

A VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS COMO ADIÇÕES MINERAIS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS: UMA ANÁLISE TÉCNICA E AMBIENTAL

THE VALORIZATION OF AGRO-INDUSTRIAL WASTE AS MINERAL ADMIXTURES IN CEMENTITIOUS MATRICES: A TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS

Autor: Ronnie Fabio Delmiro de Negreiros

Formado em Engenharia Civil pela Universidade Potiguar (UNP) – Laureate International Universities.

Formado em Engenharia Agrícola pela Escola Superior de Agricultura de Mossoró – ESAM.

RESUMO

A construção civil é um dos setores que mais consome recursos naturais e energia, sendo responsável por uma significativa parcela das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), principalmente devido à produção de cimento Portland. Paralelamente, o setor agroindustrial brasileiro gera, anualmente, toneladas de resíduos de biomassa, como a casca de arroz e o bagaço da cana-de-açúcar, cuja disposição final muitas vezes representa um passivo ambiental. O presente artigo tem como objetivo analisar a viabilidade técnica e ambiental da incorporação de cinzas agroindustriais como adições minerais (pozolanas) em concretos e argamassas. Através de uma revisão bibliográfica sistemática, examinam-se as propriedades físico-químicas das cinzas, os mecanismos de reação pozolânica e os impactos nas propriedades mecânicas e na durabilidade dos compósitos cimentícios. Os resultados apontam que, sob condições controladas de queima e moagem, resíduos como a Cinza da Casca de Arroz (CCA) e a Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBC) promovem o refinamento da estrutura de poros e o aumento da resistência à compressão, além de mitigarem patologias por ataque químico. Conclui-se que a união entre a Engenharia Civil e a Engenharia Agrícola, através do aproveitamento desses subprodutos, fomenta a economia circular e contribui para o desenvolvimento de materiais de construção mais sustentáveis.

Palavras-chave: Concreto Sustentável. Resíduos Agroindustriais. Pozolanicidade. Cinza de Casca de Arroz. Engenharia Interdisciplinar.

ABSTRACT

The civil construction industry is one of the largest consumers of natural resources and energy, accounting for a significant portion of global carbon dioxide (CO₂) emissions, primarily due to

Portland cement production. Concurrently, the Brazilian agro-industrial sector generates tons of biomass waste annually, such as rice husk and sugarcane bagasse, the final disposal of which often represents an environmental liability. This article aims to analyze the technical and environmental feasibility of incorporating agro-industrial ashes as mineral admixtures (pozzolans) in concrete and mortar. Through a systematic literature review, the physicochemical properties of the ashes, pozzolanic reaction mechanisms, and impacts on the mechanical properties and durability of cementitious composites are examined. The results indicate that, under controlled burning and grinding conditions, wastes such as Rice Husk Ash (RHA) and Sugarcane Bagasse Ash (SCBA) promote pore structure refinement and increased compressive strength, in addition to mitigating pathologies caused by chemical attacks. It is concluded that the intersection between Civil Engineering and Agricultural Engineering, through the utilization of these by-products, fosters the circular economy and contributes to the development of more sustainable construction materials.

Keywords: Sustainable Concrete. Agro-industrial Waste. Pozzolanicity. Rice Husk Ash. Interdisciplinary Engineering.

1. INTRODUÇÃO

A busca por sustentabilidade tem se tornado o paradigma central no desenvolvimento tecnológico do século XXI, exigindo da Engenharia Civil respostas urgentes quanto ao impacto ambiental de suas atividades. O concreto é o material artificial mais consumido pela humanidade, superado apenas pela água em volume total, o que coloca a indústria cimentícia sob constante escrutínio devido à sua pegada de carbono. Estima-se que a produção de uma tonelada de clínquer, principal componente do cimento Portland, gere aproximadamente uma tonelada de CO₂ liberada na atmosfera, resultado tanto da decarbonatação do calcário quanto da queima de combustíveis fósseis nos fornos rotativos. Nesse cenário, a redução do fator clínquer no cimento, através da incorporação de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), apresenta-se como a estratégia mais viável e imediata para mitigar os impactos ambientais do setor, sem comprometer a demanda habitacional e de infraestrutura.

