

Utilização de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material de preenchimento estrutural ou pozolânico para a produção de argamassas cimentícias: uma revisão

Utilization of sugarcane bagasse ashes as filler or pozzolanic material for the cementitious mortar production: a review

Wdyelle Elcine de Carvalho Matos¹, Hitalo de Jesus Bezerra da Silva²,
Gilvan Moreira da Paz¹, Valdeci Bosco dos Santos^{1,3}

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Campus Teresina Central, Praça da Liberdade Nº 1597, CEP: 64000-040, Teresina - PI, Brasil.

²Universidade Federal do Piauí, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Av. Universitária S/Nº, Ininga, CEP: 64049-550, Teresina - PI, Brasil.

³Universidade Federal do Piauí, Departamento de Engenharia dos Materiais, Av. Universitária S/Nº, Ininga, CEP: 64049-550, Teresina - PI, Brasil.

e-mail: wdyellecarvalho@gmail.com, hitalo.ufpi@gmail.com, gilvan@ifpi.edu.br, valdecisantos@ufpi.edu.br

RESUMO

Cinzas da queima do bagaço de cana-de-açúcar são materiais renováveis alternativos no desenvolvimento de produtos sustentáveis na construção civil. Contêm alto percentual de sílica, sendo úteis como material de preenchimento físico ou pozolânico. Nesse contexto, este trabalho teve por objetivo realizar um estudo prospectivo sobre as argamassas cimentícias contendo cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, considerando a substituição parcial tanto da areia quanto a do cimento. O estudo foi realizado através de uma revisão de literatura (artigos e patentes) até março de 2021. A busca por artigos foi realizada nas bases de dados *Scopus*, *Web of Science* e *Scielo* e, para patentes, Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), do Brasil, Patentes Públicas da América Latina e Espanha (LATIPAT), *United States Patent and Trademark Office*, *Espacenet* e *Patentscope*. Foram utilizadas as seguintes palavras-chave: *mortar*, *bagasse*, *ash* and *sugarcane*. Para as bases de dados INPI e LATIPAT, as mesmas palavras em português. Por meio desta metodologia de busca foram obtidos 427 artigos científicos e 12 patentes. Após análise criteriosa destes documentos, foram selecionados 34 artigos e nenhuma patente pertinente ao tema proposto. Nessas referências, as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar foram utilizadas em substituições de 7,5-40% para areia e 5-20% para cimento. As cinzas contribuíram para melhorar as propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade das argamassas de cimento, sendo que as substituições por cimento são as mais usadas. Os artigos destacaram que diferentes tipos de tratamentos empregados para as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar melhoram sua pozolanicidade. O reaproveitamento desses resíduos agroindustriais é uma estratégia interessante e promissora para contribuir com a sustentabilidade ambiental, além de poder elaborar produtos da construção civil com propriedades superiores àqueles sem presença de cinzas, e a baixo custo.

Palavras-chave: Resíduos agroindustriais. Argamassas. Areia. Cimento. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Sugarcane bagasse burning ashes are alternative renewable materials in the development of sustainable products in civil construction industry. They contain a high percentage of silica, being useful as filler or pozzolanic material. In this context, this work aimed to carry out a prospective study on cementitious mortars containing sugarcane bagasse ashes considering both sand and cement partial replacement. The study accomplished a literature review (articles and patents) until March 2021. The search for articles was carried

out in the Scopus, Web of Science and Scielo databases, and for patents, National Institute of Industrial Property (INPI), from Brazil, Public Patents in Latin America and Spain (LATIPAT), United States Patent and Trademark Office, Espacenet and Patentscope. The following keywords were used: mortar, bagasse, ash and sugarcane. For the INPI and LATIPAT databases the same words in Portuguese. Through this search methodology, 427 scientific articles and 12 patents were obtained. After a careful analysis of these documents, 34 articles and no patent relevant to the proposed theme were selected. In these references, sugarcane bagasse ashes were used in replacements of 7.5-40% for sand and 5-20% for cement. The ashes contributed to improve the rheological and mechanical properties and durability of cement mortars, with cement replacements being the most used. The articles highlighted that different types of treatment used for sugarcane bagasse ashes improved their pozzolanicity. The reuse of these agro-industrial wastes is an interesting and promising strategy to contribute to environmental sustainability, in addition to being able to produce civil construction products with superior properties to those without the presence of ashes, and at low cost.

Keywords: Agro-industrial wastes. Mortars. Sand. Cement. Mechanical properties.

1. INTRODUÇÃO

O setor de construção civil é considerado de fundamental importância para o desenvolvimento da economia mundial, respondendo pela criação de produtos e serviços essenciais, assim como contribuindo para a geração de empregos. No Brasil, esse setor representa cerca de 5% do Produto Interno Bruto (PIB) [1]. Por outro lado, suas atividades produzem por ano cerca de 213,5 kg de entulho por habitante, referente aos resíduos de construções e demolições [2], sendo também responsável por 34% do consumo mundial de água. Além disso, a indústria explora grande quantidade de matérias-primas naturais e possui ainda uma alta demanda de energia para exercer suas atividades, assim como liberar grandes quantidades de gás carbônico no processo de produção do cimento [3-5].

Nos últimos anos, este mesmo setor industrial tem buscado alternativas sustentáveis através do uso de resíduos diversos (urbanos, agroindustriais e industriais) [6-12] em compósitos cimentícios. Essas alternativas têm trazido soluções para a redução de impactos ambientais, uma vez que minimiza tanto o volume de consumo de matérias-primas naturais quanto a geração de CO₂ oriundo da produção cimentícia [13, 14]. Nesse sentido, estes materiais têm sido reaproveitados em diversos produtos da construção civil (pastas, tijolos, argamassas cimentícias e concreto) como um tipo de matéria-prima renovável. Além de contribuírem para a sustentabilidade ambiental, também atuam efetivamente na forma de um reforço mecânico [5, 15], material cimentício suplementar [7, 16, 17], e efeito *filler* (preenchimento de vazios entre partículas) [18, 19]. Dentre os resíduos oriundos de diferentes atividades, os agroindustriais mais utilizados em construções têm sido fibras naturais (coco, carnaúba, sisal e juta) [3, 20-24], resíduos de carvão vegetal [25], cinzas de cascas de arroz [26, 27] e cinzas do bagaço de cana-de-açúcar [28-30].

