

Artigos

Formulação de massa cerâmica para revestimento poroso utilizando resíduos de madeiras tropicais

Formulation ceramic mass for porous coating, using tropical wood wastes

Germana de Vasconcelos Duarte^I , Paulo de Tarso Barbosa Sampaio^{II} ,
Ruy Alexandre de Sá Ribeiro^{III} , Jose Josimar Soares^{IV} ,
Rannier Marques Mendonça^I 

^IUniversidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, Brasil

^{II}Universidade do Estado do Amazonas; Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, AM, Brasil

^{III}Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, AM, Brasil

^{IV}Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, AM, Brasil

RESUMO

Os resíduos de pó das madeiras tropicais Angelim rajado (AR) (*Pithecelobium racemosum* Ducke) e Sucupira vermelha (SV) (*Andira parviflora* Ducke) gerados na indústria madeireira em Itacoatiara – AM quando não são utilizados pela própria empresa para geração de energia são depositados em locais inadequados. Em vista disso, neste trabalho, a argila foi parcialmente substituída pelos referidos resíduos na fabricação de materiais cerâmicos para o desenvolvimento de um novo material para aplicação em revestimento de parede (azulejo) poroso (tipo BIII). Este novo produto pode ser uma alternativa sustentável para o Polo Cerâmico do município de Iranduba, estado do Amazonas, Brasil. Corpos de prova (60mm x 20mm x 8mm) foram conformados por prensagem uniaxial (20 MPa) secos a 110°C por 24h e queimados entre 750 e 850°C. Os efeitos do processo de sinterização nas massas cerâmicas com os resíduos de madeiras SV e AR foram estudados por TGA-DSC, FRX e DRX. Após a queima, as amostras foram submetidas às seguintes caracterizações tecnológicas: absorção de água, retração linear, densidade aparente, porosidade aparente e módulo de ruptura à flexão. As características mineralógicas e microestruturais também foram analisadas. Os resultados evidenciam que até 10% dos resíduos das madeiras AR e SV em forma de pó podem ser incorporados em massas cerâmicas estruturais para produção de materiais cerâmicos. Entretanto, formulações com 5 e 10% do resíduo de SV apresentam resultados superiores às mesmas proporções com AR, atendendo aos parâmetros da NBR 13818 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Palavras-chave: Resíduos de madeiras tropicais; Materiais cerâmicos; Propriedades tecnológicas; Alternativa sustentável

ABSTRACT

The powder wastes of tropical wood Angelim Rajado (AR) (*Pithecelobium racemosum* Ducke) and Sucupira Vermelha (SV) (*Andira parviflora* Ducke), generated in the wood industry in Itacoatiara – Amazonas state, Brazil are usually deposited in inappropriate places. In this work, clay was partially replaced by wastes in the manufacture of ceramic materials to development of a new material for application in porous wall covering (tile) (BIII type), as a sustainable alternative for the Ceramic Pole of the municipality of Iranduba – AM. Specimens (60mm x 20mm x 8mm) were formed by uniaxial pressing (20 MPa) dried at 110°C per 24h and fired at 750 and 850°C. The effects of the sintering process on ceramic masses with SV and AR wood wastes were studied by TGA-DSC, XRF (X-Ray Fluorescence) and XRD (X-Ray Diffractometer). After firing, the samples were subjected to the following technological characterizations: water absorption, linear retraction, apparent density, apparent porosity, and modulus of rupture at flexure. The mineralogical and microstructural characteristics were also analyzed. The results show that up to 10% of AR and SV wood wastes in powder form can be incorporated into structural ceramic masses for the production of ceramic materials. However, formulations with 5 and 10% of the SV waste present superior results at the same proportions with AR, being in agreement with the parameters of NBR 13818 (Brazilian Technical Regulation Association).

Keywords: Tropical wood wastes; Ceramic materials; Technological properties; Sustainable alternative

1 INTRODUÇÃO

A Capital do Amazonas, Manaus, situada no coração da floresta, é a principal consumidora de produtos cerâmicos, como tijolos, blocos e telhas, produzidos nos municípios de Iranduba e Manacapuru, que formam o Polo Cerâmico do Estado, com 32 olarias. Segundo o que Rodrigues *et al.* (2015) apresentam, as áreas que ficam situadas nas regiões de planícies de inundação dos Rio Negro e Rio Solimões são favoráveis à exploração das argilas. A grande maioria das empresas trabalham de forma empírica, utilizando a experiência de seus produtores, sem obter nenhum controle de qualidade quanto aos processos utilizados, gerando, muitas vezes, produtos mal-acabados com problemas dimensionais e utilizando, para queima, fornos a lenha sem nenhum controle de temperatura, ocasionando uma série de problemas ambientais.

Discute-se neste artigo uma inovação tecnológica que é a adição de pó de serragem de resíduos de madeira originados do processamento mecânico da madeira produzidos em uma grande empresa florestal no município de Itacoatiara, estado do Amazonas, Brasil.

Esta empresa busca aliar tecnologia ao desenvolvimento sustentável, explorando as madeiras através de um plano de manejo e processando-as na própria indústria, sendo comercializadas no Brasil e no exterior nas formas serradas, semiacabadas ou mesmo transformadas em produtos acabados (CABETE; DACOL, 2009).

A possibilidade do desenvolvimento de um novo produto cerâmico, contendo em sua composição resíduos de madeira, mostra novas oportunidades de uso desses resíduos, gerados pelos processos produtivos. Independentemente da forma de como serão reutilizados, a inserção de resíduos gerados, em massas cerâmicas, proporcionará benefícios de ordem social, econômica e ambiental, indicando novas alternativas produtivas em consonância com os princípios da sustentabilidade (RODRIGUES *et al.*, 2021).

A sustentabilidade na construção civil está sendo amplamente discutida, seja como estratégia empresarial ou pela necessidade do uso inteligente de recursos naturais através das novas tecnologias empregadas (ROQUE; PIERRI, 2019). Souza *et al.* (2019) discutem sobre a importância da reutilização desses materiais residuais, visando minimizar impactos ambientais e melhoria da saúde coletiva. Principalmente quando se consideram as projeções de um aumento médio de 27,5 milhões de toneladas por ano na geração de resíduo mundial, faz-se necessário o seu reaproveitamento de forma sustentável (KAZA *et al.*, 2018).

Os recursos ambientais não são infinitos, sendo necessário observar princípios de sustentabilidade dos recursos utilizados para construir moradias e artefatos que atendam às necessidades humanas (ZHANG *et al.*, 2014). Para diminuir a demanda das matérias-primas naturais, as indústrias cerâmicas possuem grande potencial para utilizarem resíduos em suas formulações. A utilização de resíduos orgânicos ou inorgânicos na composição de novos produtos de cerâmica gera renda e contribui para diminuir a pressão de exploração de novos recursos naturais (HOSSAIN; ROY, 2020; ARTHUR; GIKUNOO; ZALNEZHAD, 2020).

Outros estudos, como a caracterização do uso de matérias-primas orgânicas e avaliação de suas características tecnológicas para a fabricação de tijolos, blocos e outros materiais para uso na construção civil, foram realizados ao longo dos últimos anos (ABJAGHOU *et al.*, 2020; ALMEIDA *et al.* 2020; BORIES *et al.*, 2015; GUZMAN, 2003; OKADA *et al.*, 2011; VELASCO *et al.*, 2015).

Para se produzir materiais cerâmicos porosos, é necessário caracterizar as matérias-primas que serão utilizadas quanto à sua granulometria, composição química, além da realização dos ensaios que irão analisar as propriedades tecnológicas, considerando-se que o não conhecimento desses estudos poderão comprometer a utilização, planejamento e o desenvolvimento de materiais cerâmicos.