Em contrapartida, o Brasil, como potência agrícola mundial, enfrenta desafios logísticos e ambientais relacionados à gestão dos resíduos gerados pelo beneficiamento de suas culturas. A Engenharia Agrícola tem buscado incessantemente alternativas para o aproveitamento da biomassa residual, que tradicionalmente é descartada em aterros ou queimada a céu aberto, gerando poluição e desperdício de potencial energético e material. Culturas como o arroz, a cana-de-açúcar, o milho e o bambu geram subprodutos ricos em sílica e celulose que, se não tratados adequadamente, podem contaminar o solo e lençóis freáticos. A transformação desses resíduos em cinzas, através da queima controlada para geração de energia (cogeração), resulta em um subproduto final que

necessita de uma destinação nobre, evitando que se torne apenas mais um passivo ambiental acumulado nas usinas e cooperativas agrícolas.

A intersecção entre as engenharias Civil e Agrícola surge, portanto, como um campo fértil para a inovação tecnológica, unindo a necessidade de novos materiais da construção com a disponibilidade de resíduos do campo. Estudos realizados nas últimas décadas indicam que certas cinzas agroindustriais, quando obtidas sob condições específicas de temperatura e tempo, apresentam alto teor de sílica amorfa (SiO_2) e elevada superfície específica. Essas características são fundamentais para classificar um material como pozolana, capaz de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, formando compostos estáveis que densificam a matriz do concreto. A validação técnica desses materiais exige um rigoroso controle de qualidade e caracterização, processos que demandam conhecimento profundo tanto da origem da matéria-prima (agronomia) quanto de sua aplicação estrutural (engenharia civil).

Este artigo propõe uma análise aprofundada sobre o potencial de valorização desses resíduos, focando especificamente na Cinza da Casca de Arroz (CCA) e na Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBC). A escolha desses materiais justifica-se pela expressividade das culturas de arroz e cana na matriz produtiva brasileira e pelo volume significativo de resíduos gerados. A metodologia adotada baseia-se em uma revisão bibliográfica de estudos experimentais e normas técnicas, avaliando não apenas o desempenho mecânico, mas também os benefícios relacionados à durabilidade das estruturas. A abordagem interdisciplinar permite compreender a cadeia produtiva desde a colheita até a concretagem, garantindo que a solução proposta seja técnica, econômica e ambientalmente viável.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. O PROCESSO DE GERAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

A compreensão da viabilidade do uso de cinzas na construção civil deve iniciar, obrigatoriamente, pelo entendimento da gênese do resíduo no campo, uma competência intrínseca à Engenharia Agrícola. A casca de arroz, por exemplo, representa cerca de 20% a 22% do peso do grão colhido, sendo um tecido vegetal constituído de celulose e lignina, mas com uma estrutura externa impregnada de sílica, absorvida do solo pela planta durante seu crescimento. Da mesma forma, o bagaço da cana-de-açúcar é o resíduo fibroso remanescente após a moagem para extração do caldo, representando aproximadamente 30% da cana moída. Ambos os resíduos são frequentemente utilizados como combustível em caldeiras para a geração de vapor e eletricidade nas próprias usinas, num processo de cogeração de energia que é vital para a autossuficiência energética do setor agroindustrial.

