

Economia de energia pela recuperação de resíduos agroindustriais para produção de cerâmica vermelha: uma simbiose industrial

Julia Santos Nunes de Campos^{a*}, Maurício Francisco Henriques Jr^a, Patricia Miranda Dresch^a

^aInstituto Nacional de Tecnologia Rio de Janeiro, 20081-312, Rio de Janeiro, Brasil

*e-mail: julia.campos@int.gov.br

Resumo

Este estudo explora o potencial da simbiose industrial entre o setor de cerâmica vermelha e os produtores de resíduos agroindustriais no Brasil, com foco na economia de energia e nos benefícios ambientais. Ao incorporar resíduos agroindustriais, como borra de café instantâneo, casca de arroz e casca de amendoim, no processo de produção cerâmica, a pesquisa demonstra de forma original uma redução significativa no consumo de energia e menor dependência da lenha, tradicionalmente utilizada no processo de sinterização. Essa integração não apenas melhora a qualidade dos produtos finais, mas também oferece um método sustentável de descarte para as indústrias geradoras desses resíduos. O estudo destaca os benefícios mútuos dessa relação simbiótica, incluindo a redução de custos para a indústria cerâmica e ganhos ambientais quando aborda a redução do desmatamento. Os resultados indicam que essa abordagem está alinhada com os princípios da economia circular e apoia os compromissos internacionais do Brasil em sustentabilidade. Conclui-se que o uso de resíduos agroindustriais na produção de cerâmica vermelha representa um caminho viável para práticas industriais sustentáveis, contribuindo tanto para uma maior eficiência econômica, quanto para uma melhor conservação ambiental. Considerando o aspecto energético, o calor fornecido pelos resíduos avaliados neste estudo pode reduzir o consumo de energia em mais de 334 mil toneladas de lenha por ano. Em termos financeiros, somando os custos evitados com lenha e argila, além do aumento de produtividade devido à queima mais homogênea por evitar perdas excessivas, os resíduos analisados poderiam gerar uma economia de aproximadamente 270 milhões de reais por ano para o setor de cerâmica vermelha no Brasil. Ambientalmente, nos casos especificados onde a lenha equivalente empregada no setor fosse extraída de forma irregular, poderiam ser poupados cerca de 430 hectares de florestas na mata atlântica do país.

Palavras-chave: simbiose industrial, resíduos, economia de energia, indústria cerâmica.

1. INTRODUÇÃO

O atual modelo de desenvolvimento econômico global é pautado por princípios lineares [1], o que significa que a acumulação de capital é obtida por meio da lógica de extração, consumo e descarte. Esse padrão de produção tem sido amplamente questionado desde que foi comprovado cientificamente que o planeta não consegue sustentar os altos níveis de consumo. Tal modelo foi consolidado desde a 1ª Revolução Industrial e, principalmente, após a Segunda Guerra Mundial [2]. Diversas correntes de pensamento têm orientado organizações públicas e privadas que buscam se reinventar diante

dos obstáculos ao crescimento econômico. Como resposta preventiva aos problemas da produção linear, surgiu o conceito de economia circular [3].

A recuperação de recursos abordada na presente pesquisa concentra-se na troca de resíduos entre empresas de diferentes segmentos, uma aplicação do conceito de simbiose industrial — uma das ferramentas da economia circular. Muitos setores industriais têm potencial para essa simbiose e, nesse contexto, este estudo foca na possibilidade de sinergia entre o setor de cerâmica vermelha (especialmente produtos estruturais, como blocos e tijolos) e resíduos agroindustriais, dada sua adequação físico-química e carga orgânica, que podem ser facilmente incorporados à massa cerâmica (misturas de argila e água). Dentre a ampla variedade de resíduos disponíveis no Brasil passíveis de utilização nessa simbiose, ou seja, em adições à massa cerâmica, foram avaliados neste estudo: borra industrial de café solúvel, casca de arroz e casca de amendoim. Outros resíduos também foram estudados, porém, os supracitados não necessitam de beneficiamento para sua utilização na massa. Além disso foram selecionados em função da disponibilidade e volumes que poderiam ser ofertados, localização geográfica e facilidade de manuseio.

O setor de cerâmica vermelha, com sua alta produção distribuída por todo território nacional, alcança cerca de 42 bilhões de peças cerâmicas por ano [4], o que equivale a aproximadamente 105 milhões de toneladas/ano [5], e apresenta grande capacidade de absorver diversos tipos de resíduos (especialmente aqueles com conteúdo orgânico), e traz vantagens significativas nesta simbiose. Além de servir como sumidouro de resíduos poluentes, evitando danos ambientais, os produtores de cerâmica podem obter benefícios como economia de energia nos processos de sinterização, melhoria da qualidade dos produtos finais e redução no consumo de matéria-prima (argila e lenha).

A economia de energia ocorre devido ao calor liberado pelo conteúdo orgânico durante a sinterização das peças de argila nos fornos cerâmicos. Como resultado relevante, a energia transferida pelos resíduos pode substituir parte do calor da lenha tradicionalmente usada nas fornalhas, contribuindo para a redução do desmatamento ilegal em algumas regiões do Brasil e a minimização de impactos negativos em biomas e seus problemas sociais associados [6]. Essa simbiose potencial, para os segmentos agroindustriais analisados, proporcionaria um destino adequado para os passivos ambientais, e que adiciona um maior valor agregado para as empresas no mercado. Para o Estado, a simbiose auxilia no cumprimento dos compromissos internacionais assumidos pelo Brasil.

Apesar de pesquisas com o tema inserção de resíduos à massa de blocos e tijolos serem largamente realizadas nacionalmente e internacionalmente [7-12] o presente estudo teve como objetivo verificar, através de estimativas inéditas, a capacidade de absorção dos resíduos pelo setor cerâmico, com base do ponto de vista técnico, garantindo ou melhorando a qualidade dos produtos finais, e da viabilidade econômica considerando a localização geográfica entre regiões geradoras dos resíduos e polos cerâmicos capazes de absorvê-los. Alguns dos resíduos selecionados e estudados já são empregados no setor cerâmico, porém com aplicação direta nas fornalhas [13-16], o que não deve descartar um aproveitamento mais nobre quando adicionados à massa cerâmica, uma vez que poderão contribuir na melhoria da qualidade dos produtos finais (blocos e tijolos).

1.2. Simbiose industrial

O modelo econômico linear [1], caracterizado pela produção e consumo contínuos e intensivos de bens, com consequente geração de resíduos, tem provocado impactos ambientais extremamente negativos. Entre os principais efeitos desse sistema produtivo destacam-se o esgotamento de recursos naturais, o desmatamento e perda de biodiversidade, a degradação do solo, instensificação dos processos de desertificação, a poluição das águas e as emissões de gases de efeito estufa, dentre outros [17, 18].