Para fabricação de revestimentos cerâmicos, não existe uma matéria-prima única que apresente todas as características necessárias capazes de proporcionar uma formulação ótima, com boa estabilidade dimensional, resistência à flexão e absorção de água que atenda aos requisitos tecnológicos para fabricação de materiais cerâmicos. Portanto, a incorporação de resíduos de madeiras tropicais, na massa cerâmica, deverá qualificar a matéria-prima de base e resultar em um material que proporcione produtos com características tecnológicas que atendam à norma brasileira (NBR), neste caso NBR 13818 (ABNT, 1997).

A hipótese deste estudo considera a viabilidade técnica de aproveitar resíduos de madeiras tropicais certificadas na formulação de massas cerâmicas com o objetivo de substituir parcialmente a argila, visando-se melhorar suas propriedades tecnológicas, além de utilizar esses resíduos florestais da Amazônia, de processamento mecânico, na fabricação de revestimentos de parede classe BIII, como uma alternativa sustentável no desenvolvimento de novos produtos para a região.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizadas argilas do Polo Oleiro de Irandubacoletadas da jazida da Cerâmica Montemar, localizada nas coordenadas 03° 17' 06" de latitude sul

e 60° 11' 09" de longitude oeste. Escolheu essa empresa por ser uma que investe e acredita no desenvolvimento de produtos inovadores e sustentáveis. Os resíduos (pó de serragem) das duas espécies de madeiras tropicais, Angelim rajado (AR) (*Pithecelobium racemosum* Ducke) e Sucupira vermelha (SV) (*Andira parviflora* Ducke), originados do processamento mecânico da madeira, foram coletados no pátio de preparação das toras da empresa Mil Madeiras Preciosas Ltda., localizada na latitude 03°08'01.65" sul e a uma longitude 58°26'19.04" oeste, sendo ela a principal indústria de madeira certificada localizada na zona rural do município de Itacoatiara – AM

Para a formulação das massas cerâmicas, a argila foi extraída abaixo da camada vegetal até a profundidade de 3 m, identificada neste estudo como Argila (ARG-A). Foi empregado pó de serragem de madeira das espécies AR e SV coletado no pátio da indústria madeireira.

Para análise da argila, foram determinadas as seguintes características físicas: distribuição de tamanho das partículas primárias, distribuição de tamanho de grânulos (peneiramento), limite de liquidez, limite de plasticidade e massa específica real. A distribuição de tamanho das partículas primárias foi realizada num analisador de tamanho de partículas CILAS, modelo 920 L, utilizando-se como meio a água destilada, com tempo de dispersão de 60 segundos e detergente neutro como dispersante.

A distribuição de tamanho de grânulos, os limites de consistência de Atterberg, o limite de liquidez, o limite de plasticidade e a massa específica real dos grãos, utilizando-se o método de picnometria líquida, foram determinados segundo os procedimentos descritos nas normas NBR 6459 (ABNT, 1984a); NBR 6508 (ABNT, 1984b); NBR 7180 (ABNT, 1984c); NBR 7181 (ABNT, 1984d); NBR 13818 (ABNT, 1997).

As argilas, fornecidas na forma de torrões grosseiros, foram inicialmente deixadas ao ar livre em bandejas de alumínio para redução do teor de umidade por um período de aproximadamente uma semana, a fim de eliminar a umidade higroscópica

e facilitar o processo de redução granulométrica. A argila foi moída separadamente em moinho de bolas e passadas em peneira de 200 mesh (75 μm), de acordo com a norma NBR 13818 (ABNT, 1997), e seca em estufa a 110 °C por 24 horas. O mesmo procedimento foi feito com o pó de serragem das madeiras AR e SV, peneirado na peneira 100 mesh (149 μm) e seco separadamente em estufa a 110°C por 24 horas.

As caracterizações de composição química foram realizadas por meio de um espectrômetro de fluorescência de raios-X por dispersão de ondas (WD-XRF, Rigaku, Supermini), com tubo de paládio, tempo de exposição de 200 s e potência de 200 W. Para identificação das fases cristalinas após a queima, realizou-se ensaios de difratometria de raios-X num difratômetro SEIFERT, modelo URD 65, utilizando-se radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$), sob ângulo 2θ de 5° até 60°, passo de 0,05° e tempo por passo de 2 segundos.

As matérias-primas foram analisadas termicamente por Termogravimetria (TGA) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC). Para isso, foi utilizado um analisador térmico simultâneo, da TA Instruments, modelo SDT Q600, configurado para uma rampa térmica da temperatura ambiente até 1000 °C, a uma taxa de aquecimento de 20 °C por minutos, em uma atmosfera de nitrogênio, com fluxo de gás de 100 ml por minuto e fazendo-se uso de cadinhos de alumina. As análises desses dados foram realizadas no Software Universal Analysis 2000, da TA Instruments, versão 4.5^a.

As matérias-primas (argila pura e pó de serragem) foram homogeneizadas manualmente e umedecidas por aspersão a 8 % de umidade, separadas nas devidas proporções em massa e os torrões gerados nessa fase passados na peneira 40 mesh (420 μm). Em seguida, acondicionadas em sacos plásticos durante um período de 24 horas, na busca da melhor distribuição de umidade em toda a amostra. Preparou-se seis amostras para cada temperatura, totalizando 120 corpos de prova, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Formulações das massas cerâmicas (% em massa) com diferentes porcentagens dos resíduos de madeira das espécies angelim rajado (AR) e sucupira vermelha (SV)

Massas cerâmicas (%)	Argila A (%)	AR (%)	SV(%)	ARSV (%)	Quantitativo de amostras 750 °C - 850 °C	
ARG-A	100	0,00	0,00	0,00	6	6
AR 2,5	97,5	2,5	-	-	6	6
AR 5	95,0	5,0	-	-	6	6
AR 10	90,0	10,0	-	-	6	6
SV 2,5	97,5	-	2,5	-	6	6
SV 5	95,0	-	5,0	-	6	6
SV 10	90,0	-	10,0	-	6	6
ARSV 2,5	97,5	-	-	2,5	6	6
ARSV 5	95,0	-	-	5,0	6	6
ARSV 10	90,0	-	-	10,0	6	6

Fonte: Autores (2022)

Em que: ARG-A (Argila pura); AR (resíduo de Angelim Rajado); SV (resíduo de sucupira vermelha); ARSV (mistura dos dois resíduos em proporções iguais).

Todas as matérias-primas foram caracterizadas do ponto de vista químico, mineralógico e físico. Foi feita a dosagem das massas, por pesagem, e estas foram homogeneizadas e microgranuladas. Os aglomerados grossos, maiores que 2 μ m, foram eliminados do processo. Os corpos de prova foram compactados por prensagem uniaxial, em matriz de aço inoxidável retangular, com dimensões de aproximadamente 60 x 20 x 7,5 mm. O modelo da prensa hidráulica utilizada foi P3OST, marca BOVENAU, com capacidade de 30 toneladas. As amostras foram submetidas a uma carga de 3 toneladas, equivalente à pressão de compactação de 20 MPa, compatível com a pressão utilizada em peças industriais. A queima foi realizada em forno de queima lenta de laboratório, utilizando-se um ciclo de queima de aproximadamente 180 min e com temperaturas máximas de 750 e 850 °C. O ciclo térmico foi realizado à taxa de aquecimento de 100 °C para cada 15 min e tempo no patamar de queima de 2h. O resfriamento foi realizado dentro do próprio forno (MAITEC, modelo FSQC - 1300/3),

aguardando-se 24 horas para remoção das peças após o fim do ciclo térmico. Depois da sinterização, (def. "processo para a fabricação de produtos sólidos sintéticos usando aquecimento controlado de matérias-primas em pó"), as seguintes propriedades tecnológicas dos corpos cerâmicos foram determinadas: retração linear (RL), absorção de água (AA), tensão de ruptura à flexão (RF) (ensaio de carregamento em três pontos), porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA).