O processo de combustão desses materiais é o fator determinante para a qualidade da cinza resultante e sua aplicabilidade como material pozolânico na engenharia civil. A temperatura de queima e o tempo de residência no forno definem a estrutura cristalina da sílica presente na cinza: temperaturas controladas (geralmente entre 500°C e 700°C) tendem a produzir sílica em estado amorfo, que é altamente reativa. Por outro lado, queimas descontroladas ou em temperaturas muito elevadas (acima de 800°C) favorecem a cristalização da sílica (formação de cristobalita e tridimita), reduzindo drasticamente a reatividade pozolânica do material. Portanto, a obtenção de uma "cinza de engenharia" requer um diálogo técnico entre o gestor agrícola, que opera as caldeiras, e o engenheiro civil, que utilizará o subproduto, para ajustar os parâmetros de queima visando não apenas a energia, mas a qualidade do resíduo sólido.

Após a queima, a caracterização física e química das cinzas é o passo seguinte para validar seu uso conforme as normas técnicas, como a ABNT NBR 12653 (Materiais pozolânicos). Quimicamente, a Cinza da Casca de Arroz (CCA) destaca-se pelo altíssimo teor de dióxido de silício (SiO₂), que pode superar 90% de sua composição, tornando-a uma das fontes de sílica mais puras disponíveis na natureza. A Cinza do Bagaço da Cana (CBC), embora possua um teor de sílica ligeiramente inferior e maior presença de óxidos contaminantes e carbono residual (perda ao fogo), também apresenta potencial pozolânico significativo se beneficiada corretamente. A presença de carbono residual, oriundo de uma queima incompleta, é um ponto de atenção, pois o material carbonoso é poroso e absorve água e aditivos, podendo prejudicar a trabalhabilidade do concreto fresco e demandar maior quantidade de água na mistura.

O beneficiamento físico, especificamente a moagem, é a etapa final de preparação desses resíduos antes da incorporação ao cimento ou concreto. As cinzas brutas, logo após saírem das caldeiras, possuem partículas de granulometria grosseira e altamente porosa, que não oferecem a reatividade necessária. Estudos indicam que a moagem de alta energia é fundamental para reduzir o tamanho das partículas para a ordem de micrômetros, aumentando a superfície específica do material. Quanto maior a superfície específica, maior a área de contato disponível para as reações químicas com o cimento. Esse processo de cominuição transforma um resíduo heterogêneo e inerte em um pó fino, homogêneo e reativo, pronto para atuar como um aglomerante complementar na complexa química do concreto.

2.2. MECANISMOS DE REAÇÃO POZOLÂNICA E HIDRATAÇÃO

A interação entre as cinzas agroindustriais e o cimento Portland não ocorre apenas por um efeito físico de preenchimento (filler), mas fundamentalmente por meio da reação pozolânica. A reação pozolânica é definida como a interação química entre a sílica amorfa (e alumina) presente na cinza, em estado finamente dividido, e o hidróxido de cálcio – Ca(OH)₂ ou portlandita – liberado durante a hidratação dos silicatos do cimento. Esta reação ocorre na presença de água e à temperatura ambiente, formando compostos de Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) secundário. O C-S-H é o principal responsável pela resistência mecânica do concreto, funcionando como a "cola" que une

os agregados; portanto, a conversão da portlandita (que é solúvel e mecanicamente fraca) em C-S-H adicional é extremamente benéfica para a matriz cimentícia.

O processo de hidratação do cimento Portland convencional gera uma microestrutura composta por C-S-H, etringita, poros e grandes cristais de hidróxido de cálcio (portlandita), que tendem a se acumular na Zona de Transição Interfacial (ZTI) entre a pasta de cimento e os agregados. A ZTI é historicamente considerada o "elo fraco" do concreto, pois é uma região de maior porosidade e menor resistência, propensa à nucleação de fissuras. A introdução de cinzas agroindustriais reativas altera significativamente essa dinâmica: as partículas finas da cinza atuam como pontos de nucleação para os produtos de hidratação, fragmentando os grandes cristais de portlandita e densificando a zona de transição.