Neste modelo, a expansão da escala produtiva tende a comprometer gravemente o equilíbrio ambiental, como evidenciado em inúmeras situações ao redor do mundo e documentado em obras fundamentais como “Primavera Silenciosa” de Rachel Carson (1962), “Os Limites do Crescimento” do Clube de Roma [2] e o relatório “Nosso Futuro Comum” [19]. Diante deste cenário, torna-se imperativo encontrar formas de manter o desenvolvimento econômico sem comprometer a capacidade do meio ambiente de atender às necessidades das gerações futuras, conforme proposto no conceito de desenvolvimento sustentável [19].

Na busca por maior sustentabilidade nos processos produtivos, surgiu entre as décadas de 1980 e 1990 o conceito de Ecologia Industrial. Esta abordagem, baseada numa analogia com os sistemas ecológicos naturais, visa analisar e otimizar os complexos industriais, logísticos e de consumo, bem como seus fluxos de materiais e energia [20-22]. Paralelamente, inspirado nos princípios naturais, desenvolveu-se o conceito de Simbiose Industrial. Tal como o significado literal do termo simbiose (vida em conjunto), este conceito descreve as interações mutuamente benéficas entre empresas de diferentes setores [22].

No trabalho proposto, a Simbiose Industrial se concretiza através da integração de processos industriais via gestão de resíduos, onde os resíduos de uma indústria servem como matéria-prima para outra. Esta interação visa maximizar a eficiência no uso de recursos, minimizar os impactos ambientais e reduzir custos de produção, criando assim um sistema industrial em uma produção sustentável e circular.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada consistiu de seis fases bem determinadas, a saber:

1. caracterização do setor de cerâmica vermelha;
2. levantamento da oferta de resíduos pré-selecionados;
3. organização dos experimentos de laboratório que definem limites máximos para adição nas massas cerâmicas;
4. definição do raio econômico máximo para realizar o transporte dos resíduos até os polos cerâmicos;
5. quantificação dos ganhos econômicos (energia, qualidade e matéria prima) e;
6. quantificação de áreas equivalentes florestais.

Na fase inicial de levantamento geral de informações, concentrou-se sobre a coleta de dados de produção do setor de cerâmica vermelha no Brasil, numa abordagem regional e seus tipos de produtos [5, 23]. Após, foi realizado o levantamento da oferta de vários resíduos agroindustriais, com determinada carga orgânica, que pudessem ter um aproveitamento em misturas à matéria-prima, de acordo com estudos prévios segundo a literatura e também do próprio Instituto de Tecnologia, conforme apresentado adiante. De posse das quantificações dos resíduos e da produção de blocos de cerâmica, deu-se o levantamento dos detalhes técnicos de experimentos de laboratório para estabelecer os limites máximos para adição às massas cerâmicas de modo que a garantir ou melhorar alguns parâmetros físico-químicos importantes para blocos e tijolos [24-26]. Tais limites máximos de adição são importantes de forma que não houvesse uma influência negativa nos produtos finais.

Em seguida foi estabelecida a definição de regiões produtoras de cerâmica vermelha no país que pudessem adotar o emprego dos resíduos mantendo uma viabilidade econômica de transporte. Assim, para cada resíduo selecionado identificaram-se as principais regiões produtoras e calculou-se o raio máximo de transporte economicamente viável via rodoviária (obtido através do site www.rotasbrasil.com.br que possui tabela atualizada da Agência Nacional de Transportes Terrestres ANTT), combinado ao preço usual que os ceramistas praticam para o transporte de argila. A partir de tais dados foi possível realizar a quantificação dos ganhos econômicos, provenientes do uso de energia, pela melhoria da qualidade e com matéria prima poupada, de acordo com as seguintes etapas.

A estimativa da economia de energia (calor doado pelo resíduo ao processo) foi realizada a partir das massas do resíduo e da argila em proporções que respeitassem o limite máximo levantado pelos experimentos laboratoriais e seus poderes caloríficos superiores. Encontram-se também ao decorrer da pesquisa outros equivalentes energéticos. Na estimativa da quantidade anual de blocos a serem produzidos com resíduo foi considerada o quanto cada polo regional seria capaz de absorver, seguindo o percentual definido para a adição à massa. Para a qualidade, redução de perdas por trincas e quebras, baseou-se nos experimentos laboratoriais e em escala industrial realizados por [27], aplicados à pesquisa similar sobre a adição de turfa à massa cerâmica para fabricação de blocos cerâmicos. Neste estudo a adição de turfa proporcionou uma redução de perdas de 9% para 5%.

Foram ainda considerados os seguintes parâmetros: massa do bloco estrutural de 2,5 kg e ainda a massa de um estêreo de lenha com 340 kg [28]; e consumo específico médio dos fornos cerâmicos de 1 estêreo por milheiro (mil blocos) (estêreo é uma unidade de medida de volume para madeira empilhada que considera tanto o volume da madeira quanto os espaços vazios entre as toras). Com relação à quantidade matéria prima poupada (argila) foi considerada que a massa é equivalente à do resíduo adicionado. Nas avaliações financeiras/econômicas foram considerados os preços médios praticados atualmente, segundo os sindicatos ceramistas.

Nas estimativas das áreas florestais equivalentes com potencial de conservação, foi levantada a média de desmatamento dos estados onde se encontram os polos cerâmicos do presente estudo, de acordo com o MAPBIOMAS [6]. Deve-se observar, no entanto, que é sabido que uma parte da biomassa energética empregada pelas empresas tem origem legal ou já provém de resíduos de madeira de serrarias e outras fontes [5, 29], como será comentado adiante. Na mesma linha adotou-se a densidade por hectare do bioma considerado onde os polos cerâmicos estão inseridos, isto é, 55m³/ha para mata atlântica [30], sendo então o desmatamento calculado de acordo com a equação (a).

$$(a) = \frac{\left(\frac{PB_{\text{resíduo}} \times \text{Massa do st}}{\text{Massa de um milheiro de blocos}} \right) \times \% \text{ desmatamento do estado}}{\text{Densidade do bioma}}$$

4. RESULTADOS

4.1. Caracterização do setor de cerâmica vermelha

Os resíduos orgânicos são incorporados à massa durante a etapa de mistura e preparação (Fig.1) e, após a conformação e secagem, o material é queimado (sinterizado) em fornos a aproximadamente 1.000 °C por 15 a 40 horas, dependendo do tipo de equipamento utilizado.