Para auxiliar a formulação das massas cerâmicas, diagramas triaxiais foram utilizados. Esses diagramas são bastante utilizados em formulações de materiais cerâmicos e na formulação de revestimentos porosos à base vermelha (PERALTA-SÁNCHEZ *et al.*, 2011), dos quais se podem extrair os óxidos que mais influenciam nas formulações. Fazem parte do diagrama o percentual de SiO_2 , o percentual de Al_2O_3 e, na terceira extremidade, o percentual referente aos metais alcalinos ($\text{Na}_2\text{O}_2 + \text{K}_2\text{O}_3$), alcalinos terrosos (CaO e MgO) e o Fe_2O , onde, quanto maior o conteúdo de argilominerais, conseqüentemente, maior será sua plasticidade. Após, a coleta e tabulação dos dados foram feitas em uma planilha do software Excel da MICROSOFT® OFFICE Excel 2016, as informações foram trabalhadas inicialmente com métodos de análise descritiva, com cálculo das frequências e medidas de posição (médias e Desvio-Padrão).

A estimativa do RF, RL e AA foi obtida através de um modelo linear generalizado. Utilizou-se para análise o programa *Statistical Package for Social Sciences* - SPSS 16.0 e R versão 3.6.1. Para todas as análises, foi fixado um nível de significância igual a 0,05 e um coeficiente de confiança de 95%. Onde entende-se Resistência à Flexão (RF); Retração Linear (RL) e Absorção de Água (AA).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análises físicas e químicas da argila verde e dos resíduos das madeiras

Os resultados dos índices físicos da argila apresentaram texturas variadas (Tabela 2). É através dos limites de consistência que se pode analisar as variáveis que melhor

expressam as condições de trabalhabilidade dos solos. A argila estudada apresentou um elevado conteúdo de partículas inferiores a $2\mu\text{m}$ (54,6%). Granulometrias finas favorecem a reatividade entre as partículas que desenvolvem elevadas superfícies específicas. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), a argila deste estudo foi classificada como Silte Argilosa por possuir um elevado teor de plasticidade. Também foi observado que o limite de liquidez ficou em torno de 67,0%, o limite de plasticidade 38,57% e o índice de plasticidade (IP) 22,43%. Os materiais que apresentam índice de plasticidade (IP) entre 1 e 7% são considerados fracamente plásticos; entre 7 e 15%, medianamente plásticos; e acima de 15%, altamente plásticos, o valor mínimo ideal para a produção cerâmica é de 15% (MAHMOUDI; SRASRA; ZARGOUNI, 2008). Essa classificação do valor do IP determina que a argila em estudo é altamente plástica. Logo, a argila está devidamente apropriada para ser utilizada para fabricação de materiais cerâmicos.

Tabela 2 – Distribuição de tamanho médio de partículas e limites de *Atterberg* (LL e PL) e índice de plasticidade PI das matérias-primas (n=6)

Amostra	Distribuição do tamanho de partícula (%)			Limites de Atterberg s (%)		
	Areia (%) $x > 20\mu\text{m}$	Silte (%) $2\mu\text{m} < x \leq 20\mu\text{m}$	Argila (%) $x \leq 2\mu\text{m}$	(LL %)	(PL %)	(PI %)
Argila (ARG-A)	16,3	29,1	54,6	67,00	38,57	28,43

Fonte: Autores (2022)

A argila padrão (ARG-A) e os resíduos de madeira analisados são essencialmente constituídos por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 (negligenciando-se neste estudo a porção orgânica constituída em sua maioria por celulose, não detectada pelo FRX). Observa-se que o percentual de óxido de silício (SiO_2) variou entre 13,50 e 59,92% e os teores de óxidos de alumínio (Al_2O_3), entre 9,90 e 28,36%. A argila (ARG-A) e o resíduo (AR) apresentaram teores de óxido de ferro (Fe_2O_3) entre 7,05 e 15,76%. O resíduo (SV) apresentou um teor de óxido de ferro de 41,97%, caracterizando-se como massa cerâmica vermelha (SILVA *et al.*, 2017), conforme a Tabela 3.

A sílica (Si) indica presença de argilominerais, tais como caulinita, illita e quartzo, observados no difratograma de raios-X (Figuras 2 e 3). Quanto aos teores de óxidos alcalinos (K_2O e Na_2O_2) e alcalinos terrosos (MgO e CaO), os valores encontrados na argila padrão (ARG-A) e no resíduo AR são considerados baixos se comparados com álcalis do resíduo da espécie SV. Estes álcalis são os principais responsáveis pelas formulações cerâmicas, já que atuam como materiais fundentes, contribuindo para o aumento da densidade e redução da absorção de água nas peças cerâmicas após a sinterização (ZANELLI *et al.*, 2019). Maiores teores de óxidos de potássio (K_2O) indicam a presença do argilomineral illita e feldspato (COUTINHO JR; CARVALHO; ZANARDO, 2013). Observa-se que o resíduo da madeira SV apresenta maiores teores desses óxidos em relação à argila ARG-A e aos resíduos da madeira AR.

Os óxidos fundentes (Fe_2O_3 , MgO, CaO e K_2O) foram observados em maiores teores nos resíduos das madeiras AR (18,77%) e SV (64,72%) se comparados aos valores observados na argila ARG-A (10,47%). Esses resíduos atuam como materiais fundentes, aumentando a densificação dos corpos de prova quando sinterizados. Estudos indicam que quanto maior a quantidade desses óxidos fundentes, mais eles atuam nas fases líquidas e contribuem para aumentar a densificação das peças, reduzindo a porosidade e, conseqüentemente, aumentando a resistência à flexão (SLIMANOU *et al.*, 2022).

As análises químicas indicam que a madeira SV, por apresentar maiores teores de óxidos fundentes (Fe_2O_3 , MgO, CaO e K_2O) em relação à madeira AR, é mais indicada para fabricação de material cerâmico.

Tabela 3 – Composição química das matérias-primas utilizadas (% mássico)

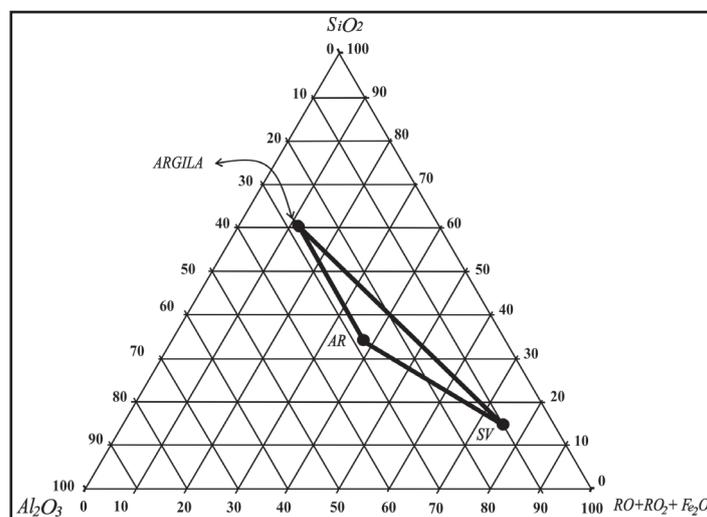
Amostras	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	TiO_2
Argila(ARG A)	59,92	27,92	7,05	0,22	2,35	0,08	0,69	1,62
(AR)	33,77	28,36	15,76	0,17	2,09	0,14	0,78	1,36
(SV)	13,50	9,90	41,95	4,51	10,74	9,51	2,52	0,01

Fonte: Autores (2022)

Em que: ARG – A (Argila pura); AR (resíduo de Angelim Rajado); SV (resíduo de sucupira vermelha); ARSV (mistura dos dois resíduos em proporções iguais).