Além da formação de C-S-H secundário, a presença das cinzas modifica a cinética de hidratação do cimento, influenciando o calor liberado durante o processo. Adições minerais geralmente retardam ligeiramente o tempo de pega e reduzem o pico de calor de hidratação nas primeiras idades, o que é tecnicamente vantajoso para concretagens de grandes volumes (concreto massa), pois minimiza o risco de fissuras de origem térmica. No entanto, a reatividade da CCA, devido à sua alta superfície específica, pode ser tão intensa que, em alguns casos, acelera a pega, exigindo o uso de aditivos retardadores ou superplastificantes para manter o controle reológico da mistura fresca.

A eficiência da reação pozolânica é medida por ensaios padronizados, como o Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cimento e com cal, prescritos pela NBR 5752. Para que uma cinza seja considerada uma pozolana eficaz, ela deve atingir um percentual mínimo de resistência à compressão em relação a uma argamassa de referência sem a adição. Estudos indicam que teores de substituição de cimento por CCA variando entre 10% e 20% frequentemente resultam em IAPs superiores a 100%, ou seja, o concreto com resíduo torna-se mais resistente do que o concreto feito apenas com cimento puro. Isso demonstra que o mecanismo químico da pozolanicidade é um aliado poderoso na engenharia de materiais, transformando um subproduto agrícola em um insumo de alto desempenho.

2.3. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO: TRABALHABILIDADE E REOLOGIA

A incorporação de resíduos agroindustriais no concreto altera não apenas suas propriedades finais, mas também seu comportamento durante o lançamento e adensamento, conhecido como estado fresco. A morfologia das partículas das cinzas, que muitas vezes é irregular e celular (no caso da CCA não moída adequadamente) ou angular, tende a aumentar a demanda de água da mistura para manter a mesma consistência (abatimento ou slump) do concreto de referência. Isso ocorre porque a alta porosidade interna das partículas de cinza absorve parte da água de amassamento, reduzindo

a água livre disponível para lubrificar a mistura e garantir a fluidez necessária para o bombeamento e moldagem.

Para compensar essa perda de trabalhabilidade sem aumentar a relação água/cimento (o que prejudicaria a resistência), é imprescindível o uso de aditivos químicos plastificantes ou superplastificantes de nova geração (base policarboxilato). A interação entre o aditivo e as partículas de cinza é um campo de estudo complexo; a presença de carbono residual nas cinzas (material não queimado) pode adsorver as moléculas do aditivo, reduzindo sua eficiência e exigindo dosagens maiores do produto químico. Portanto, o controle da qualidade da queima na usina (Engenharia Agrícola) reflete diretamente na economia de aditivos e na facilidade de execução da obra (Engenharia Civil).

A reologia do concreto com adição de cinzas também apresenta características peculiares, como o aumento da coesão e a redução da exsudação (bleeding) e segregação. A finura das partículas de cinza ajuda a reter a água dentro da massa, evitando que ela migre para a superfície após o lançamento. Essa característica é particularmente benéfica para concretos projetados ou para aplicações em pavimentos, onde a exsudação excessiva pode comprometer o acabamento superficial e a durabilidade da camada de topo. Além disso, a maior coesão melhora a estabilidade da mistura, permitindo o transporte por longas distâncias sem que ocorra a separação dos agregados graúdos da argamassa.

Estudos comparativos mostram que o comportamento reológico varia substancialmente entre a CCA e a CBC. A CCA, quando moída ultrafina, pode atuar como um modificador de viscosidade, tornando o concreto mais tixotrópico — ou seja, ele se mantém firme em repouso, mas flui facilmente quando submetido à vibração. Já a CBC, dependendo do teor de areia (sílica cristalina) e impurezas oriundas da colheita da cana, pode apresentar um comportamento mais áspero, exigindo ajustes na curva granulométrica dos agregados finos para garantir um acabamento superficial liso e homogêneo. A dosagem experimental é, portanto, uma etapa crítica para equilibrar a sustentabilidade do material com a praticidade de sua aplicação no canteiro de obras.