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), seguido pela Índia e China [31]. Para a safra brasileira atual (2020/21), estima-se que serão produzidas 665.105 mil toneladas de cana-de-açúcar. As regiões responsáveis pelas maiores produções estão localizadas no centro sul, responsáveis por aproximadamente 92% da safra, seguida da região norte e nordeste, as quais juntas contribuem com 8% da safra nacional [31]. Dos seus subprodutos, o bagaço é um dos mais atrativos e, para cada tonelada de cana processada para produção de açúcar e etanol, estima-se a geração de aproximadamente 250 a 300 kg de bagaço [32], que poderia ser aproveitado como biomassa no processo de queima para o aquecimento de caldeiras, geração de energia elétrica e vapor [33, 34].

Estudos afirmam que cada tonelada de cana-de-açúcar gera aproximadamente 6 kg de cinzas [30, 35, 36]. Com base na produção anual (safra 2019/20) de 642.717,8 mil toneladas de cana produzida [31], estima-se que foram geradas aproximadamente 4 mil toneladas de cinzas no país. Tradicionalmente, uma parte das cinzas é devolvida ao solo de plantio da cana na forma de fertilizante e outra parte descartada em aterros, não tendo outra finalidade na cadeia produtiva [19, 28, 37]. Na Figura 1 é apresentado um diagrama simplificado das etapas de origem, processamento e geração dos subprodutos da cana-de-açúcar.

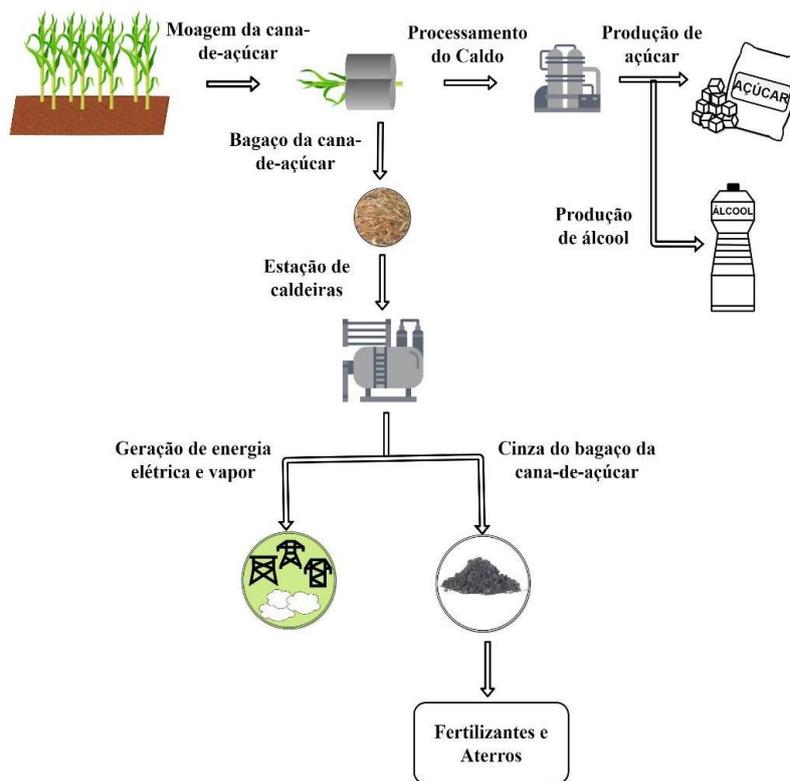


Figura 1: Etapas de processamento e obtenção dos subprodutos da cana-de-açúcar.

Tendo em vista o grande volume de resíduos gerados, alguns trabalhos [38-41] têm sido realizados para propor novas alternativas de aproveitamento do bagaço e das cinzas de cana-de-açúcar. O empenho para o desenvolvimento de tecnologias que reintegrem esses materiais à cadeia produtiva é notável, especialmente por colaborar com a redução do impacto ambiental da indústria sucroalcooleira, bem como de eventuais custos relacionados ao tratamento e descarte adequados dos resíduos e, por fim, gerar riquezas [16, 42].

A Figura 2 mostra os maiores produtores mundiais de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar. Os países com maior percentual de geração de cinzas são o Brasil, a Índia e a China, respectivamente. Os três países, unidos, são responsáveis por aproximadamente 85% do total de resíduos gerados [16, 31, 43, 44].

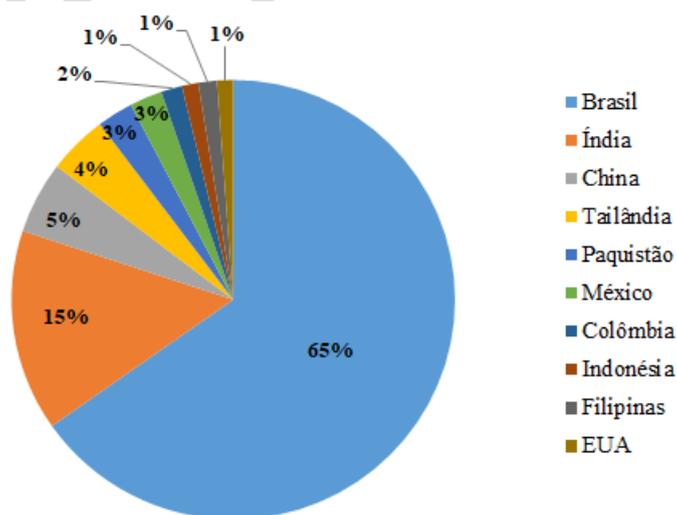


Figura 2: Maiores produtores mundiais de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar.