O diagrama triaxial foi utilizado para otimizar as formulações cerâmicas, quanto aos percentuais em peso dos três componentes utilizados (Figura 1). Esse diagrama identifica os pontos referentes às matérias-primas dos óxidos principais (SiO_2 , Al_2O_3) e, na terceira extremidade, a soma dos óxidos alcalinos ($\text{Na}_2\text{O} + \text{KO}$), alcalinos terrosos ($\text{CaO} + \text{MgO}$) e o Fe_2O_3 . O resíduo da AR é constituído principalmente por SiO_2 e Al_2O_3 , enquanto o da SV é essencialmente constituído pelo Fe_2O_3 . A utilização desse método auxilia no planejamento da formulação de um produto com boa eficácia. O resultado da aplicação desse método indica que as melhores formulações são as que utilizaram o resíduo da Sucupira vermelha por apresentarem maiores teores de elementos fundentes, responsáveis pela densificação dos materiais cerâmicos, durante a sinterização, melhorando a propriedade tecnológica de resistência à flexão, contribuindo, assim, para fabricação de placas de revestimento de parede classe BIII.

Figura 1 – Diagrama triaxial para análise das formulações $\text{RO} + \text{R}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_3$



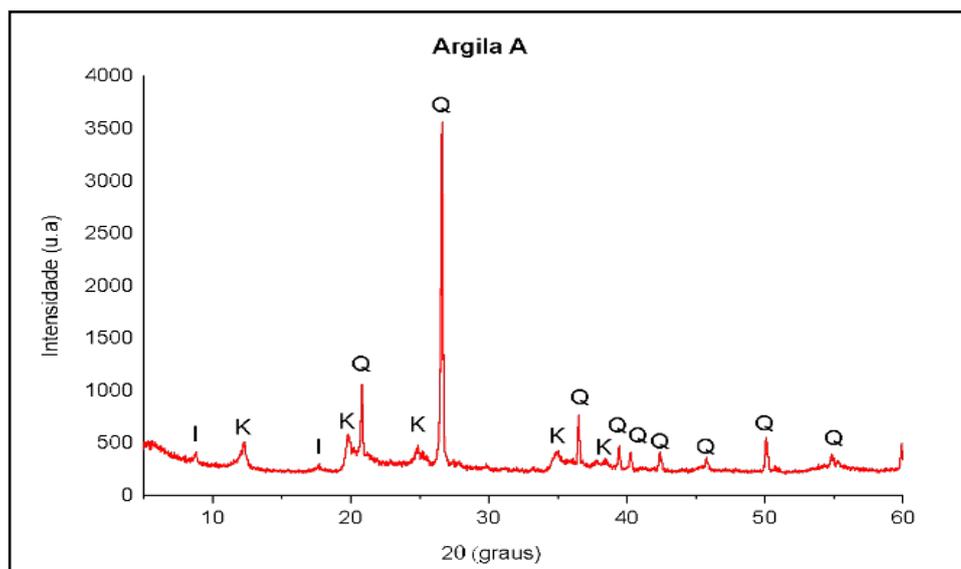
Fonte: Autores (2022)

3.2 Análises mineralógica de resíduos de argila (ARG-A) e serragens das madeiras in natura

O espectro de difração de raios-X da argila ARG-A (antes da sinterização) é apresentado na Figura 2. As fases minerais identificadas na matéria-prima foram

caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), quartzo (SiO_2) e illita ($(\text{K}_2\text{H}_3\text{O}) \text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$). Resultados estes similares aos observados por Rodrigues *et al.* (2015), que estudaram amostras da argila da mesma região de coleta deste estudo.

Figura 2 – Difratoograma de argila A



Fonte: Autores (2022)

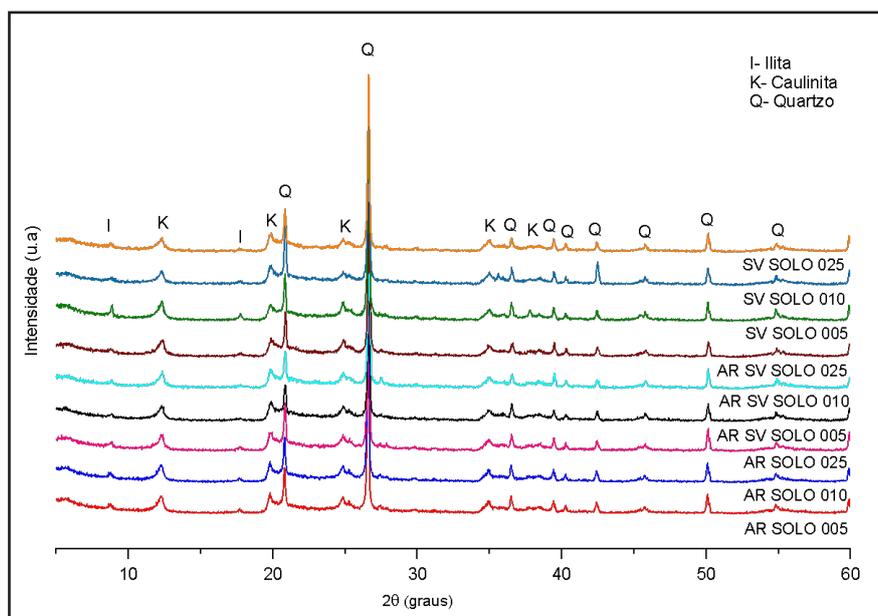
Em que: K = Caolinita; Q = Quartzo; I = Illita.

Com relação à fração dos resíduos de madeira presentes na amostra (Figura 3), pode-se verificar que os picos, referentes aos materiais orgânicos, não foram observados, sendo predominantes, apenas, as fases em função da fração de argila. Atribui-se esse resultado ao equipamento utilizado, que não faz leitura de material amorfo. De acordo com Almeida *et al.* (2020), difratogramas característicos desses tipos de amostras apresentam picos referentes à celulose, sendo este o principal componente das madeiras, apresentando picos no ângulo de difração 2θ em 23° , 21° , 17° e 15° (ALMEIDA *et al.*, 2020).

Os difratogramas das formulações de massas analisadas indicam um padrão de similaridade com pequenas variações na intensidade dos picos na adição de serragem de eucalipto em misturas para a produção de tijolos maciços (MORI; COVEZZI; MORI,

2011). Nos resultados das análises de difração de raios-x (DRX) para as misturas de argila e serragem, identificaram-se, na argila, basicamente as fases minerais caulinita e quartzo. Segundo o que esses pesquisadores explicam, a presença de quartzo nas amostras pode causar a redução da plasticidade da argila, fazendo com que esta apresente baixa retração linear quando submetida a altas temperaturas, já que esse mineral é o responsável pela contração das peças cerâmicas durante a secagem.