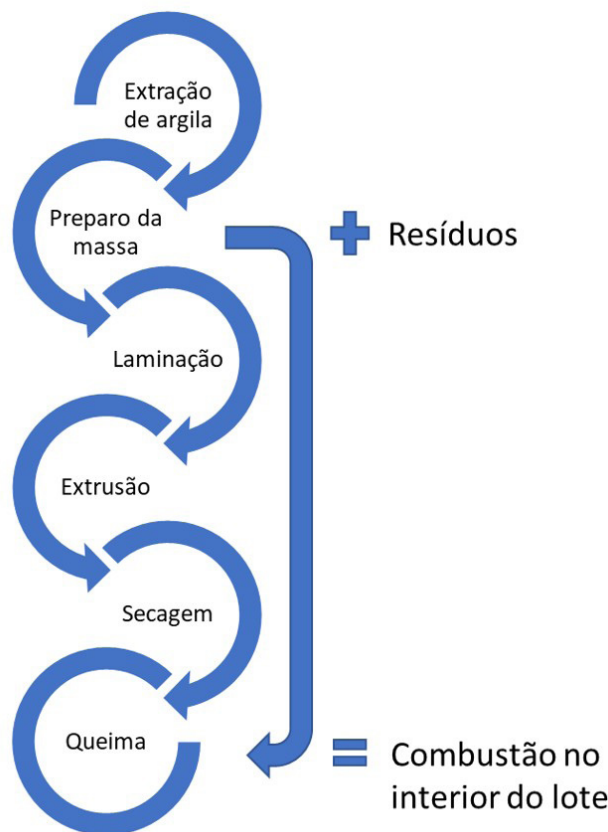


Figura 1. Processo de produção na indústria de cerâmica vermelha com adição de resíduos combustíveis à massa

É importante destacar que a mistura de resíduos com a massa cerâmica só pode ser realizada para blocos. Para telhas, a adição de resíduos à massa cerâmica não é possível, pois aumenta a porosidade do produto final, uma condição indesejável para telhas [31]. Outro aspecto crucial é respeitar os limites máximos de adição à argila, cuja quantidade deve ser determinada através de experimentos laboratoriais para evitar riscos de produção com baixa qualidade. Segundo Mothé [32], com a mistura há maior uniformidade de temperatura nos fornos, reduzindo o tempo de queima em cerca de 40%, o que permite aumentar a produção e diminuir custos.

Em alguns casos, essa incorporação pode até melhorar certas características, como a resistência mecânica, a porosidade, bem como a condução acústica e térmica. Outro benefício do uso de resíduos é a redução da necessidade de matérias-primas, podendo assim, diminuir a exploração de novas áreas e seus impactos negativos [17, 18, 33]. Observa-se ainda que esta incorporação também torna as peças mais leves, o que facilita o transporte e diminui o tempo de secagem dos produtos, segundo Jovanovic et al. [34]. Portanto, por possibilitar obter tantas vantagens, a incorporação do resíduo à massa cerâmica pode constituir uma alternativa de interesse, em comparação a simples queima destes em fornalhas.

4.2. Levantamento da oferta de resíduos selecionados

A pesquisa realizada contemplou a avaliação dos principais residuais agroindustriais no Brasil, com características físico-químicas que pudessem ser aplicados em misturas na matéria prima para a produção de blocos cerâmicos. Dentre esse foram avaliados: lama de alto forno de siderurgia, lodo de estação de tratamento de água, bagaço de cana de açúcar, serragem, caroço de açaí, cascas de frutíferas, bagaço de malte de cervejarias, dentre outros. O critério de escolha se deu principalmente, além de suas propriedades específicas, em função da disponibilidade e volumes que poderiam ser ofertados, localização geográfica e facilidade de manuseio ou de adequação. Assim, foram selecionados os resíduos, borra da indústria de café solúvel, casca de arroz e casca de amendoim.

4.2.1. Borra de café solúvel industrial

Em 2020, o Brasil foi o maior produtor mundial de café solúvel, com mais de 122 mil toneladas produzidas para consumo interno e exportação, sendo a maior concentração no estado de São Paulo [35]. O processamento industrial dos grãos para produzir pó de café torrado e moído pode ser resumido em seis etapas: pré-limpeza, secagem, beneficiamento, torrefação, moagem e embalagem. A produção de café solúvel possui mais etapas que a do café torrado e moído. Após a seleção, torra e moagem dos grãos, ocorre a etapa de extração, na qual a água circula a 210 °C sob alta pressão (20 kgf/cm²). Esse processo rende aproximadamente 37% de sólidos solúveis (extrato de café) e 63% de sólidos não solúveis, resultando em resíduos de borra de café. A quantidade de resíduo gerado no processo é considerável: para cada tonelada de café processado, são produzidos aproximadamente 480 kg de borra [36].

4.2.2. Casca de arroz

Entre os estados brasileiros, o Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz. De acordo com a Pesquisa Agrícola Municipal do IBGE [37], entre 2018 e 2020, o estado foi responsável por 73% da produção nacional total. Nesse período, dez municípios registraram produção média superior a 200 mil toneladas/ano. O processamento tradicional do arroz (não parboilizado) inicia-se com a separação da casca do grão para obtenção do arroz branco para consumo [38]. A quantidade de casca de arroz gerada atinge aproximadamente 0,18 toneladas de biomassa em base seca por tonelada de arroz processado, conforme estudo da Empresa Brasileira de Pesquisa Energética [39]. Visto que o setor cerâmico da região não conseguirá absorver todo o resíduo, a casca pode ser queimada diretamente em caldeiras e fornos.

4.2.3. Casca de amendoim

A produção de amendoim no Brasil em 2021 atingiu 826.371 toneladas [40]. O maior produtor nacional é o estado de São Paulo, responsável por aproximadamente 90% da produção do país. A produção paulista alcançou 692,7 mil toneladas com expectativa de crescimento, sendo 70%

destinados à exportação [41]. Entretanto, parte deste produto é consumido sem a casca, gerando um grande volume deste resíduo. Segundo a FIESP [42], a produção brasileira de casca de amendoim foi de 134 mil toneladas em 2021. Atualmente, a cadeia avícola é a maior compradora da casca de amendoim gerada no processamento do grão [42], porém a comercialização não ocorre em sua totalidade, havendo deposição parcial em áreas inadequadas.

4.3. Experimentos laboratoriais

Segundo Soares et al. [36], o resíduo borra de café é composto por 91% de matéria orgânica rica em lipídios, que proporciona alto poder calorífico (poder calorífico superior de 5.235,5 kcal/kg de acordo com Santos et al. [43]). A borra consiste em grânulos isométricos, o que garante uma mistura homogênea na massa cerâmica. Além disso, devido às suas características químicas e condições de homogeneidade [44], quaisquer alterações no produto final causadas pela sua inclusão na massa serão consistentes em todo o lote. A borra de café residual é classificada, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), como Resíduo Classe II. Isso significa que ela apresenta risco moderado ao meio ambiente quando manuseada de forma inadequada, com potencial de contaminar o solo e a água se descartada incorretamente, devido à presença de compostos químicos e microrganismos [45].

Segundo Fonseca et al. [24], foram desenvolvidas misturas de argila com até 30% de borra de café residuais incorporadas à massa cerâmica. Os resultados demonstraram que a utilização desse resíduo aumenta a absorção de água e a porosidade aparente dos produtos cerâmicos, enquanto reduz a densidade aparente e a resistência mecânica, sendo as amostras com 5% de adição as mais adequadas para utilização em peças queimadas a 1.100 °C. No que diz respeito ao isolamento térmico, este se apresentou superior devido a uma redução de até 30% na condutividade térmica.

Maciel et al. [46] desenvolveram misturas de argila com até 20% de borra de café residual, queimadas a 1.000 °C, e observaram que quantidades maiores do resíduo aumentam a absorção de água e a porosidade, enquanto a massa específica aparente e a resistência mecânica diminuem com a adição desse material.