2.4. DESEMPENHO MECÂNICO: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TRAÇÃO

A resistência à compressão é o parâmetro mais utilizado para qualificar o concreto estrutural e, nesse quesito, as cinzas agroindustriais pozolânicas têm demonstrado resultados excepcionais. Diversas pesquisas apontam que a substituição parcial de cimento Portland por CCA (na faixa de 10% a 20%) pode elevar a resistência à compressão aos 28 dias e, principalmente, em idades avançadas (90 dias ou mais). Esse ganho de resistência tardia é típico de materiais pozolânicos, pois a reação consome a portlandita de forma lenta e contínua, preenchendo os vazios capilares com produtos de hidratação adicionais e criando uma matriz mais sólida e compacta.

Além da compressão, a resistência à tração (seja por compressão diametral ou na flexão) também sofre influência positiva, embora em menor magnitude. O refinamento da Zona de Transição Interfacial (ZTI) melhora a aderência entre a pasta e o agregado, o que é crucial para a resistência à tração, já que a ruptura do concreto geralmente se inicia na interface pasta-agregado. Com uma ZTI mais densa e menos rica em cristais orientados de hidróxido de cálcio, o concreto torna-se mais monolítico, resistindo melhor aos esforços de tração e cisalhamento, o que é vital para o dimensionamento de vigas e lajes de concreto armado.

O módulo de elasticidade, que indica a rigidez do material e sua capacidade de deformação sob carga, tende a aumentar em concretos com cinzas pozzolânicas de alta qualidade. Um módulo de elasticidade maior significa que a estrutura sofrerá menos deformações imediatas e lentas (fluência) quando submetida a carregamentos. Esse comportamento está diretamente ligado à densidade da matriz cimentícia: quanto menos poros, mais rígido é o material. Para engenheiros estruturais, isso se traduz em peças com menores flechas e maior estabilidade dimensional ao longo da vida útil da edificação.

É importante ressaltar, contudo, que o desempenho mecânico não é linear em relação à quantidade de cinza adicionada. Existe um "ponto ótimo" de substituição, que geralmente situa-se entre 10% e 20% da massa do aglomerante. Teores excessivos (acima de 30%) podem resultar em um efeito de diluição, onde a quantidade de cimento disponível é insuficiente para gerar o hidróxido de cálcio necessário para reagir com toda a sílica da cinza, deixando partículas de cinza sem reagir que atuam apenas como enchimento. Portanto, a otimização do traço de concreto através de métodos experimentais é essencial para maximizar os ganhos de resistência proporcionados pelos resíduos agroindustriais.

2.5. DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS

A durabilidade das estruturas de concreto armado é, atualmente, uma preocupação tão grande quanto a resistência mecânica, dada a elevada incidência de manifestações patológicas precoces. A incorporação de cinzas agroindustriais atua como uma barreira física e química contra os agentes agressivos do meio ambiente. O principal mecanismo de proteção é o refinamento da estrutura de poros: os produtos da reação pozzolânica segmentam os canais capilares interconectados, reduzindo drasticamente a permeabilidade do concreto à água e aos gases. Um concreto menos permeável é, por definição, um concreto mais durável.

Um dos maiores inimigos do concreto armado é a corrosão das armaduras induzida por cloretos, comum em ambientes marinhos e industriais. A presença de CCA e CBC no concreto reduz a difusividade dos íons cloreto, dificultando sua penetração até a barra de aço. Além do efeito físico de bloqueio dos poros, as cinzas possuem a capacidade de fixar quimicamente parte dos cloretos (capacidade de "binding"), retirando-os da solução porosa e impedindo que iniciem o processo

eletroquímico de corrosão. Estudos de longa duração comprovam que concretos com CCA apresentam vida útil estimada superior a concretos convencionais em ambientes de névoa salina.