Figura 3 – Difratograma de massas formulado para revestimento poroso com argila e resíduo de serragem em três diferentes proporções: 2,5%, 5% e 10% em peso à temperatura ambiente

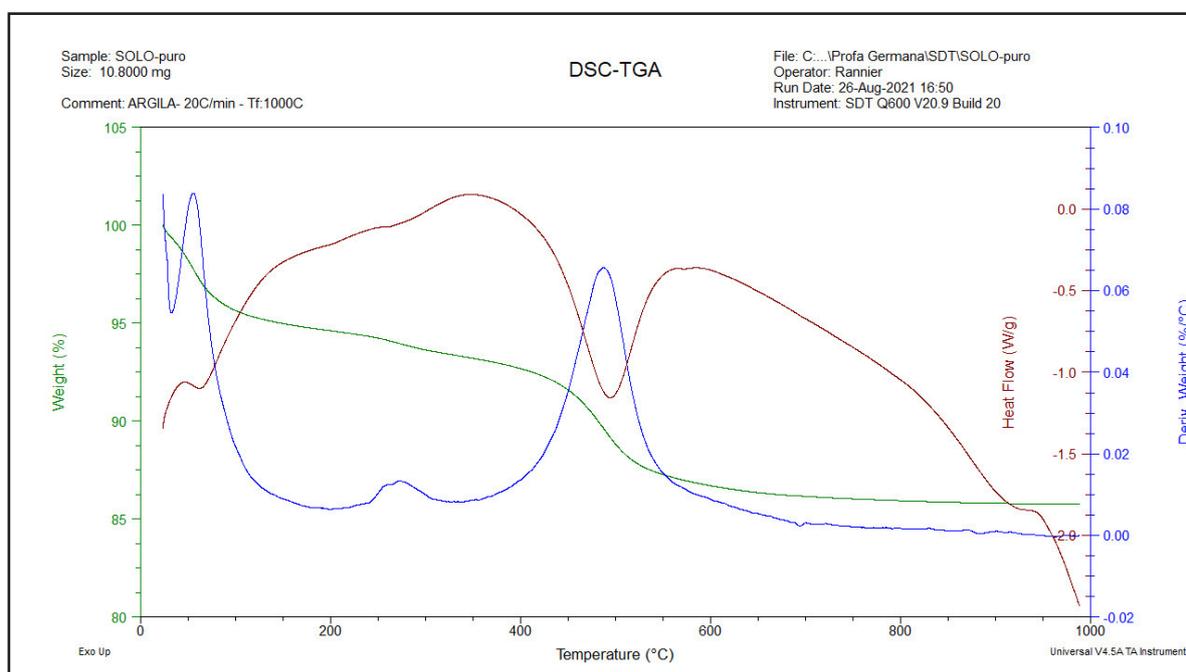


Fonte: Autores (2022)

As curvas resultantes das análises termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) dos resíduos de argila ARG-A e serragem AR e SV, respectivamente (Figura 4 e 5). A taxa de aquecimento de 7°C por minuto e aquecimento até a temperatura final de 850°C foi utilizada para avaliar a estabilidade térmica e as diferentes decomposições, além de verificar o comportamento cinético das reações causadas pelo aquecimento das matérias-primas. A argila ARG-A apresentou um pico exotérmico a 46°C, que representa a evaporação da água

livre existente entre as partículas (Figura 4). Na temperatura de 495°C, observou-se um pico endotérmico resultante da decomposição da água estrutural, ou seja, a desidroxilação dos argilominerais da caulinita e da illita. Em aproximadamente 593°C, foi verificado um pico exotérmico atribuído à transição do quartzo da fase α para a fase β (GENG; SUN, 2018).

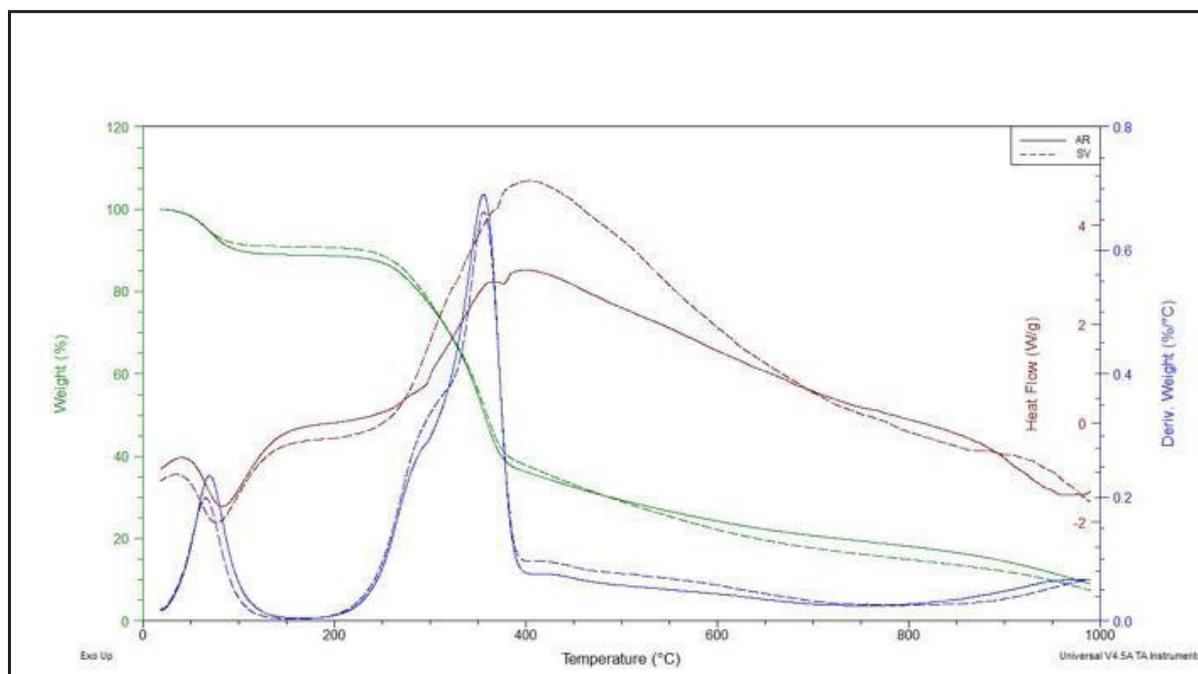
Figura 4 – Análise termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) da Argila (ARG)



Fonte: Autores (2022)

Os resíduos AR e SV apresentaram comportamento térmico semelhante (Figura 5), com duas perdas de massa acentuadas, assim como o número de resíduos ao final do ensaio. As duas principais regiões de perdas de massa observadas foram nos intervalos das temperaturas 69,34°C - 355,67°C e 420°C - 990°C. Estão relacionadas à perda de água e compostos orgânicos voláteis com baixo ponto de ebulição (primeira etapa) e à degradação térmica dos componentes da biomassa (segunda etapa), sendo esta atribuída à degradação da hemicelulose. Resultados similares foram observados por Vanusa *et al.* (2020).

Figura 5 –Análise termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) dos Resíduos AR e SV



Fonte: Autores (2022)

Verifica-se que a partir de 700°C houve estabilização da curva de temperatura com relação ao comportamento cinético da argila e dos componentes residuais (AR e SV), indicando estabilidade dessas matérias-primas, não havendo perda de massa com relação ao aumento da temperatura após a transformação da caulinita para metacaulim, que ocorre entre as temperaturas de 700°C a 900°C (MAGLIANO; PANDOLFELLI, 2010). Resultado este que corroborou a decisão de iniciar os ensaios nas temperaturas de 750°C e 850°C.

