procedia Structural Integrity* v. 13, pp. 2132–2136, 2018.
- [7] ALNAHAL, M.F., ALENGARAM, U.J., JUMAAT, M.Z. *et al.* “Assessment on engineering properties and CO2 emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement”. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.292>. *Journal of Cleaner Production* v. 203, pp. 822-835. 2018.
- [8] BENITES, V.M., TEIXEIRA, W.G., REZENDE, M.E. *et al.* “Utilização De Carvão E Subprodutos Da Carbonização Vegetal Na Agricultura: Aprendendo Com As Terras Pretas De Índio”. Disponível em: <http://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=684576&biblioteca=vazio&busca=684576&qf=acets=684576&sort=&pagina=1> . Acesso em: 24/08/2019.
- [9] CANDAMANO, S., DE LUCA, P., FRONTERA, P., *et al.* “Production Of Geopolymeric Mortars Containing Forest Biomass Ash As Partial Replacement Of Metakaolin”. <http://dx.doi.org/10.3390/environments4040074>. *Environments*, v. 4, p. 74, 2017.
- [10] CHOWDHURY, S., MANIAR, A., SUGANYA, O.M. “Strength Development In Concrete With Wood Ash Blended Cement And Use Of Soft Computing Models To Predict Strength Parameters”. *Journal of Advanced Research*, v.6, pp. 907-913. 2015,
- [11] SALVO, M., RIZZO, S., CALDIROLA, *et al.* “Biomass Ash As Supplementary Cementitious Material (SCM)”. *Advances in Applied Ceramics*, <http://dx.doi.org/10.1179/1743676115Y.0000000043>. 2015. 114:sup1, S3-S10,
- [12] UKRAINCZYK, N., VRBOS, N., KOENDERSA, E.A.B. “REUSE OF WOODY BIOMASS ASH WASTE IN CEMENTITIOUS MATERIALS”. <https://doi.org/10.15255/CABEQ>, 2016. *Chem. Biochem. Eng. Q.*, v. 30, n. 2, pp. 137- 148, 2016.
- [13] FAVA, G., NAIK, T.R., PIERPAOLI, M. “Compressive Strength And Leaching Behavior Of Mortars With Biomass Ash”. <http://dx.doi.org/10.3390/recycling3030046>. *Recycling* 2018, n. 3, v. 46, 2018.
- [14] CHEAH, C.B.; RAMLI, M.. “Mechanical Strength, Durability And Drying Shrinkage Of Structural Mortar Containing Hcwa As Partial Replacement Of Cement”. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.009>. *Construction and Building Materials*, v. 30, pp. 320-329, 2012.
- [15] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 26: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro ABNT, 10p , 2001.

- [16] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 8p., 2003.
- [17] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: *Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro ABNT, 9p., 2009.
- [18] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776: *Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman*. Rio de Janeiro ABNT, 3p., 1988.
- [19] RIBEIRO, U.G., VASCONCELOS, R.P. “Estudo De Propriedades Térmicas E Mecânicas De Compósitos Cimentícios Produzidos Com Resíduos Da Indústria Madeireira De Porto Velho”. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0575>, e12241, *Matéria* (Rio J.), Rio de Janeiro , v. 23, n. 4, 2018 .
- [20] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 65: *Cimento Portland - Determinação do tempo de pega*. Rio de Janeiro: ABNT, 4p., 2003.
- [21] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 43: *Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal*. Rio de Janeiro: ABNT, 8p., 2003.
- [22] MOREIRA, D.F. “Análise Da Produtividade Na Execução Associada A Diferentes Sistemas De Alvenaria”. Dissertação (Mestrado em engenharia civil - construções), Faculdade De Engenharia Da Universidade Do Porto , Porto, Portugal. 2014.
- [23] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: *Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)*. Rio de Janeiro ABNT, 4p., 2013.
- [24] LOPES, B.C.S., BRITO, A.F.S., SARMENTO, A.P., *et al.* “Análise Da Viabilidade Da Utilização Da Cinza De Bagaço De Cana-De-Açúcar Como Substituição Parcial Do Cimento Portland”. <http://dx.doi.org/10.5216/reec.V9i3.32023>. 2014. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*. V. 9, n. 3, pp. 32-40. 2014.
- [25] MEMON, S.A., WAHID, I., KHAN, M.K., *et al.* “Environmentally Friendly Utilization Of Wheat Straw Ash In Cement-Based Composites”. <http://dx.doi.org/10.3390/su10051322>. *Sustainability*, v. 10, p. 1322, 2018.
- [26] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: *Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão*. Rio de Janeiro: ABNT, 8p., 1996.
- [27] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779: *Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro: ABNT, 2p., 1995.
- [28] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778:2005 *Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro ABNT, 4p., 2005.
- [29] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: *Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro ABNT, 5p., 2011.
- [30] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: *Argamassas e concretos endurecidos - Concreto - Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro ABNT, 9p., 2007.
- [31] LEAL, T.E. “Produção De Energia Elétrica Através De Gases Provenientes Da Madeira Com Micro-Ondas”. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal De Ouro Preto , Ouro Preto, Brasil. 2015.
- [32] OLIVEIRA, A.C. “Sistema Forno-Fornalha Para Produção De Carvão Vegetal”. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, Brasil, 2012.
- [33] KALEMBKIEWICZ, J., GALAS, D., SITARZ-PALCZAK, E. “The Physicochemical Properties And Composition Of Biomass Ash And Evaluating Directions Of Its Applications”. *Pol. J. Environ. Stud.* v. 27, n. 6, pp. 2593-2603, 2018.
- [34] ABIFA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. CEMP 120: *Materiais para fundição - determinação da perda ao fogo*. São Paulo, ABIFA, 2p., 2015.
- [35] REIS, M.C. “Incorporação De Resíduos De Carvão Vegetal Em Argamassas Cimentícias”. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, Brasil, 2019.
- [36] ŠTIRMER N., BANJAD, P.I., CAREVIĆ, I., *et al.* “Durability Properties Of Cement Composites With Wood Biomass Ash”. August 2018. In: *4th International Conference of Service Life Design for Infrastruc-*