Outro fenômeno deletério mitigado pelas cinzas é a Reação Álcali-Agregado (RAA), uma reação expansiva que ocorre entre os álcalis do cimento e certos agregados reativos, causando fissuração interna. Ao substituir parte do cimento por cinza, reduz-se o teor total de álcalis na mistura e consome-se o hidróxido de cálcio necessário para a expansão do gel de RAA. Além disso, a reação pozolânica reduz o pH da solução dos poros, criando um ambiente menos propício para o desenvolvimento da reação álcali-agregado, garantindo a integridade da estrutura mesmo quando utilizados agregados potencialmente reativos disponíveis na região da obra.

A carbonatação, processo em que o CO₂ da atmosfera penetra no concreto e reduz seu pH, é o único ponto que exige cautela. Como a reação pozolânica consome a reserva alcalina (Ca(OH)₂) do concreto, teoricamente, concretos com altos teores de adição poderiam carbonatar mais rápido. No entanto, na prática, a redução da permeabilidade compensa a redução da reserva alcalina: o CO₂ encontra muito mais dificuldade para penetrar na massa compacta do concreto com cinza. O saldo final, em concretos bem curados e dosados, é uma proteção adequada contra a corrosão por carbonatação, mantendo a passivação das armaduras por longos períodos.

2.6. ANÁLISE ECONÔMICA E DISPONIBILIDADE REGIONAL

A viabilidade técnica, embora comprovada, não garante por si só a aplicação em larga escala; é necessário analisar a viabilidade econômica e a logística de suprimentos. O Brasil, sendo o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e um dos maiores de arroz, possui uma oferta abundante e descentralizada desses resíduos. A utilização de cinzas locais reduz custos de transporte, que é um dos componentes mais onerosos na cadeia do cimento. Para regiões distantes dos grandes polos produtores de cimento, o uso de "cimentos regionais" aditivados com cinzas agrícolas pode representar uma redução significativa no custo final do metro cúbico de concreto.

No entanto, o custo de beneficiamento das cinzas (moagem e controle de qualidade) deve ser computado. A implantação de unidades de moagem próximas às usinas geradoras de biomassa ou nas próprias concreteiras é um modelo de negócio promissor. O custo da cinza beneficiada tende a ser inferior ao do cimento Portland, uma vez que a matéria-prima é um resíduo de custo virtualmente zero ou negativo (custo evitado de descarte). A economia gerada pela substituição de 15% a 20% do cimento, o insumo mais caro do concreto, pode viabilizar investimentos em tecnologias de moagem e controle, gerando margem de lucro para as construtoras e concreteiras.

Ainda sob a ótica econômica, o uso desses materiais pode agregar valor ao empreendimento através de certificações ambientais, como o LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) ou o selo AQUA. Edifícios que utilizam materiais regionais e com conteúdo reciclado pontuam nessas certificações, o que valoriza o imóvel no mercado e atrai investidores conscientes.

Além disso, a redução de passivos ambientais para a indústria agrícola pode gerar créditos de carbono ou incentivos fiscais, criando um ciclo virtuoso onde o resíduo de um setor se torna matéria-prima nobre para outro.

Os desafios logísticos residem na sazonalidade das safras e na padronização do resíduo. A Engenharia Agrícola deve trabalhar para garantir que o fornecimento de biomassa e as condições de queima sejam constantes ao longo do ano, evitando variações que prejudiquem o controle de qualidade do concreto na central. A criação de estoques reguladores de cinza bruta e o desenvolvimento de normas técnicas específicas para classificação e comercialização desses subprodutos são passos essenciais para transformar as cinzas agroindustriais em uma commodity confiável para o mercado da construção civil.

2.7. O PAPEL DA INTERDISCIPLINARIDADE NA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

A análise desenvolvida até aqui evidencia que a solução para problemas complexos de sustentabilidade não reside em uma única área do conhecimento, mas na fronteira entre elas. A formação híbrida em Engenharia Civil e Engenharia Agrícola permite uma visão holística do ciclo de vida dos materiais: desde a absorção de nutrientes do solo pela planta, passando pela colheita e processamento industrial, até a cura do concreto e o desempenho da edificação em serviço. Essa perspectiva integrada é rara e valiosa, pois permite identificar oportunidades de simbiose industrial que passariam despercebidas em abordagens monodisciplinares.