No estudo encontrado em Manni et al. [47] foram desenvolvidas misturas de argila com 10, 20 e 30% de borra de café residual em sua composição, sendo as amostras queimadas a 1.150 °C. Nesse experimento, os pesquisadores concluíram que a utilização desse resíduo aumenta a porosidade e a absorção de água, enquanto reduz a densidade aparente, a resistência à flexão e a condutividade térmica. Os autores também afirmam que o teor de 30% é o mais indicado para uso, por proporcionar um alto índice de porosidade.

Jovanovic et al. [34] realizaram experimentos com a adição de 5 e 10% de borra de café à massa de argila, utilizando corpos de prova queimados a até 1.173 °C. A conclusão foi de que a incorporação desse resíduo aumenta a plasticidade da argila e a porosidade, além de reduzir o tempo de secagem das peças e a densidade aparente. Embora o aumento da porosidade resulte em diminuição da resistência à compressão, as peças ainda apresentam valores aceitáveis para esse parâmetro quando contêm até 10% do resíduo. O estudo também demonstrou que o uso da borra reduz a condutividade térmica. Além disso, a redução da densidade aparente permite a produção de tijolos mais leves, facilitando seu transporte. No presente trabalho, os autores adotaram uma quantidade conservadora de 5% de adição do resíduo à massa cerâmica, considerando que esse percentual apresentou o melhor desempenho em relação às características físicas dos produtos finais (blocos e tijolos). Os produtos obtidos nessas condições demonstraram resultados satisfatórios em propriedades mecânicas, em conformidade com a NBR 15270-1 [48] para tijolos de vedação e com a NBR 15270-2 [49] para blocos cerâmicos estruturais.

O resíduo agroindustrial casca de arroz é um material fibroso composto principalmente por celulose e lignina, com alto volume e baixa densidade. Sua lenta biodegradação mantém suas características físicas e químicas inalteradas por longos períodos, o que pode causar danos ao meio ambiente. Além disso, quando depositada, a casca ocupa grandes áreas onde pode ocorrer combustão espontânea, resultando na dispersão de cinzas que afetam solos, recursos hídricos e a atmosfera [50]. O resíduo de casca de arroz gerado durante o processamento é classificado, conforme a NBR 10.004 [45], como resíduo sólido não inerte classe II, com propriedades como biodegradabilidade e combustibilidade.

Segundo Sutas et al. [26], à medida que as cascas de arroz são incorporadas em blocos cerâmicos, ocorre redução na resistência à compressão e na densidade do produto. Com a inserção de 2% de casca de arroz na massa, a densidade aparente foi de 1,5 g/cm³, resultando em um produto mais leve, já que sem a adição a densidade aparente era de 1,7 g/cm³. A absorção de água, nessa mesma

proporção, apresentou resultado de 15,2%, e a resistência à compressão foi de 2,5 MPa. Neste estudo, foi adotada uma quantidade conservadora de 2% de adição do resíduo à massa cerâmica, uma vez que este percentual demonstra o melhor desempenho em relação às propriedades físicas dos tijolos. Os produtos obtidos com a adição de até 2% do resíduo apresentaram bons resultados em propriedades mecânicas, com valores aceitáveis de porosidade, conforme as normas ABNT supracitadas. A NBR 10.004 [45] não oferece uma classificação específica para a casca de amendoim, mas a análise de suas características permite considerá-la como resíduo orgânico, com destinação preferencial para processos de compostagem ou produção de energia.

Quaranta et al. [25] realizaram um experimento com diferentes adições de casca de amendoim à mistura de produtos cerâmicos, sinterizando as peças em diferentes temperaturas, e concluíram que a adição de 15% de casca de amendoim, queimada a 1.000 °C, seria ideal para a sinterização de tijolos e blocos. No presente trabalho, foi adotada uma quantidade conservadora de 15% de adição do resíduo à massa cerâmica, pois esta apresentou o melhor desempenho em relação às características físicas do tijolo. Os produtos obtidos com a adição de até 15% do resíduo apresentaram bons resultados em propriedades mecânicas, com valores aceitáveis de porosidade, conforme as normas NBR [48, 49].

4.4. Distância econômica máxima

Considerando-se o valor praticado pelas empresas ceramistas de transporte de R\$ 1.360,00 por carrada de 25 toneladas de argila, e método aplicado em estudos prévios [5], a Fig.2 exemplifica um dos mapas obtidos para identificar o raio econômico máximo para o caso da borra de café solúvel industrial. Para os demais resíduos o mesmo procedimento foi adotado.

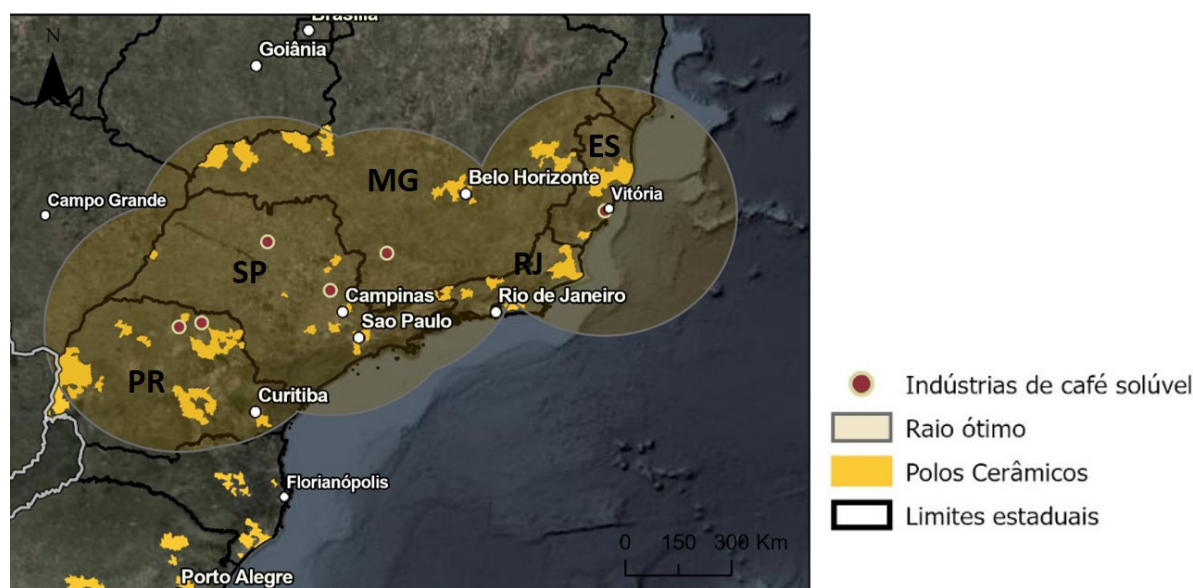


Figura 2. Representação do raio econômico máximo

Na região que abrange a borra de café solúvel industrial, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo, produzem em conjunto cerca de 45.438.180 toneladas de blocos e tijolos por ano [5]. Já para a região de absorção da casca de arroz, que é predominantemente no Rio Grande do Sul, a produção de blocos e tijolos anual é de 6.408.000 toneladas [5]. Para São Paulo, área onde é realizada a produção de amendoim sem casca, a produção de blocos e tijolos é de 20.307.180 toneladas/ano.