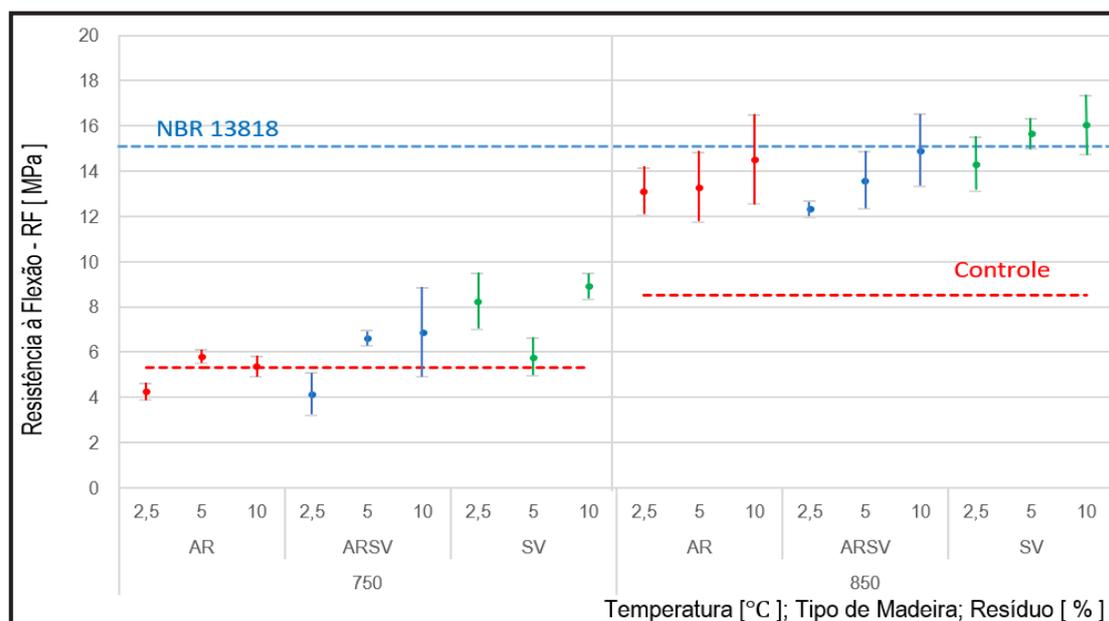
A fase do metacaulim é objeto de estudo particular desta pesquisa, pois seu estudo demonstra possíveis viabilidades de desenvolvimento de formulações cerâmicas com baixo consumo de energia.

3.3 Análises das características tecnológicas das formulações de massa cerâmica após a queima

3.3.1 Resistência à Flexão (RF)

Os resultados demonstram que o aumento da temperatura de queima aumentou a resistência mecânica dos corpos formulados (Figura 6). Estudos indicam que a incorporação de resíduos influencia as propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos (SERAFINI; CARVALHO; FIGUEIREDO, 2018). Corpos cerâmicos com resistência mecânica elevada indicam que os vazios provocados pela queima foram eliminados com a elevação da temperatura e coalescência desses corpos (CONTRERAS *et al.*, 2020).

Figura 6 – Resistência à Flexão (RF) em função da temperatura de Queima e formulação das massas cerâmicas



Fonte: Autores (2022)

Em que: Angelin rajado (AR); Sucupira vermelha (SV); 50% angelin rajado + 50% sucupira vermelha (ARSV).

Os limites de tensão de ruptura para revestimento de parede tipo BIII deve ser ≥ 15 Mpa, para corpos de prova com espessura $\geq 7,5$ mm (ABNT, 1997). Na Figura 6, observou-se que, na temperatura de 850 °C, todas as formulações com o resíduo SV em peso de 2,5, 5 e 10% obtiveram valores superiores quando comparados aos da argila padrão ARG-A, comprovando que esses resíduos proporcionaram melhoria na qualidade da argila pelo alto teor de materiais fundentes existentes nos resíduos (AR e SV).

Quanto à utilização dessas formulações para uso em fabricação de revestimento cerâmico de parede (BIII), as amostras de massas, contendo 5 e 10% de peso do resíduo SV e sinterizadas na temperatura de 850 °C, mantiveram-se dentro dos padrões mínimos exigidos para o cumprimento da NBR 13818 (ABNT, 1997).

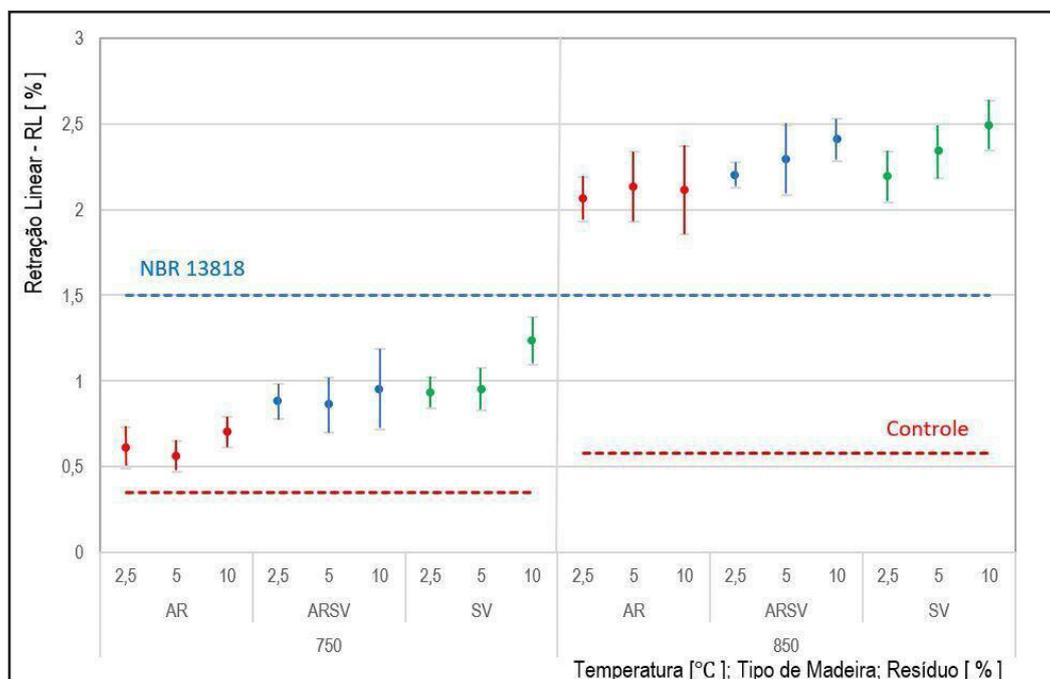
3.3.2 Retração Linear (RL) e Absorção de Água (AA)

A retração linear dos corpos de prova aumentou com a elevação da temperatura (Figura 7), comprovando a relação entre retração linear (RL) e temperatura de queima, semelhante ao resultado evidenciado por outros estudos, a exemplo do que foi realizado por Almeida *et al.* (2020). O aumento da retração linear em todas as composições dos corpos de prova deu-se pelo aumento do teor do resíduo e a relação deste com o aumento da temperatura. Corpos cerâmicos sinterizados na temperatura de 850°C apresentaram índices de retração linear aceitáveis, estando próximos ao limite recomendável pela NBR 13818 (ABNT, 1997) para produtos de revestimentos cerâmicos de parede (classe BIII). O maior valor de retração ocorreu na composição SV 10% (2,5%) e o menor valor na composição AR 2,5% (2,1%), ambos na temperatura de 850°C.

A absorção de água (AA), para as formulações cerâmicas analisadas para os valores de AA reduziram com o aumento de temperatura em cada composição (Figura

8). A porosidade aparente cresceu quando se aumentou a quantidade de resíduo (AR e SV) e diminuiu com o aumento da temperatura devido à transformação da fase líquida e à coalescência dos poros. Ademais, a temperatura de queima influencia muito a estrutura e está intimamente ligada ao desempenho final do material cerâmico (MAGLIANO; PANDOLFELLI, 2010). Acima de 700 °C, os óxidos fundentes (compostos por potássio, ferro e sódio) formam um líquido de temperatura elevada, e estes se consolidam entre as partículas, densificando as peças. Entre 700 e 900 °C, ocorre o início da fusão dos álcalis e óxido de ferro. É a partir desse ponto que a resistência atinge um mínimo tolerável (DUTRA *et al.*, 2019), corroborando, assim, a ideia de que a temperatura de queima influencia muito a estrutura e está intimamente ligada ao desempenho final do material.