Resíduos de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar são caracterizados por apresentarem grandes quantidades de SiO_2 e outros óxidos (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , dentre outros) em pequenas quantidades [14, 19, 40, 45]. A porcentagem de sílica presente nestas cinzas pode ser proveniente da absorção das raízes, na forma de ácido monossilícico, como do quartzo (SiO_2) presente na areia residual, oriunda da lavoura que não foi totalmente removida durante a lavagem da cana-de-açúcar [46-48].

Durante o processo de combustão do bagaço, a temperatura das caldeiras (300°C a 1.000°C) pode produzir cinzas com diferentes tonalidades de cor [49], bem como determinará o aparecimento das diferentes fases estruturais (amorfa ou cristalina) de sílica [13, 47]. Além da temperatura, o tempo de queima também pode afetar a forma estrutural, a quantidade e as características físicas da sílica [48, 50].

Cinzas produzidas em altas temperaturas (> 800°C) e tempos de queima longos apresentam alto teor de sílica (88,2 – 96,2%) em forma de quartzo (cristalina), sendo consideradas ideais para aplicação em compostos cimentícios, substituindo o agregado fino [19, 43, 51]. Nesse sentido, atuam fisicamente no empacotamento granulométrico (efeito *filler*) por apresentarem partículas de diâmetros menores, que são favoráveis à redução da estrutura de poros [18, 19]. Por outro lado, cinzas obtidas em temperaturas entre 500° e 600°C apresentam estrutura amorfa e valores acima de 60% (em massa) de SiO_2 em sua composição, justificando o seu uso em substituição ao cimento [14, 33, 52].

A pozolanicidade das cinzas depende do teor de outros óxidos presentes, da estrutura amorfa e da finura de seus grãos [53-55]. Além disso, é primordial que as cinzas apresentem uma distribuição granulométrica homogênea, passando por um processo de moagem para modificar a sua característica física inicial, tornando-a mais uniforme, e assim podendo ser empregada em compostos cimentícios [37, 54, 55]. Na presença de água e temperatura ambiente, as fases da pozolana irão reagir com o hidróxido de cálcio do cimento Portland e formar compostos (silicatos estáveis) com propriedades cimentícias [52, 56]. Dessa forma, o uso de cinzas de biomassa em materiais cimentícios melhora positivamente as propriedades mecânicas e de durabilidade, devido a seu efeito de preenchimento e a sua atividade pozolânica [57].

É importante ressaltar que a quantidade presente de sílica na agricultura varia entre as espécies de plantas, período de colheita, estação do ano, natureza do solo e geografia do local da plantação. Dessa forma, a pesquisa sobre a eficiência dos resíduos produzidos a partir de matéria-prima local ou regional, assim como das condições de processamento, ainda se fazem necessárias [54, 58, 59]. Considerando a importância do reaproveitamento das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, haja visto todos os fatores citados anteriormente, o presente trabalho teve por objetivo realizar um estudo prospectivo sobre as argamassas cimentícias contendo cinzas do bagaço de cana-de-açúcar avaliando a substituição (parcial) tanto da areia quanto a do cimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A prospecção científica e tecnológica foi realizada envolvendo a temática da utilização de cinzas provenientes da queima de bagaço de cana-de-açúcar aplicadas à produção de argamassas cimentícias. O estudo foi desenvolvido em março de 2021. Não se adotou critério de exclusão no momento da busca nas bases analisadas até a data pesquisada. As bases de dados utilizadas foram: *Scopus*, *Web of Science e Scientific Electronic Library Online* (SciELO), para documentos científicos; e Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) do Brasil, Patentes Públicas da América Latina e Espanha (LATIPAT), *United States Patent and Trademark Office* (USPTO), Espacenet e Patentscope, para a busca de patentes. As palavras-chave empregadas para a pesquisa dos dados nas bases do INPI e LATIPAT foram “argamassa”, “bagaço”, “cinza”, “cana-de-açúcar”; e também “mortar”, “bagasse”, “ash” e “sugarcane”, para as demais bases. Os termos de mesmo idioma foram combinados e utilizados nos campos de busca de título e/ou resumo das bases de artigos e patentes.

3. RESULTADOS

Através do levantamento realizado nas bases de artigos científicos e patentes foi possível determinar os resultados que relacionam a utilização de cinzas do cana-de-açúcar aplicadas à produção de argamassa. A Tabela 1 apresenta a relação entre as três diferentes combinações de palavras-chave utilizadas e o número de resultados reportados, de acordo com as bases: *Scopus* (200), *Web of Science* (203) e SciELO (24). Do total de 427 documentos analisados, apenas 34 demonstraram ser pertinentes à pesquisa, após processo de triagem. Estes 34 artigos estão descritos de forma resumida na Tabela 2, que apresenta alguns dos principais parâmetros (material substituído, tratamentos (químicos/físicos) empregados, e teor/melhor teor de

substituição de sílica) utilizados para a preparação das argamassas com cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, associados ou não a outros componentes.

Tabela 1: Relação entre palavras-chave e resultados reportados pelas bases de documentos científicos.

PALAVRAS-CHAVE	SCOPUS	WEB OF SCIENCE	SCIELO
mortar and ash and sugarcane/ argamassa and cinza and cana-de-açúcar	69	66	8
mortar and bagasse and sugarcane/ argamassa and bagaço and cana-de-açúcar	70	72	8
mortar and bagasse and ash and sugarcane/ argamassa and bagaço and cinza and cana-de-açúcar	61	65	8

Tabela 2: Artigos reportados que utilizam as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como substituto (areia ou cimento) parcial em argamassas e seus parâmetros experimentais.