4.5. Estimativas da economia de energia

O balanço de energia, de acordo com a Fig.3, desenvolvida teoricamente para o caso do aproveitamento da borra de café solúvel industrial, com base nos experimentos anteriores no INT [27] demonstram um ganho atraente do ponto de vista energético e o papel da adição do resíduo.

Neste caso da adição de borra de café, em proporção de 5% em massa à carga cerâmica, não só o seu conteúdo energético substitui proporcionalmente a quantidade de energia que seria cedida pela lenha em um processo tradicional, mas também ocorre uma redução do *input* energético em cerca de 16% [27], proporcionada por uma redução do tempo de sinterização (queima e por maior eficiência energética). Nota-se nos diagramas de *Sankey* para o caso da borra de café, que o resíduo passaria a representar 18,9% do *input* energético na nova situação avaliada, tomando-se como base a queima em um forno abóbada. Os balanços dos demais resíduos demonstram comportamentos semelhantes.

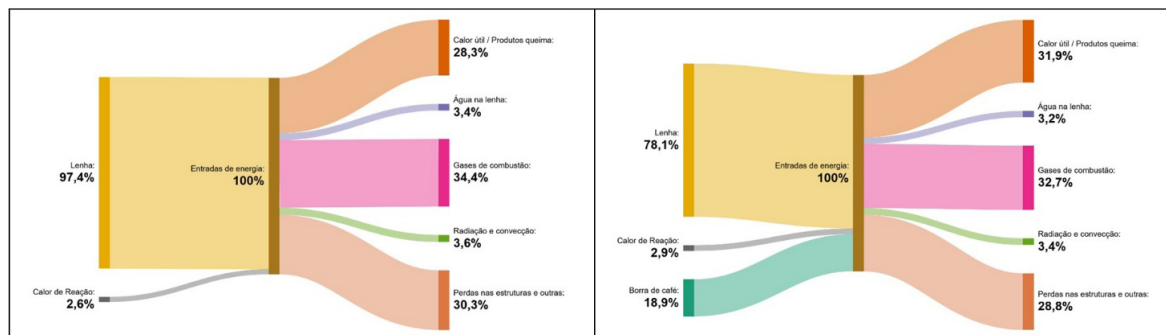


Figura 3. Diagrama de *Sankey* (fluxo energético) em fornos tipo abóbada: sem adição (esquerda); e com adição (direita) de resíduo à massa cerâmica

4.5.1. Borra de café solúvel industrial

Considerando que a produção média anual é de 122 mil toneladas de café solúvel [35] e que cada tonelada gera 480 kg de borra [36], obtém-se uma disponibilidade total de 58.560 toneladas deste resíduo por ano. Estes resíduos estão concentrados nas empresas de café solúvel, sendo então de fácil logística a coleta e distribuição dos mesmos para as empresas cerâmicas. Com uma taxa de absorção de 5% na mistura, é possível destinar todo o resíduo para a indústria cerâmica, permitindo que estas ainda possam incorporar outros resíduos.

Equivalência borra e lenha. Substituição energética: Considerando que todo o resíduo seja absorvido pelas indústrias cerâmicas e sabendo que a borra de café solúvel possui um poder calorífico superior de 5.235 kcal/kg [43], a energia térmica cedida equivale a 306.600 Gcal (30.600 tep (t equivalente de petróleo)), que representa 64.800 toneladas de lenha (utilizando-se a média do poder calorífico superior da lenha baseado nas espécies dadas em Quirino et al. [51], isto é, 4.732 kcal/kg). Considerando-se que o valor do estéreo de lenha seja em média de R\$300,00 (médias de preço em agosto de 2025) e que cada estéreo possui aproximadamente 0,39 toneladas [28], a substituição energética equivalente de lenha por borra na massa cerâmica, tornaria possível uma economia de cerca de R\$ 50 milhões por ano em todo o setor abrangido pelo raio econômico.

Redução de perdas na produção. Maior qualidade dos produtos: De acordo com o estudo mencionado sobre a turfa [27], com base na doação de calor do resíduo para as peças cerâmicas, a produção nos fornos passa a ser mais homogênea, já que o calor durante a sinterização ocorre de forma mais uniforme e sem grandes oscilações com relação a queima exclusiva com lenha. Esta homogeneidade faz com que as perdas possam ser reduzidas em 4% devido a uma menor quantidade de trincas, quebras e peças defeituosas (redução de 9% de perdas, para uma média de 5% [27]). Dessa forma, a queima de cerca de 47 mil toneladas de peças para complementar uma produção é evitada, o que equivale a um gasto de 7 mil toneladas de lenha (34.500 Gcal), que corresponde a mais de R\$ 5 milhões anuais em lenha para todo o setor anualmente.

4.5.2. Casca de arroz

Considerando-se que a produção de arroz ocorre principalmente no estado do Rio Grande do Sul, o raio econômico máximo avaliado abrange apenas o próprio estado. Com base na produção média

anual de arroz neste, 5.173.510 toneladas [40], e sabendo que cada tonelada de arroz processado gera 180 kg de casca de arroz [39], obtém-se a geração anual de 931.200 toneladas de casca residual. Se adotada uma taxa de absorção de 2%, estima-se que 128.160 toneladas de casca de arroz seriam absorvidas pela indústria cerâmica em sua mistura de argila. Portanto, as empresas não absorveriam todo esse material disponível, restando uma parcela para outros usos, como por exemplo para a alimentação direta dos fornos.

Equivalência casca de arroz e lenha. Substituição energética: Com poder calorífico superior de 3.908 kcal/kg [52], a energia térmica total proporcionada pelo resíduo atingiria cerca de 500.000 Gcal/ano (50.000 tep), equivalente a 105 mil toneladas de lenha por ano em todo o setor. Esta economia equivale a R\$ 81,4 milhões por ano/setor.

Redução de perdas na produção (maior qualidade dos produtos): Devido a uma cocção mais homogênea das peças, seriam economizadas cerca de 256 mil toneladas de peças para complementar uma produção anteriormente desperdiçada, equivalente a um gasto de quase 40 mil toneladas de lenha (equivalente a 190 mil Gcal), o que resulta em cerca de R\$ 30 milhões anuais poupados em lenha para todo o setor.

4.5.3. Casca de amendoim

Parte da produção de amendoim é para consumo sem a casca. Segundo a FIESP [42], a produção brasileira de casca de amendoim foi de 134 mil toneladas em 2021, sendo 90% realizada no estado de São Paulo, definindo-se assim o raio máximo do presente estudo dentro deste estado, e oferta do resíduo em torno de 120.600 toneladas/ano. A casca de amendoim é composta por 69% de holocelulose e 28% de lignina [53]. Essa composição confere ao resíduo um poder calorífico superior de 4.414 kcal/kg [25]. Com uma taxa de absorção de 15%, conclui-se que todo o material disponível seria utilizado.