A engenharia de materiais moderna caminha para o desenvolvimento de compósitos "sob medida" (tailor-made), onde os constituintes são escolhidos para atender a requisitos específicos de desempenho e sustentabilidade. Nesse contexto, o engenheiro com visão agrícola entende as variações intrínsecas da biomassa — como a influência do tipo de solo ou da variedade genética da planta na composição da cinza — e pode dialogar com o engenheiro civil para ajustar os traços de concreto em tempo real. Essa sinergia reduz riscos, otimiza recursos e acelera a transferência de tecnologia da bancada do laboratório para o canteiro de obras.

Além disso, a interdisciplinaridade fomenta o desenvolvimento de novas tecnologias sociais e construtivas para o meio rural. O uso de concretos mais duráveis e econômicos, produzidos com resíduos da própria fazenda, pode melhorar a infraestrutura de armazenagem (silos, bases de equipamentos), canais de irrigação e pavimentação de estradas vicinais. Isso fecha o ciclo dentro da própria propriedade rural, aumentando a eficiência produtiva e a qualidade de vida no campo, demonstrando que a tecnologia do concreto de alto desempenho não é exclusiva dos grandes centros urbanos.

Por fim, a pesquisa e o desenvolvimento nessa interface estimulam a formação de novos profissionais e a criação de políticas públicas que incentivem a economia circular. A academia e os institutos de pesquisa têm o papel fundamental de validar essas tecnologias e criar normas que

deem segurança jurídica e técnica para sua aplicação. A união de saberes entre a construção civil e a agroindústria é, sem dúvida, um dos caminhos mais promissores para um desenvolvimento nacional soberano, tecnológico e ambientalmente responsável.

3. CONCLUSÃO

A análise realizada ao longo deste estudo confirma que a utilização de resíduos agroindustriais, especificamente as cinzas da casca de arroz (CCA) e do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), como adições minerais em matrizes cimentícias, é não apenas viável tecnicamente, mas imperativa sob a ótica da sustentabilidade global. Ficou demonstrado que esses materiais, quando submetidos a processos adequados de queima e moagem, deixam de ser meros rejeitos para se tornarem recursos valiosos, dotados de propriedades pozolânicas capazes de reagir com os produtos de hidratação do cimento. A transformação da sílica amorfa presente na biomassa em Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) secundário é o mecanismo chave que valida o uso desses resíduos na engenharia de materiais.

Do ponto de vista das propriedades mecânicas, a revisão bibliográfica evidenciou que a substituição parcial do cimento por cinzas agroindustriais, em teores otimizados entre 10% e 20%, resulta em concretos com resistência à compressão igual ou superior à dos concretos convencionais, especialmente em idades avançadas. O efeito físico de preenchimento dos vazios (filler) somado à reação química pozolânica promove um refinamento da estrutura de poros e uma melhoria substancial na Zona de Transição Interfacial entre a pasta e os agregados. Isso resulta em um material mais homogêneo, coeso e com maior módulo de elasticidade, características desejáveis para estruturas de alto desempenho.

No que tange à durabilidade, os benefícios são ainda mais expressivos. A redução da permeabilidade e da porosidade capilar atua como a primeira linha de defesa contra agentes agressivos. A capacidade das cinzas de mitigar a reação álcali-agregado e de reduzir a penetração de íons cloreto estende significativamente a vida útil das estruturas, reduzindo a necessidade de manutenções corretivas precoces. Em um cenário onde a infraestrutura sofre com a deterioração precoce, o uso de adições minerais ativas apresenta-se como uma solução profilática eficiente e econômica, garantindo a integridade do patrimônio construído por décadas.