MATÉRIA PRIMA	MATERIAL SUBSTITUÍDO	PROCESSOS DE TRATAMENTO	TEOR DE SÍLICA	MELHOR TEOR DE SUBSTITUIÇÃO	REFERÊNCIAS
CBC	Areia	Secagem (100 °C/24h), peneiramento e moagem	NE	30,00%	[37]
CBC e aditivo	Areia	Secagem (100°C), Peneiramento, Moagem e Recalcinação (300°C/3h e 600°C/3h)	75,10%	7,50%	[42]
CBC e EAF	Areia	Peneiramento	80,80%	NE	[43]
CBC, <i>filler</i> e aditivo	Areia	Peneiramento	NE	40,00%	[60]
CBC e aditivo plastificante	Areia	Secagem (110°C/24h), Secagem natural (24h) e moagem	36,58%	10,00%	[61]
CBC e aditivo	Areia	Peneiramento	97,90%	40,00%	[62]
CBC, FB, areia de bagaço, FPVA e CV	Areia	Sem tratamento	NE	5,00% CV + 2,00% FB ou 5,00% CBC + 2,00% FB	[63]
CBC e CCA	Cimento	NE	55,70% (CBC) 87,10% (CCA)	15,00% CBC 20,00% CCA	[15]
CBC, CCA e CEU	Cimento	Secagem (50 °C) Peneiramento e moagem	87,60 % (CCA) 44,90% (CBC) 9,00% (CEU)	30,00% CCA + 10,00% CBC ou 30,00% CCA + 10,00% CEU	[16]
CBC e CP	Cimento	Secagem e peneiramento	63,61 % CP 84,86% CBC	15,00%	[29]
CBC e CI	Cimento	Moagem	74,00%	15,00% CBC + 5,00% CI	[38]
CBC	Cimento	Tratamento químico (NaOH - hidróxido de sódio; e HCl - ácido clorídrico)	84,10 %	5,00%	[40]
CBC	Cimento	Tratamento químico (HCl - ácido)	74,00 a 80,00% de	5,00%	[41]

		clorídrico) em diferentes concentrações e calcinações (tempos e temperaturas)	SiO ₂ (0,1 M HCl)		
CBC	Cimento	Peneiramento	59,56%	10,00%	[45]
CBC e CB	Cimento	Calcinação e peneiramento	36,20%	20,00%	[48]
CBC	Cimento	Moagem	50,62%; 64,18%	NE	[50]
CBC	Cimento	Secagem no forno	78,49%	5,00 %	[51]
CBC	Cimento	Calcinação, secagem e peneiramento	56,62%	5,00%	[53]
CBC	Cimento	Lavagem e secagem	69,33%	10,00% (a/c = 0,45) 15,00% (a/c = 0,50) 15,00% (a/c = 0,55)	[64]
CBC	Cimento	Sem tratamento	54,40%; 59,87%; 58,35%	10,00%	[65]
CBC	Cimento	Moagem	83,71%	10,00%	[66]
CBC e CV	Cimento	Secagem (105°C/24 h) e peneiramento	66,12%	NE	[67]
CBC e CV	Cimento	Calcinação	43,34%	NE	[68]
BC e aditivo plastificante	Cimento	Calcinação em forno	55,70%	15,00%	[69]
BC	Cimento	Secagem ao ar (1 semana) e calcinação	NE	NE	[70]
CBC	Cimento	NE	NE	10,00%	[71]
CBC	Cimento	Moagem e secagem	83,00%	20,00%	[72]
CBC e aditivo plastificante	Cimento	Lavagem, secagem (100°C/24h) e recalcinação (600°C/3h) em mufla	60,00 a 73,50%	NE	[73]
CBC	Cimento	Secagem (105°C/24h); Peneiramento; Moagem (2h)	56,37%	10,00%	[74]
CBC	Cimento	Peneiramento e moagem	78,60%	15,00 a 20,00%	[75]
CBC e EAF	Cimento	Peneiramento, moagem e ativação alcalina	78,59%	25% EAF e CBC	[76]
CBC e RM	Cimento	Secagem (100°C/24h), peneiramento e ativação alcalina	31,64 % (RM) 75,90 % (CBC)	NE	[77]
CBC, CV, EAF e aditivo	Cimento	Secagem (105°C/24 h) e peneiramento (5 min)	56,37 % (CBC) 58,02% (CV)	10,00%	[78]
CBC e aditivo	Cimento	NE	NE	15,00%	[79]

CBC - Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar; EAF – Escórias de alto-forno; FB – Fibras de bagaço; FPVA –Fibras de PVA; CV – Cinzas volantes; CCA – Cinzas da casca de arroz; CEU – Cinzas de eucalipto; CP – Cinzas de forno de pizzaria; CI – Cinzas inferiores; CB – Cinzas de bambu; BC – Bagaço de cana; RM – Resíduos de mármore; NE – Não especificado; a/c - Fator água/cimento.

A Tabela 3 apresenta os dados obtidos em relação às patentes. Os mesmos critérios anteriormente utilizados para a determinação dos resultados nas bases de artigos também foram considerados no levantamento de dados nas bases de patentes consultadas. Desse modo, nota-se que os resultados para cada base são diferentes para cada combinação de palavras-chave utilizada, sendo o total para cada base igual a: INPI (1), LATIPAT (5), USPTO (0), ESPACENET (2) e PATENTSCOPE (4).

Tabela 3: Relação entre palavras-chave e resultados reportados pelas bases de patentes.

PALAVRAS-CHAVE	INPI	LATIPAT	USPTO	ESPACENET	PATENTSCOPE
mortar and ash and sugarcane/ argamassa and cinza and cana-de-açúcar	1	1	0	1	1
mortar and bagasse and sugarcane/ argamassa and bagaço and cana-de-açúcar	0	4	0	1	2
mortar and bagasse and ash and sugarcane/ argamassa and bagaço and cinza and cana-de-açúcar	0	0	0	0	1

A busca realizada nas bases tecnológicas reportou um total de 12 patentes depositadas até o momento da pesquisa, levando em consideração todas as combinações de palavras-chave empregadas no contexto da busca nas bases consultadas. Contudo, observou-se, após avaliação dos resultados reportados, que nenhum deles corresponde ao escopo da presente pesquisa, de modo que não foi encontrada nenhuma patente de invenção ou modelo de utilidade que empregasse o uso de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar aplicadas à produção de argamassas.