Equivalência casca de amendoim e lenha. Substituição energética: O resíduo casca de amendoim proporciona o equivalente energético de 532.000 Gcal/ano, ou 53.200 tep (112.500 toneladas de lenha), que representa R\$ 86,5 milhões por ano/setor.

Redução de perdas na produção (maior qualidade dos produtos): Em função de uma cocção mais homogênea das peças, a queimada cerca de 32 mil toneladas de peças seriam poupadas para complementar uma produção anteriormente desperdiçada. Esse montante equivale a um gasto de 5 mil toneladas de lenha (23.000 Gcal), ou aproximadamente cerca de R\$ 4 milhões anuais em lenha para todo o setor.

4.6. Economia de argila

Ao substituir proporcionalmente a argila por cada tipo de resíduo definido, há uma economia ou poupança de matéria prima proporcional, seguindo o percentual descrito anteriormente.

Borra de café solúvel industrial: Empregando-se a borra de café obtém-se uma economia de 58.560 toneladas de argila por ano e considerando o seu custo de aproximadamente R\$55,00/t, poderiam ser poupados gastos da ordem de R\$ 3,2 milhões por ano, considerando todo o setor. Esta prática é caracterizada como crime de acordo com a Lei de Crimes Ambientais [54] que proíbe o uso de matéria-prima florestal sem comprovação de origem. Também infringe Lei nº 6.938/1981 [55] e consequente Resolução CONAMA nº 237/1997 [56] quem não cumpre o acordado quando do processo de licenciamento ambiental, que prevê a rastreabilidade de qualquer insumo que seja de origem florestal.

Casca de arroz: No caso da casca de arroz, obtém-se uma economia de 128.160 toneladas de argila por ano, equivalente a gastos da ordem de R\$ 7 milhões por ano para todo o setor.

Casca de amendoim: A casca de amendoim resulta numa poupança de 120.600 toneladas de argila por ano, e gastos em torno de R\$ 6,5 milhões por ano.

4.7. Outros ganhos: desmatamento evitado

Dada à alta informalidade da produção de cerâmica vermelha no Brasil [5, 57], é sabido que parte da lenha empregada no setor de cerâmica vermelha tem origem ilegal, sendo extraída irregularmente de vários biomas no país [29]. É certo que o aproveitamento de alguns resíduos alimentando as fornalhas

nas empresas cerâmicas já vem sendo realizado, como é o caso da bucha de coco, podas de frutíferas, resíduos de serrarias, resíduos madeireiros da construção civil, *pallets*, gramíneas, caroços, dentre outros [5, 13-16, 29]. Porém, estas fontes são insuficientes, bem como é deficiente a oferta de lenha legalizada, seja oriunda de Plano de Manejo Florestal Sustentável ou de florestas plantadas [29, 58].

Diante deste déficit na oferta quando comparada com a demanda, calculada a partir dos consumos específicos dos fornos e a produção comercializada [5], fica evidente que as cerâmicas se utilizam de biomassa de fontes ilegais.

Borra de café: Considerando os estados alvo (MG, RJ, ES, SP e PR), e com base no MapBiomas e consequente Relatório Anual de Desmatamento (2023), adotou-se a taxa de desmatamento média em tais estados abrangidos de 23%. Dessa forma, aplicando-se esta taxa de desmatamento sobre o total de lenha a ser economizado (71.800 t/ano), estima-se que poderiam ser poupadas cerca de 16,7 mil toneladas por ano de lenha ilegal e, consequentemente, considerando o bioma Mata Atlântica, cuja densidade média é de 55 toneladas de lenha por hectare [30], pode-se considerar que a área não desmatada corresponderia a aproximadamente 300 hectares por ano.

Casca de arroz: Com uma taxa média de desmatamento de 4% no Rio Grande do Sul, calcula-se que seriam preservados 118 hectares de floresta nativa anualmente.

Casca de amendoim: Com uma taxa média de desmatamento de 1% no estado de São Paulo, calcula-se que poderiam ser preservados cerca de 11 hectares de floresta nativa anualmente.

5. DISCUSSÃO

A Tab.1 traz parâmetros de base utilizados para as estimativas das quantidades de energia cedidas ao processo de sinterização para cada tipo de resíduo. Já as Tab.2, Tab.3 e Tab.4 mostram quanto os resíduos da produção agroindustrial podem fornecer de energia para os processos de fabricação de cerâmica vermelha e as economias de lenha equivalentes nas regiões alvo deste estudo. Destacam-se as economias de argila e lenha proporcionadas pela casca de arroz. Neste caso, sobraria resíduo, que poderia ter um uso menos nobre, ou seja, ser queimado diretamente nas fornalhas, exigindo, porém, adaptações nos sistemas de alimentação de combustível dos fornos.

Tabela 1. Parâmetros de base dos resíduos avaliados

	Produção blocos/tijolos cerâmicos nos polos de interesse (t/ano)	Massa de resíduos (t/ano)	Poder calorífico superior (kcal/kg)
Borra de café	45.438.180	58.560	5.235
Casca de arroz	6.408.000	128.160	3.908
Casca de amendoim	20.307.180	120.600	4.414
Lenha	-	-	4.732
Redução de perdas: -4%; massa do estêreo de lenha: 0,39 t; massa do bloco: 2,5 kg; preços: R\$ 770,00/t de lenha; R\$ 54,50/t de argila; consumo específico do forno: 1 st/mil peças			

Tabela 2. Economia de energia e ganhos financeiros na utilização do resíduo borra de café solúvel industrial

	Economia de energia		Ganho financeiro
	(Gcal/ano)	Lenha (t/ano)	(1.000 R\$/ano)
Equivalência por economia e substituição energética	306.600	64.800	50.000,00
Redução de perdas na produção	5.400	7.000	5.000,00
Economia de matéria prima (argila)	-	-	3.200,00
Total	312.000	71.800	58.200,00

Obs.: adição de resíduo: 5% m/m

Tabela 3. Economia de energia e ganhos financeiros na utilização do resíduo casca de arroz

	Economia de energia		Ganho financeiro
	(Gcal/ano)	Lenha (t/ano)	(1.000 R\$/ano)
Equivalência por economia e substituição energética	500.000	105.000	81.400,00
Redução de perdas na produção	30.000	40.000	30.000,00
Economia de matéria prima (argila)	-	-	7.000,00
Total	530.000	145.000	118.400,00

Obs.: adição de resíduo: 2% m/m

Tabela 4. Economia de energia e ganhos financeiros na utilização do resíduo casca de amendoim

	Economia de energia		Ganho financeiro
	(Gcal/ano)	Lenha (t/ano)	(1.000 R\$/ano)
Equivalência por economia e substituição energética	532.000	112.500	86.500,00
Redução de perdas na produção	3.700	5.000	4.000,00
Economia de matéria prima (argila)	-	-	6.500,00
Total	535.700	117.500	97.000,00

Obs.: adição de resíduo: 15% m/m

6. CONCLUSÃO

A utilização de borra industrial de café, da casca de arroz e da casca de amendoim no processo de fabricação de blocos e tijolos cerâmicos pode fornecer calor para a etapa de sinterização, economizando combustível no processo de queima das peças em fornos e também poupando matéria-prima. Portanto, trata-se de uma forma de simbiose industrial, pois proporciona um destino para resíduos que antes eram descartados a céu aberto e que, ao se decomporem, emitem gases de efeito estufa, sendo então considerado também como estratégia de mitigação para mudanças climáticas.