tures (SLD4), pp. 27-30 August 2018, RILEM WEEK 2018, Delft, Netherlands, 2018.

[37] MARQUES, M.G.S. Estudo das propriedades físicas e mecânicas e da durabilidade de compósitos cimentícios reforçados com fibra amazônica. Tese de D.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, 2015.

[38] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro ABNT, 5p., 2012.

[39] FERNANDES, I.J. “Desenvolvimento E Caracterização De Compósitos De Cinza De Casca De Arroz Em Matriz Epóxi”. Dissertação (mestrado) – Universidade do Rio do Vale dos Sinos. São Leopoldo, RS, Brasil, 2015.

[40] GUAN, G., KAEWPANHA, M., HAO, X. *et al.* “Catalytic Steam Reforming Of Biomass Tar: Prospects And Challenges”. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.316>. 2016. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. V. 58, pp. 450-461, 2016.

[41] ARNOLD, S., MOSS, K., HENKEL, M., *et al.* “Biotechnological Perspectives Of Pyrolysis Oil For A Bio-Based Economy”. *Trends in Biotechnology*, v. 35, N. 10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.06.003>. Oct. 2017.

[42] SILVA, F.T. M., ATAÍDE, C.H. “Valorization Of Eucalyptus Urograndis Wood Via Carbonization: Product Yields And Characterization”. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.159>. *Energy* v. 172, pp. 509-516. 2019.

[43] BRAND, M.A., BARNASKY, R.R.S., *et al.* “Thermogravimetric Analysis For Characterization Of The Pellets Produced With Different Forest And Agricultural Residues”. e20180271, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20180271>. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.48, n. 11, 2018.

[44] ALCÂNTARA, M.A.M., MELLO, A.B.A., ALBUQUERQUE, M.C.F. “A Influência Potencial das cinzas de casca de arroz em argamassas auto adensáveis: casos da resistência mecânica e da absorção d’água”. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0487>. *Revista Matéria*, v.23, n.3, 2018. 2018.

[45] CHAUNSALI, P., UVEGI, H., OSMUNDSEN, R., *et al.* “Mineralogical And Microstructural Characterization Of Biomass Ash Binder”. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.02.011>. *Cement and Concrete Composites*. February 2018. 2018.

ORCID

Umberto Gonçalves Ribeiro	https://orcid.org/0000-0001-9444-745X
Claiton De Oliveira Souza	https://orcid.org/0000-0002-6520-507X
Atilio Efrain Bica Grondona	https://orcid.org/0000-0002-5455-5402
Andrea Parisi Kern	https://orcid.org/0000-0001-6406-6250
Feliciane Andrade Brehm	https://orcid.org/0000-0002-3272-5837