4. DISCUSSÃO

4.1 Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como substituto parcial de agregados finos

Agregados finos (areia) são tradicionalmente empregados no setor da construção civil, sendo retirados do solo, causando impactos ambientais [42, 60, 62]. As cinzas do bagaço de cana-de-açúcar cristalinas (SiO_2 /quartzo) apresentam em sua constituição alto teor de sílica (88,2 – 96,2%), têm propriedades físicas semelhantes às da areia, o que as tornam um substituto ideal para os agregados finos naturais [19]. As pesquisas voltadas para a substituição da areia (agregados finos) por cinzas do bagaço de cana-de-açúcar representam um percentual de 20,58% dos trabalhos apontados pelo levantamento, de acordo com os dados apresentados na Tabela 2.

MORETTI *et al.* [37] pesquisaram sobre as diferenças entre a distribuição de tamanhos de poros de argamassas produzidas por substituição parcial de areia natural por cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC, 0, 10, 20, 30 e 40%). As amostras de CBC foram coletadas nas caldeiras de cogeração de uma usina sucroalcooleira, secas a 100 ± 5 ° C por 24 h, peneiradas com malha de 2,4 mm para remoção de impurezas, e moídas em moinho de bolas. Com base nos resultados, verificou-se que as cinzas são predominantemente cristalinas (91,30%, SiO_2) e de baixa reatividade, de acordo com o ensaio de Chapelle modificado. Os resultados também demonstraram que a incorporação das cinzas em até 30% reduz a fluidez das argamassas, sendo as composições com 10% e 20% de substituição as que exibem valores recomendados para uso (NBR 13276:1995). A aplicação das CBCs não afeta a porosidade das argamassas, visto que as taxas de absorção de água e vazios não diferem significativamente das amostras referências. Neste estudo, a presença das cinzas nas argamassas, corroborando com o relatado por ALMEIDA *et al.* [43], também contribui para a redução no número de macroporos (com diâmetros maiores que 0,1 μm) ou capilares longos, e o teor de 30% de cinzas para substituir a areia fina contribuiu para uma redução de 44% dos macroporos. Amostras com 40% de substituição de cinzas apresentaram poros maiores que as misturas com 20%. Devido ao maior peso específico das cinzas em comparação com o da areia fina, argamassas contendo cinzas apresentam uma densidade aparente seca superior à da argamassa referência. No que tange a resistência à compressão, os valores foram superiores para todas as argamassas com cinzas, destacando-se as misturas com 40% de substituição, 50,2 MPa (28 dias) e 57,0 MPa (90 dias). Amostras referências apresentaram resistência à compressão igual a 45,8 MPa (28 dias) e 52,9 MPa (90 dias).

CÂMARA, PINTO, ROCHA [42] estudaram a pega de argamassas contendo cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) com diferentes tratamentos (moagem e recalcinação) e diferentes fatores água/cimento, aplicando o teor de 0 e 7,5% das cinzas em substituição a areia. As cinzas coletadas foram secas em estufa (100°C) e peneiradas em peneira com abertura de 2mm para separação de vestígios de bagaço de cana que não sofreram combustão completa. Em seguida, três amostras foram preparadas: CBC-10 min (moídas por 10 min), CBC-3 h (moídas por 3h), e CBC-R (recalcinadas em 300°C/3h seguida de outras 3h em 600°C). As argamassas com cinzas tratadas apresentaram Índice de Atividade de Força (IAF) de 89,4%; 87,5% e 102,3% para as CBC-10 min, CBC-3 h, e CBC-R, respectivamente, em relação à argamassa de controle. As mesmas foram consideradas com atividade pozolânica (índice acima de 75%, 28 dias). Todas as argamassas alcançaram maior resistência à compressão aos 28 dias, especialmente as misturas com cinzas recalcinadas (54,1 MPa). Em comparação às argamassas de referência, todos os tratamentos resultaram em uma rápida hidratação, indicando que as cinzas aceleram a pega (menores tempos iniciais e finais) especialmente para argamassas com cinzas de requeima. Através dos diferentes tratamentos aplicados às cinzas de cana-de-açúcar, foi possível concluir que a requeima beneficia o efeito acelerador e permite maior ganho de resistência à compressão com a idade. Os autores indicam ainda a aplicação das cinzas recalcinadas para construções específicas, nas quais a velocidade de hidratação é fundamental, tanto quanto a obtenção de maior resistência aos 28 dias. Contudo, demanda maior energia para sua produção, uma vez que o desempenho das CBC-10 min e CBC-3 h, foram similares. Portanto é mais viável o tratamento que consuma a menor quantidade de energia. Os bons resultados obtidos pelas argamassas com cinzas tratadas foram atribuídos provavelmente aos fatores de preenchimento físico e/ou à atividade pozolânica das cinzas.