Considerando as economias de energia, o calor fornecido pelos resíduos avaliados neste estudo leva à redução do consumo de mais de 334 mil toneladas de lenha por ano, equivalente a mais de 1,5 milhões em Gcal. Em termos financeiros, somando os custos evitados com lenha e argila, além do aumento de produtividade obtido pela queima mais homogênea, os resíduos avaliados poderiam gerar economias de mais de 270 milhões de reais por ano para o setor de cerâmica vermelha em algumas regiões no Brasil. Do ponto de vista ambiental, a lenha poupada, se extraída de forma irregular, seria equivalente a cerca de 430 hectares de florestas, no bioma *hotspot* mata atlântica, além de outros ganhos ambientais, como a redução de depósitos de resíduos, poluição da água, proliferação de doenças, dentre outros.

Além desses benefícios, este modelo de gestão de estoques passivos adere às premissas do novo paradigma circular, uma vez que a oportunidade de crescimento não está vinculada à maior extração de matérias-primas; o que é passivo para uma empresa é ativo para outra; há uma extensão do ciclo de vida de um componente que antes era visto como resíduo; e possíveis incrementos em diferentes pontos da cadeia de valor.

Por outro lado, é necessário considerar que haveria custos na adaptação da infraestrutura cerâmica, mas estudos de viabilidade econômica devem ser conduzidos para estabelecer a real relação custo-benefício proporcionada por essa recuperação de resíduos, bem como os impactos ambientais evitados.

Por fim, o conjunto de benefícios ajuda o setor a se alinhar com vários acordos e tratados internacionais relativos à sustentabilidade, redução de emissões de gases de efeito estufa e proteção da biodiversidade, como o Pacto Global da ONU, a Agenda 2030, o Acordo de Paris e a Convenção sobre Diversidade Biológica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Tecnologia (INT), que disponibilizou a estrutura de seus laboratórios; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)/Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), que financiou a pesquisa; e a Renata Cândido, que iniciou os primeiros experimentos laboratoriais deste projeto no INT.

REFERÊNCIAS

- [1] Pimentel A B, Fontanetti A 2020. Circular economy. São Carlos: Federal University of São Carlos. <https://www.ppgadr.ufscar.br/pt-br/assets/arquivos/cartilhas/economia-circular.pdf>
- [2] Meadows D et al 1973. Limits to growth: a report for the Club of Rome project on the dilemma of humankind. São Paulo: Perspectiva.
- [3] Kirchherr J, Nan-Hua N Y, Schulze-Spüntrup F, Heerink M J, Hartley K 2023. Conceptualizing the circular economy (revisited): an analysis of 221 definitions. Resources, Conservation and Recycling 194.
- [4] Schwob M et al 2017. Overview of the red ceramic sector in Brazil. In: Red Ceramics. EELA Project in Brazil. Rio de Janeiro: National Institute of Technology.
- [5] INT 2017. Red ceramics: EELA Project in Brazil. Rio de Janeiro: National Institute of Technology. <https://biblioteca.int.gov.br/asp/prima-pdf.asp?codigoMidia=31&IndexSrv=1>
- [6] RAD 2023. Annual report on deforestation in Brazil 2023. São Paulo: MAPBIOMAS. <http://alerta.mapbiomas.org>
- [7] Menezes R R, Neves G A, Ferreira H C 2002. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 6, 2. <https://www.scielo.br/rbeaa/a/6vLG6Nh3xPkHkBJWk6p49YL/?format=html&lang=pt>
- [8] Monteiro S N, Vieira C M F, Carvalho E A 2005. Technological behavior of red ceramics incorporated with brick waste. Revista Matéria 4, 10.
- [9] Vieira C M F, Monteiro S N 2009. Incorporation of solid waste in red ceramics: an update review. Revista Matéria 3, 14. <https://www.scielo.br/j/rmat/a/4yTkPnmbXPZJqM9FMqPYW8y/?format=html&lang=en>
- [10] Quesada D E, Martinez-Garcia C, Martínez-Cartas M I, Cotes-Palomino M T, Pérez-Villarejo L 2011. The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. Applied Clay Science 52.
- [11] Dondi M, Marsigli M, Fabbri B 1997. Recycling of industrial and urban wastes in brick production: a review. Tile & Brick International 13, 3, 218.
- [12] Dondi M, Marsigli M, Fabbri B 1997. Recycling of industrial and urban wastes in brick production: a review "part 2". Tile & Brick International 13, 4, 302.
- [13] Santos L R O, Scarlet V, Barros J L, Martins M P, Yamaji F M 2013. Caracterização da biomassa utilizada em fornos cerâmicos. In: Anais do Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia Da Madeira de 2013. <https://proceedings.science/cbcm-2013/papers/caracterizacao-da-biomassa-utilizada-em-fornos-ceramicos?lang=pt-br>
- [14] Campos J S N, Oliveira M C R 2016. Caracterização da cadeia produtiva de processamento de biomassa residual para o setor de cerâmica vermelha em São José dos Pinhais, Paraná. Congresso Internacional de Biomassa.
- [15] Seyes O, Cortez L A B, Gómez E O, Braunbeck O 2000. Queima direta de gramínea. Projeto Integrado de Biomassa PIB. In: 3º Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas. http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000002200000200001&lng=en&nrm=abn
- [16] Lopes G A, Brito J O, Moura L F 2016. Uso energético de resíduos madeireiros na produção de cerâmicas no estado de São Paulo. Ciências Florestais 26, 2. <https://doi.org/10.5902/1980509822767>
- [17] Cruz M K 2011. Development, poverty and the environment in Seridó Potiguar. Natal, Brazil: Graduate Program in Social Sciences, Federal University of Rio Grande do Norte. https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/13636/1/DesenvolvimentoPobrezaMeio_Cruz_2011.pdf
- [18] ANICER 2014. Environmental guide. Red ceramics. Rio de Janeiro: National Association of the Ceramic Industry (ANICER) and Brazilian Support Service for Micro and Small Enterprises (SEBRAE).
- [19] Brundtland G H et al 1987. Our common future; by the world commission on environment and development. Oxford: Oxford University Press.
- [20] Frosch R A, Gallopoulos N E 1989. Strategies for manufacturing. Scientific American 189, 3, 152. <https://www.industrialecology.uni-freiburg.de>
- [21] Graedel T E, Allenby B R 1995. Industrial ecology. Englewood Cliffs: Prentice Hall. https://archive.org/details/industrialecolog0000grae_j8q9/page/n5/mode/2up
- [22] Jelinski L W, Graedel T E, Laudise R A, McCall D W, Patel C K N 1992. Industrial ecology: concepts and approaches. Proceedings of the National Academy of Sciences 89, 3. <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.89.3.793>
- [23] ANICER 2025. Dados do setor. Associação Nacional da Indústria de Cerâmica Vermelha. <https://www.anicer.com.br/anicer/setor>
- [24] Fonseca B S, Vilão A, Galhano C, Simão J A R 2014. Reusing coffee waste in manufacture of ceramics for construction. Advanced in Applied Ceramics 113, 3. <https://doi.org/10.1179/1743676113Y.0000000131>
- [25] Quaranta N, Caligaris M, Pelozo G, Césari A, Cristóbal A 2018. Use of wastes from the peanut industry in the manufacture of building materials. Argentina: WIT Press 179-187.
- [26] Sutas J, Mana A, Pitak L 2012. Effect of rice husk and rice husk ash to properties of bricks. Procedia Engineering 32.