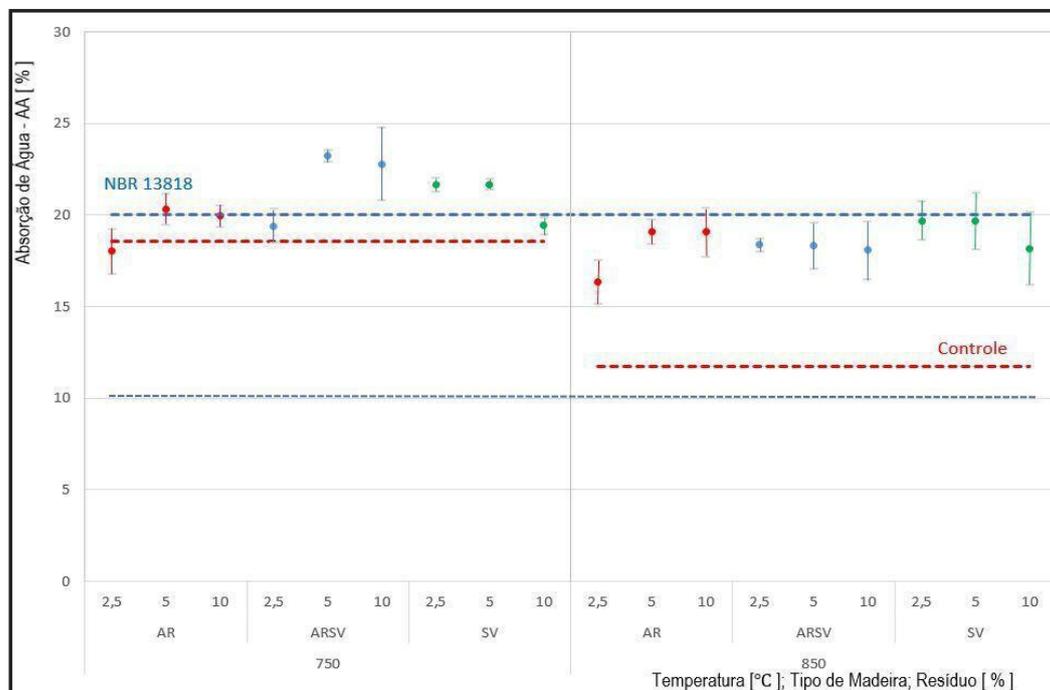
Figura 7 – Retração Linear (RL) em função da temperatura de queima formulações cerâmicas



Fonte: Autores (2022)

Em que: Angelim rajado (AR); Sucupira vermelha (SV); 50% angelim rajado + 50% sucupira vermelha (ARSV).

Figura 8 – Absorção de Água (AA) em função da temperatura de queima formulações cerâmicas



Fonte: Autores (2022)

Em que: Angelim rajado (AR); Sucupira vermelha (SV); 50% angelim rajado + 50% sucupira vermelha (ARSV).

Há viabilidade para fabricação de revestimento cerâmico de parede BIII; os corpos de prova com o resíduo SV, com 5% e 10% de peso de resíduo, obtiveram os melhores resultados, atendendo aos parâmetros da NBR 13818 (ABNT 1997), quanto à resistência à flexão (15,5 MPA; 16 MPA), absorção de água (18% ;17%) e aceitável retração linear (2,3%; 2,5%), em face às propriedades químicas e aos teores de materiais fundentes existentes nesse resíduo.

4 CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que as formulações de massa cerâmica que incorporaram 5% e 10% de peso de resíduo da madeira da espécie SV, queimadas a 850 °C, por conterem maiores teores de óxidos fundentes em relação ao resíduo

da madeira da espécie AR, apresentaram as melhores propriedades tecnológicas (RF, RL e AA), observando-se um acréscimo na média da RF de 97% em relação à argila pura (ARG-A), atendendo, assim, aos parâmetros da NBR 13818 (ABNT, 1997), para fabricação de revestimento cerâmico poroso de parede classe BIII.

Neste estudo, verificou-se a viabilidade técnica do desenvolvimento de produtos inovadores, incorporando resíduos naturais de serragem de madeira SV e AR em massas para a fabricação de revestimentos cerâmicos porosos. A utilização de resíduos da madeira contribuiu para reduzir o volume da argila a ser utilizado, quando incorporado às formulações em estado natural, proporcionando vantagens técnicas, econômicas e ambientais. Esses novos recursos abundantes podem ampliar a gama de aplicações em revestimentos cerâmicos porosos, contribuindo para a produção de materiais de construção sustentável na região Amazônica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Pavimentação - LABPAV/UFAM, ao Laboratório de Pesquisa e Ensaio de Combustíveis - LAPEC/UFAM, ao Laboratório de Laminação e Materiais Cerâmicos do LLMC/UFAM, ao Laboratório de Ensaio Físicos e Químicos de Materiais da UFAM, todos lotados na Universidade Federal do Amazonas. Agradecem ainda ao Laboratório do Temático de Microscopia e Nanotecnologia, vinculado a COPES, no Instituto Nacional de Pesquisas do Amazonas - INPA/AM, e ao Grupo Crowfoot de métodos de raio-X da Universidade do Estado do Amazonas-UEA, pelo apoio e realização, cedendo o corpo técnico e estrutura física dos laboratórios para realização dos experimentos.

REFERÊNCIAS

ABJAGHOU, H. *et al.* Incorporation of Wooden Furniture Wastes in Fired Clay Bricks for Improved Thermal Insulation: A Feasibility Study. **Waste and biomass valorization**, [S.l.], v. 11, n. 12, p. 6943-6951, Jan. 2020. DOI <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00933-6>

ALMEIDA, E. P. *et al.* Preparação de blocos porosos utilizando resíduos de MDF na formulação de massas cerâmicas estruturais. **Revista Matéria**, [S.l.], v. 25, n. 1, 2020. DOI <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0918>

ARTHUR, E. K.; GIKUNOO, E.; ZALNEZHAD, E. (Rev. ed.). Property analysis of thermal insulating materials made from Ghanaian anthill clay deposits. **Cogent Engineering**, [S.l.], v. 7, n. 1, Oct. 2020. DOI <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1827493>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13818**: Placas Cerâmicas para Revestimento: Especificação e Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1997. 78p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984a. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984c. 1 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984d. 13 p.

BORIES, C. *et al.* Fired clay bricks using agricultural biomass wastes: Study and characterization. **Constr. Build. Mater.**, [S.l.], v. 91, p. 158-163, Aug. 2015. DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.006>

CABETE, N. P. F.; CABETE, M. da S.; DACOL, S. Manejo florestal sustentável: o caso da Mil Madeiras Preciosas. XXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (ENEGEP), 29., 6-9 out. 2009, Salvador, BA. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2009. Tema: Engenharia de Produção e o Desenvolvimento Sustentável: Integrando Tecnologia e Gestão.

CONTRERAS, M. *et al.* Recycling of industrial wastes for value-added applications in clay-based ceramic products: a global review (2015–19), **New Materials in Civil Engineering**, Butterworth-Heinemann [Ed.], Oxford, p. 155-219, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818961-0.00005-3>

COUTINHO JR, T. A.; CARVALHO, S. G.; ZANARDO, A. Características Mineralógicas e Químicas do Minério da Mina Morro Alto: Possibilidades de Fabricação de Revestimento Cerâmico Monoporoso por Via Seca. **Cerâmica Industrial**, [S.l.], v. 18, n. 5-6, 2013. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657537f8c9d6e028b47f0>. Acesso em: 5 maio 2022.

DUTRA, L. F. *et al.* Microstructural characterization of porous clay-based ceramic composites. **Materials**, [S.l.], v. 12, n. 6, Mar. 2019. DOI 10.3390/ma12060946.