ALMEIDA *et al.* [43] investigaram o efeito da aplicação de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) sobre argamassas em substituições de 0, 30 e 50% pela areia. As amostras de cinzas foram coletadas de usinas sucroalcooleiras, peneiradas (malha de 4,8 mm) e trituradas por três minutos em um moinho mecânico. Acerca dos resultados obtidos, tem-se que as CBCs apresentam um maior peso específico que as partículas de areia, 2,57 g/cm³ e 2,45 g/cm³, respectivamente. Cinzas apresentaram maior absorção de água, 0,9%, em comparação a areia natural com 0,5% de taxa de absorção. Outras propriedades físicas foram caracterizadas: dimensão máxima dos grãos de cinzas (1,18mm) e da areia (6,3mm), assim como o módulo de finura, 1,15 (cinzas) e 2,32 (areia). Os resultados mostraram que, com o aumento das substituições da areia pelas cinzas, um maior fator água/cimento na preparação das misturas também foi solicitado, devido à sua maior área superficial em comparação com a da areia. Sobre a porosidade, misturas de argamassas com 50% de substituição apresentaram aumento na taxa de vazios. Embora a quantidade de pequenos poros tenha diminuído, uma vez que as cinzas os preencheram, houve uma predominância de poros maiores que as CBC não conseguiram preencher. Os valores médios de resistência à compressão das três misturas de argamassa foram estatisticamente equivalentes, com valores iguais a 45,9 MPa, 46,27 MPa e 45,63 MPa, para 0, 30 e 50% de substituição, respectivamente. A respeito do avanço de carbonatação das argamassas, observou-se semelhança aos 7 dias para todas as amostras. Aos 365 dias, a carbonatação foi maior para amostras com 50% de substituição. Com 30% de substituição de areia pelas cinzas, a resistência à carbonatação foi equivalente à argamassa controle. Tanto as argamassas com 30% quanto as de 50% de substituição resistiram mais à penetração dos cloretos em comparação com a argamassa controle, e apresentaram valores semelhantes em idades mais avançadas (90 dias). Os pesquisadores concluíram que as partículas finas das cinzas têm o efeito físico de preenchimento de microporos da argamassa, permitindo a manutenção da resistência mecânica, maior resistência à penetração de agentes agressivos, assim como o aumento da relação água/cimento. A substituição de 30% de areia pelas CBC favorece as propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas.

MACEDO *et al.* [61] estudaram a viabilidade técnica do uso de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) em argamassas, considerando a queima do bagaço, as propriedades mecânicas e de durabilidade. As argamassas preparadas continham cinzas nas proporções de 0, 3, 5, 8 e 10% como substituição parcial de agregados finos. As cinzas foram obtidas diretamente da usina, homogeneizadas, e secas em forno (110°C/14 h), seguida de uma secagem natural. Posteriormente, foram moídas em moinho de bolas por diferentes tempos (20, 30, 40 e 50 minutos). De acordo com os resultados reportados, o tempo de 20 minutos para moagem das CBC é o suficiente, pois melhorou a uniformidade e reduziu o tamanho médio das partículas, além de ser um processo que consome menos energia. As cinzas, para todos os tempos de moagem, apresentaram baixo Índice de Atividade Pozolânica (IAP), com valores entre 49,69% a 51,36%. Conforme as normas técnicas (NBR 5752: 2012 e NBR 12653: 2012), 75% de IAP deve ser o valor mínimo obtido. A não-pozolanicidade das CBC também foi confirmada por Difração de Raios-X, devido às fases cristalinas (óxidos de silício- α e quartzo- α) predominantes encontradas, indicando o seu uso para substituição de parte dos

agregados finos. Verificou-se que, nas idades iniciais, a resistência à compressão dos traços com cinzas é ligeiramente inferior ao da argamassa controle, com exceção das amostras com 10% de substituição, que apresentaram resistência um pouco superior. Aos 56 dias, todas as misturas apresentaram resistências superiores à argamassa de referência, atribuídas ao efeito de preenchimento dos vazios pelos grãos finos de cinzas. Para a argamassa contendo 10% de cinzas verificou-se um aumento de resistência de 23,3%. Do ponto de vista da resistência à tração (todas as idades de cura), destacaram-se o traço contendo 3% de cinzas em relação ao traço de controle enquanto para as demais formulações de argamassas foi perceptível uma redução na resistência. A incorporação de cinzas em argamassas aumentou a retração em comparação com amostras de controle, porém abaixo do limite estipulado (NBR 12653: 2012). Sobre o teste de reatividade acelerada, constatou-se que os traços de 5% e 10% de cinzas são potencialmente reativos próximo dos 20 dias. Para as idades de 7 e 28 dias, há uma redução da absorção capilar quando as cinzas são adicionadas às misturas, e argamassas contendo 3% de CBC é o traço mais eficiente para reduzir a absorção de água. Este comportamento está diretamente relacionado ao efeito físico, pois promoveu o preenchimento dos vazios da pasta, dificultando o movimento da água pelos capilares.

Nos estudos de MOLIN FILHO *et al.* [62] foram desenvolvidas argamassas auto adensáveis com substituição parcial de areia por cinza de bagaço de cana-de-açúcar (0, 5, 10, 20, 25, 30 e 40%) por meio de uma análise reológica da dosagem ótima de superplastificante em relação ao cimento, assim como identificaram os novos custos dos materiais envolvidos. Cinzas cristalinas (bagaço queimado acima de 700°C) foram coletadas na usina de cana-de-açúcar e utilizadas na condição natural, somente peneiradas na malha nº30 (0,595 mm) para remoção de impurezas orgânicas. De acordo com os resultados dos ensaios, as cinzas cristalinas são compostas predominantemente por 97,9% de SiO₂. Além disso, apresentaram somente 3,6% de partículas com tamanhos abaixo de 0,075 mm, confirmando que são propícias para o uso em substituição à areia em condição natural (sem moagem) visto que, como material pozzolânico em substituição ao cimento, é requerido pela Norma Brasileira (NBR 5752: 2014) ao menos 80% de partículas com tamanhos menores que 0,045 mm. Em relação ao consumo das matérias-primas, os autores demonstraram que é possível desenvolver argamassas com propriedades auto adensáveis com taxa de consumo máximo de aditivo (superplastificante)/cimento de 0,58% para as substituições entre 5% e 40% de areia pelas cinzas. Houve também uma redução no consumo de cimento (de 528 kg para 472 kg), areia (de 1056 kg para 567 kg) e água (de 264,1 kg para 236,2 kg) presentes nas composições das argamassas. Com estes resultados, os autores concluíram que é possível reduzir até 489 kg de areia e 56 kg de cimento para produção de 1 m³ de argamassa auto adensável considerando a substituição de 40% de areia por cinzas de cana-de-açúcar. Embora solicite um aumento no fator água/cimento, acredita-se que 40% de substituição de areia pelas cinzas é a mais propícia para ser utilizada em argamassas auto adensáveis.