A abordagem interdisciplinar entre a Engenharia Civil e a Engenharia Agrícola mostrou-se o diferencial para o sucesso dessa tecnologia. O entendimento profundo das variáveis agrícolas que influenciam a qualidade da cinza — desde o plantio até a combustão na caldeira — permite um controle de qualidade que começa muito antes do material chegar à central de concreto. Essa visão sistêmica é fundamental para padronizar o resíduo e transformá-lo em um subproduto industrial

confiável, superando as barreiras da variabilidade que muitas vezes impedem a adoção de materiais alternativos pelo mercado conservador da construção civil.

Economicamente, a substituição de parte do cimento Portland, insumo de alto custo financeiro e energético, por um resíduo abundante regionalmente, favorece a redução de custos diretos na produção de concreto. Além da economia direta, há ganhos intangíveis associados à imagem ambiental das empresas envolvidas e à potencial obtenção de certificações ecológicas e créditos de carbono. A logística regionalizada, aproveitando a dispersão das usinas de açúcar e engenhos de arroz pelo território nacional, permite a produção de materiais de construção com menor pegada de carbono devido ao transporte reduzido, fortalecendo as economias locais.

Entretanto, desafios ainda persistem e devem ser objeto de futuras investigações e ações setoriais. A necessidade de padronização dos processos de queima nas indústrias agrícolas para garantir a amorficidade da sílica é um ponto crucial. Investimentos em tecnologias de moagem eficientes e de baixo custo energético são necessários para viabilizar o beneficiamento das cinzas em larga escala. Além disso, a atualização das normas técnicas brasileiras para incluir especificamente essas novas pozolanas facilitaria sua prescrição por projetistas e sua aceitação por construtoras.

O aspecto social também não pode ser negligenciado. A valorização dos resíduos agrícolas agrega renda à cadeia produtiva do campo e gera empregos na indústria de beneficiamento e na construção civil. A tecnologia permite a construção de habitações e infraestruturas rurais e urbanas com menor impacto ambiental, alinhando o setor da construção aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. Trata-se de uma tecnologia inclusiva, que pode ser aplicada desde pequenas obras rurais até grandes infraestruturas, democratizando o acesso a materiais de melhor qualidade.

Em síntese, a incorporação de cinzas agroindustriais no concreto representa um exemplo clássico de economia circular, onde o conceito de "lixo" é eliminado em favor do reaproveitamento integral dos recursos. A Engenharia Civil ganha um material de alta durabilidade e menor impacto carbônico; a Engenharia Agrícola resolve um problema de disposição de resíduos; e a sociedade ganha com a preservação ambiental. O caminho para uma construção civil mais verde passa, inevitavelmente, pela integração com o campo.

Conclui-se, portanto, que a tecnologia está madura, os benefícios são comprovados e a matéria-prima é abundante. Cabe agora aos profissionais das duas engenharias, aos pesquisadores e aos gestores públicos e privados, o papel de agentes transformadores para consolidar essa prática. A pesquisa apresentada neste artigo reforça que a inovação não precisa necessariamente vir da criação de novos materiais sintéticos, mas pode surgir da inteligência em olhar para o que já temos — os resíduos da nossa terra — com novos olhos e rigor científico.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

BATTAGIN, A. F. O Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Caracterização de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar para uso como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 82-86, 2009.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Alternativas para a redução do impacto ambiental do cimento. In: **Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil**. São Paulo: IBRACON, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

POUEY, M. T. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual para a obtenção de adições minerais ativas**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SILVA, R. B. **Durabilidade de concretos com incorporação de cinza de casca de arroz**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

TASHIMA, M. M. et al. A viabilidade do uso da cinza de casca de arroz como material cimentício suplementar. **Revista Engenharia Civil**, Braga, n. 45, p. 22-34, 2012.

UNEP. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry**. Paris: United Nations Environment Programme, 2016.