- [27] Henriques Jr M F, Barreto A J B, Tapia R S E C 1991. Uso de turfa na massa cerâmica para a fabricação de tijolos vermelhos. Belo Horizonte: Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Cerâmica e III Iberoamericano de Cerâmica, Vidro e Refratário.
- [28] EPE 2025. balanço energético nacional 2025. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>
- [29] MMA 2018. Biomassa para energia: atualidades e perspectivas. https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/br/Livro_APNE_NE_AGO20.pdf
- [30] Ramírez C, Alberdi I, Bahamondez C, Freitas J 2021. Inventarios forestales nacionales de América Latina y el Caribe: hacia la armonización de la información forestal. Roma; FAO. https://snif.florestal.gov.br/images/pdf/publicacoes/Inventarios_Forestales_Nacionales_armonizacion_2021.pdf
- [31] Barzaghi L, Salge A 1982. Flexural strength and molding of clays. *Cerâmica* 28, 151, 15-17.
- [32] Mothé A V 2008. Use of blast furnace sludge in red ceramics. Campos dos Goytacazes: Master in Materials Engineering and Science, Center for Science and Technology, UENF.
- [33] Grigoletti G C 2001. Characterization of the environmental impacts of red ceramic industries in the state of Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Postgraduate Program in Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul. <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1753/000307557.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [34] Jovanovic M, Mujkanovic A, Tutic E 2018. Effects of coffee waste addition to brick clay "cavka". Sisak: 1st international conference holistic approach to environment.
- [35] ABICS 2021. Report on soluble coffee in Brazil. Brazilian Association of the Soluble Coffee Industry. <https://www.abics.com.br/informacoes>
- [36] Soares L S, Moris V A S, Yamaji F M, Paiva J M F 2015. Use of coffee grounds and sawdust residues in the molding of briquettes and evaluation of properties. *Matéria* 20, 02.
- [37] SPGG RS 2020. Socioeconomic Atlas of Rio Grande do Sul. 5th ed. Porto Alegre: Secretariat of Planning, Governance and Management of Rio Grande do Sul, Department of Government Planning. <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br>
- [38] Eifert E C 2009. Drying, storage, and processing of rice. Technical recommendations for irrigated rice farming in Mato Grosso do Sul. EMBRAPA Rice and Beans.
- [39] EPE 2014. Technical note DEA 15/14: energy inventory of rural waste. Rio de Janeiro: Energy Research Company. <https://www.epe.gov.br>
- [40] IBGE 2022. PNAD Contínua: indicadores de informalidade na construção civil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2022/05/apresentacao-pnadc-informalidade-cbic-11052022.pdf>
- [41] CONAB 2022. Produção de amendoim cresce mais de 100% nos últimos 8 anos. Companhia Nacional de Abastecimento.
- [42] FIESP 2021. Peanut agribusiness in Brazil: production, transformation and opportunities. Federation of Industries of the State of São Paulo.
- [43] Santos S T O, Vieira Jr C M, Silva A N, Nascimento Jr A F, Drummond A R F, Silva S P R 2020. Potencial energético do biocarvão de pirólise a partir da borra de café. *Brazilian Journal of Development* 6, 7. <http://doi.org/10.34117/bjdv6n7-492>
- [44] Garcia-Muñoz A F, Riaño-Luna C E 1999. Cellulose extraction from coffee grounds. *Cenicafé* 50, 3. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc050\(03\)205-214.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc050(03)205-214.pdf)
- [45] ABNT 10.004 2004. Solid waste: classification. Rio de Janeiro: Brazilian Association of Technical Standards.
- [46] Maciel F S, Holanda J N F, Loiola R L, Maciel L A R, Gonçalves V S 2020. Applicability of coffee grounds residue as an alternative raw material in obtaining ceramic material Rio Grande do Sul: 3rd South American Congress on Solid Waste and Sustainability. <http://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2020/XII-012.pdf>
- [47] Manni A, Haddar A E, Hassani I E A, Bouari A E, Sadik C 2019. Valorization of coffee waste with Moroccan clay to produce a porous red ceramics. *Bulletin of the Spanish Ceramics and Glass Society* 58, 5.
- [48] ABNT 15.270-1 2005. Ceramic components part 1: ceramic blocks for sealing masonry. Terminology and requirements. Rio de Janeiro: Brazilian Association of Technical Standards.
- [49] ABNT 15.270-2 2005. Ceramic components part 2: ceramic blocks for structural masonry. Terminology and requirements. Rio de Janeiro: Brazilian Association of Technical Standards.
- [50] Della V P, Kühn I, Hotza D 2005. Recycling of agro-industrial waste: rice husk ash as an alternative source of silica. *Cerâmica Industrial*.
- [51] Quirino W F, Vale A T, Andrade A P A, Abreu V L S, Azevedo A C S 2005. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. *Revista da Madeira* 89. <https://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/podercalorifico.pdf>
- [52] Diniz J, Cardoso A L, Stahl J A, Villetti M A, Martins A F 2004. Poder calorífico da casca de arroz, caroço de pêssego, serragem de eucalipto e de seus produtos de pirólise. *Ciência e Natura UFSM* 26, 2. <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/9674/5792>
- [53] Akgül M, Tozluoğlu A 2008. Utilizing peanut husk (*Arachis hypogaea* L.) in the manufacture of medium-density fiberboards. *Bioresource Technology* 99, 13.
- [54] Brasil 1998. Lei n° 9.605. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm
- [55] Brasil 1981. Lei n° 6.938. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/>
- [56] CONAMA 1997. Resolução n° 237. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental. https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=237

- [57] IBGE 2022. Systematic survey of agricultural production. Brazilian Institute of Geography and Statistics. <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>
- [58] Pareyn F et al 2018. Manual para escolha da biomassa combustível em indústrias de cerâmica vermelha no Nordeste. 1ª ed. Rio de Janeiro: INT/MCTI. https://anicerpro.com.br/wp-content/uploads/2018/06/Manual-da-Escolha-da-Biomassa-Combust%C3%ADvel-EELA_INT.pdf