Em comparação com as argamassas de referência, as substituições de 7,5% a 40% da areia por cinzas reduzem a quantidade de macroporos presentes e o consumo de materiais (cimento, areia), e também aumentam a massa específica, a absorção de água da mistura e melhoram a resistência mecânica. Estes efeitos são causados pelo tamanho das partículas das cinzas, que por serem mais finas, preenchem (efeito *filler*) os poros das argamassas, aumentando a área de contato de atuação de esforços mecânicos e favorecendo o aumento da resistência. Por possuírem uma maior área superficial específica, as cinzas tendem a aumentar o fator água/cimento das misturas. É importante ressaltar que, aumentando a proporção de cinzas na mistura, aumenta-se também a porosidade [37, 42, 43, 60, 62].

4.2 Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como substituto parcial do cimento

A partir dos dados levantados (Tabela 2), observa-se que 79,42% dos artigos analisados estão relacionados à substituição do cimento por cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, refletindo uma maior preocupação quanto a redução do impacto ambiental, tendo em vista a grande emissão de CO₂ em todas as etapas de produção cimentícia [3-5, 14, 33, 53]. As cinzas do bagaço de cana apresentam uma composição química (60% de SiO₂, em massa) adequada para a sua aplicação como materiais pozzolânicos, por meio de reações químicas em contato com a cal hidratada. Logo, favorece as propriedades mecânicas, reológicas e de durabilidade dos produtos finais [16, 27, 39, 52].

MANSANEIRA *et al.* [13] verificaram o potencial uso de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento em argamassas. Para tal, caracterizaram-se cinzas in-natura (INA), cinzas calcinadas (CA, 600 °C/6h), e cinzas calcinadas e moídas (CA-M) em duas condições: 1 h (CA-M1) e 2h (CA-M2). Cinzas calcinadas e moídas (CA-M) apresentaram-se mais reativas, ou seja, com menor tamanho de partículas, maior área superficial específica (3,52m²/g - CA-M1; 4,67m²/g - CA-M2) e maior índice

pozolânico, quando comparadas com INA e CA. Análises de perda de massa também confirmaram a atividade pozolânica das cinzas através do consumo de hidróxido de cálcio por volta de 425°C e 550°C. Os resultados das argamassas contendo substituições de 0, 10, 20 e 30% de CA-M1 e CA-M2 apontam uma maior resistência média à compressão (28 dias) para substituições de 20% do cimento por CA-M1 (47,5 MPa) e até 10% de cimento por CA-M2 (46,4 MPa), em relação à argamassa de referência (44,9 MPa). Os autores justificam tal comportamento para o teor de 10% do CA-M por atribuírem que CA-M2 apresentam maior superfície específica do que CA-M1, e 10% da substituição é suficiente para atingir as mesmas propriedades das cinzas CA-M1-20%.

JIMÉNEZ-QUERO, ORTIZ-GUZMÁN, MONTES-GARCÍA [45] pesquisaram as propriedades de durabilidade de argamassas contendo cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) em substituição ao cimento (em massa). Foram preparadas misturas de argamassas com 0, 10 e 20% de CBC. A investigação mostrou que as argamassas com presença de 10% de CBC indicaram melhora na resistência à compressão para todos os tempos de cura (28, 56 e 90 dias), resistindo por mais tempo ao surgimento da primeira trinca, deduzindo-se, então, que são mais duráveis, em comparação com a amostra controle. Para determinar a durabilidade das argamassas foi considerado apenas o tempo de aparecimento da primeira fissura e sob condições de aceleração (solução NaCl-5%). Foi observado aumento no que diz respeito aos resultados de resistividade elétrica para as argamassas 10% de CBC com a barra de aço embutida (curados por 28 dias). De acordo com os autores, este resultado permitiu inferir que em maiores tempos de cura, a amostra contendo 10% de CBC poderá atingir a condição de baixo risco de corrosão. Neste estudo, as CBCs foram utilizadas como recebidas pela usina, ou seja, não passaram por um pós-tratamento que demanda alta energia para a produção de argamassas cimentícias duráveis.

BUCIO *et al.* [53] prepararam argamassas que continham 5, 10, 15, 20 e 30% de cinzas de cana-de-açúcar em substituição ao cimento. As cinzas utilizadas foram obtidas em temperatura abaixo de 750 ° C, em fornos sem controle de temperatura, secas (110°C/24 h) e peneiradas com malha n°. 200 (0,075 mm). Após 45 dias de cura, observaram que argamassas com 5% de substituição apresentaram o melhor comportamento mecânico de resistência à compressão, os quais superaram os corpos de prova controle. Contudo, as argamassas com 20% de cinzas foram as que alcançaram, aos 28 dias, um aumento, tanto nas propriedades físicas como mecânicas, em relação à mistura controle. Aos 90 dias, as misturas que apresentaram as melhores resistências foram as de 20% e 30% de substituição. Os resultados favoráveis foram atribuídos a um maior tempo de cura, devido à reação pozolânica solicitar um tempo maior para que se alcance a cimentação. Em relação à resistência mecânica à flexão, as misturas com 5, 15 e 20% também excedem as amostras de controle aos 45 dias. O melhor desempenho foi indicado para a amostra com 20% de substituição de cimento por cinzas, com resistência aproximadamente igual a 3,4MPa. Argamassas contendo 20% de substituição apresentaram aumento na resistência à tração na idade de 90 dias. Todas as porcentagens de substituição apresentaram ótimos resultados de aderência em todas as idades, especialmente para as argamassas com 20% e 30% de cinzas. Tais argamassas são adequadas como revestimentos ou para assentamento. Sobre a resistividade elétrica, constatou-se um aumento em misturas contendo as cinzas (aos 45 dias de cura), favorecendo a durabilidade das argamassas, haja visto a dificuldade de penetração de cloretos e sulfatos nas argamassas, consequência direta de uma microestrutura densa e rede de poros descontínua.