GENG, J.; SUN, Q. Effects of high temperature treatment on physical-thermal properties of clay. **Thermochimica Acta**, [S.l.], v. 666, p. 148–155, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.06.018>.

- GUZMAN, Ya. Certain Principles of Formation of Porous Ceramic Structures. Properties and Applications (A Review). **Glass & Ceramics**, [S.l.], v. 60, p. 280-283, Sept. 2003. DOI <https://doi.org/10.1023/B:GLAC.0000008227.85944.64>
- HOSSAIN, Sk. S.; ROY, P. K. Sustainable ceramics derived from solid wastes: a review. **Journal of Asian Ceramic Societies**, [S.l.], v. 8, n. 4, p. 984-1009, Sept. 2020. DOI <https://doi.org/10.1080/21870764.2020.1815348>
- KAZA, S. *et al.* **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington, DC: World Bank Group, 2018. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>. Acesso em: 5 maio 2022.
- MAGLIANO, M. V. M., PANDOLFELLI, V. C. Multitização em refratários utilizando diferentes fontes precursoras: revisão. **Cerâmica**, [S.l.], v. 56, n. 340, p. 368-375, 2010. DOI <https://doi.org/10.1590/S0366-69132010000400009>
- MAHMOUDI, S.; SRASRA, E.; ZARGOUNI, F. The Use of Tunisian Barremian Clay in the Traditional Ceramic Industry: Optimization of Ceramic Properties. **Applied Clay Science**, [S.l.], v. 42, n. 1-2, p. 125-129, Dec. 2008. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2007.12.008>
- MORI, F. A.; COVEZZI, M. M.; MORI, C. L. S. O. Utilização da Serragem de Eucalyptus Spp. para a produção de tijolo maciço cerâmico. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 41, n. 3, p. 641-654, jul.-set. 2011. DOI <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v41i3.24057>
- OKADA, K. *et al.* Porous ceramics mimicking nature: preparation and properties of microstructures with unidirectionally oriented pores. **Science and Technology of Advanced Materials**, [S.l.], v. 12, n. 6, Oct. 2011. DOI <https://doi.org/10.1088/1468-6996/12/6/064701>
- PERALTA-SÁNCHEZ, M. G. *et al.* Viabilidade do uso de argilas caulínicas do Quadrilátero Ferrífero para a indústria cerâmica. **Cerâmica**, [S.l.], v. 57, n. 343, set. 2011. DOI <https://doi.org/10.1590/S0366-69132011000300002>
- RODRIGUES, M. I. B. *et al.* Sustainable Development for residues generated in the Red Ceramic industries region in the region of Cariri – CE. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 4, p. 40689-40702, Apr. 2021. DOI <https://doi.org/10.34117/bjdv7n4-500>
- RODRIGUES, V. O. *et al.* Caracterização das Matérias Primas Empregadas na Fabricação de Produtos do Pólo Cerâmico de Iranduba-AM. **Cerâmica Industrial**, Criciúma – SC, v. 20, n. 1, p. 37-40, jan.-fev. 2015. DOI <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2015.002>. Disponível em: <https://ceramicaindustrial.org.br/article/5876575a7f8c9d6e028b4819>. Acesso em: 5 maio 2022.
- ROQUE, R. A. L.; PIERRI, A. C. Uso inteligente dos recursos naturais e sustentabilidade na construção civil. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, Itabira-MG/Vargem Grande Paulista-SP, v. 8, n. 2, pág. e3482703, 2019. DOI <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i2.703>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/703>. Acesso em: 3 abr. 2022.
- SANTOS, C. P. *et al.* Caracterização de argilas calcárias utilizadas na produção de revestimentos cerâmicos no Estado de Sergipe – Brasil. **Cerâmica**, [S.l.], v. 62, n. 362, abr.-jun. 2016. DOI <https://doi.org/10.1590/0366-69132016623621983>

SERAFINI, R.; CARVALHO, J. P. B.; FIGUEIREDO, A. D. de. Impactos ambientais e toxicológicos da lixiviação em tijolos cerâmicos com adição de resíduos: uma revisão bibliográfica. **Revista Técnico-Científica do Crea-PR**, Ed. Especial 3º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções (SPPC), Curitiba, 17 p., ago. 2018. Disponível em: <https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/416>. Acesso em: 5 maio 2022.

SILVA, A. L. da *et al.* Technological characterization of new clay deposits in the south region of Amapá aiming applications in the ceramic industry. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, 2017. DOI <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0129>

SLIMANOU, H. *et al.* Thermal, physical, mechanical and microstructural properties of dredged sediment-based ceramic tiles as substituent of kaolin. **Environmental Science and Pollution Research**, [S.l.], v. 29, p. 26792–26809, 2022. DOI <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16787-x>

SOUZA, J. A. *et al.* Resíduos da Construção Civil: estudo comparativo de duas empresas de Rondonópolis-MT. **Revista Estudos e Pesquisas em Administração**, Rondonópolis, v. 3, n. 2, p. 53-67, 2019. DOI 10.30781/repad.v3i2.8549. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/repad/article/view/8549>. Acesso em: 5 maio. 2022.

VANUZA O. S. *et al.* Pyrolysis of acai seed biomass: Kinetics and thermodynamic parameters using thermogravimetric analysis, **Bioresource Technology Reports**, Volume 12, 2020, 100553. <https://dx.doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100553>

VELASCO, P. M. *et al.* Development of sustainable fired clay bricks by adding kindling from vine shoots: Study of thermal and mechanical properties. **Applied Clay Science**, [S.l.], v. 107, p. 156-164, Apr. 2015. DOI <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.017>

ZANELLI, C. *et al.* Technological behavior of porcelain stoneware bodies with Egyptian syenites. **Applied Ceramic Technology**, [S.l.], v. 16, n. 2, p. 574-584, Mar.-Apr. 2019. DOI <https://doi.org/10.1111/ijac.13102>

ZHANG, Z. *et al.* Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 56, p. 113-127, Apr. 2014. DOI [10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081)

Contribuição de Autoria

1 Germana Costa

Arquiteta, Ma., Professora

<https://orcid.org/0000-0002-1116-4727> • germanaduarte@ufam.edu.br

Contribuição: Conceituação, Investigação, Curadoria de dados, Visualização (tabelas, gráficos), Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição

2 Paulo de Tarso Barbosa Sampaio

Engenheiro Florestal, Dr., Professor, Pesquisador

<https://orcid.org/0000-0003-0254-7651> • sampaio@inpa.gov.br

Contribuição: AAdministração do projeto, Visualização (tabelas, gráficos), Escrita – revisão e edição

3 Ruy Alexandre de Sá Ribeiro

Engenheiro Civil, Dr., Pesquisador

<https://orcid.org/0000-0002-6705-886X> • ruy@desari.com.br

Contribuição: Metodologia, Supervisão

4 Jose Josimar Soares

Engenheiro Mecânico, Dr., Professor

<https://orcid.org/0000-0002-2214-078X> • josimar.soares@ifam.edu.br

Contribuição: Recursos, Validação

5 Rannier Marques Mendonça

Engenheiro de Materiais, Dr., Professor

<https://orcid.org/0000-0002-8611-7861> • ranniermm@ufam.edu.br

Contribuição: Curadoria de dados, Análise Formal, Validação, Escrita – revisão e edição, Escrita – revisão e edição

Como citar este artigo

Costa, G.; Sampaio, P. T. B.; Ribeiro, R. A. S.; Mendonça, R. M.; Soares, J. J. Formulação de massa cerâmica para revestimento poroso utilizando resíduos de madeiras tropicais. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 32, n. 4, p. 2348-2371, 2022. DOI 10.5902/1980509870383. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509870383>.