ARENAS-PIEDRAHITA *et al.* [67] reportaram sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas contendo cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) coletadas de usina de cana, que foram geradas entre 550 e 700°C. Foram usadas após um único tratamento, peneiradas com malha n° 200 (75 µm) por 5 minutos. Os resultados revelam cinzas altamente porosas, com grandes áreas superficiais e, portanto, mais reativas. O Índice de Atividade de Força (IAF) foi estimado em 90,0% (7 dias) e 95,4% (28 dias), valores que classificam estas cinzas como pozolanas e que excedem ao exigido (IAF=75%) pela ASTM C618. As argamassas (0, 10 e 20% em substituição ao cimento) curadas em diferentes tempos (entre 3 a 180 dias) apresentaram os seguintes comportamentos em comparação as argamassas controle: maiores resistências à compressão (após 90 dias de idade), diminuição na velocidade do pulso ultrassônico, com exceção aos 180 dias, em que as amostras com 10% de substituição ultrapassam levemente esta velocidade em comparação à argamassa controle. Ainda apresentaram aumento da resistividade elétrica em todos os tempos de cura, especialmente em 90 dias, um aumento de 2,4 (10% de cinzas) e 4,5 (20% cinzas) vezes maior. Quanto à permeabilidade de cloretos, foi observado decréscimo para as duas formulações de argamassas, sendo mais significativa para aquelas amostras contendo 20% de cinzas, que foram classificadas em permeabilidade moderada a muito baixa dos 28 aos 180 dias. Os autores recomendaram a necessidade de

um estudo sobre a porosidade para que haja uma melhor compreensão do aumento significativo na resistência elétrica, assim como a diminuição acentuada na permeabilidade de cloretos para a amostra com 20% de CBC.

REZA [70] relatou sobre a resistência mecânica e análise de custo de argamassas contendo cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em várias proporções (0, 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20, 22,5, 25, 27,5 e 30%), utilizando como substituto parcial do cimento (comum e composto). O bagaço coletado na usina de cana-de-açúcar foi secado ao sol por uma semana e, posteriormente, queimado em temperaturas de 800°C a 1000°C por 20 minutos. As análises de custo revelaram que o uso de cinzas é vantajosamente econômico reduzindo o valor em mais de 20% para as argamassas preparadas com cimento comum e cinzas, enquanto o custo de aproximadamente 20% foi reduzido para as argamassas de cimento composto e cinzas. As argamassas referências apresentaram resistência à compressão de 27,13 MPa e 23,34 MPa para o cimento comum e o composto, respectivamente. Todos os teores de substituição apresentaram redução de resistência à compressão. Valores mais semelhantes à amostra referência e que alcançaram 26,99 MPa (cimento comum) e 22,98 MPa (cimento composto) foram encontrados para as argamassas com a substituição de 5% de cinzas. Os resultados dos testes indicaram que a substituição de até 30% de cimento comum por cinzas do bagaço de cana em argamassas é viável e atende as normas exigidas. No entanto, no que se refere ao cimento composto, o teor ideal máximo de uso se dá em torno de 27,5%. Acredita-se que o responsável pela redução das resistências mecânicas sejam as altas temperaturas de combustão (800°C a 1000°C) pelas quais o bagaço foi submetido, contribuindo para cinzas com presença de sílica cristalina, menos reativa com o cimento. MORETTI *et al.* [18] e XU *et al.* [19] também confirmam que cinzas cristalinas tendem a diminuir as propriedades mecânicas.

PRAVEENKUMAR, SANKARASUBRAMANIAN, SINDHU [71] avaliaram o método de produção das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) com alta área superficial específica, atividade pozolânica e sob condição de queima controlada. As propriedades das argamassas contendo substituições de cimento por cinzas (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30%) também foram investigadas. O bagaço coletado na usina de cana-de-açúcar foi queimado (110° a 120° C) a céu aberto para obter as cinzas brutas do bagaço, ricas em carbono. Então, foram passadas em peneira malha nº 200 (75 mm, 5 minutos) e, após moagem (120 min) em moinho de bolas, as cinzas foram calcinadas a 600° C/3 h, seguida de pulverização por 1 h, a fim de se obter uma finura das partículas semelhante ao do cimento. De acordo com os resultados, as cinzas foram classificadas como uma matéria-prima cimentícia suplementar, de formato irregular, apresentando rugosidade superficial e de textura porosa. Em relação às argamassas, foi observada a diminuição da densidade, trabalhabilidade, porosidade e do coeficiente de permeabilidade a cloretos à medida que aumenta-se a quantidade de cinzas, devido ao efeito de preenchimento e favorecendo a resistência à compressão. A hidratação das pastas foi influenciada pela adição das cinzas, com aceleração do tempo (início e fim) de pega por volta de 10 a 15 minutos e com valores dentro dos parâmetros exigidos pela norma. Cinzas em até 10% podem ser usadas com eficiência por reduzir a demanda de água e aumentar a resistência mecânica (compressão e flexão) das argamassas, devido ao efeito combinado de alta área de superfície específica, altos valores de SiO₂ amorfa e CaO, e finura relativa das cinzas. Esses fatores são determinantes para a atividade pozolânica. O resultado de resistência mecânica é confirmado pelas análises de difração de raios X e espectrometria de infravermelho por transformada de Fourier, as quais mostraram que a quantidade de hidróxido de cálcio foi reduzida de 7 para 28 dias em todas as amostras, uma indicação clara da reação pozolânica acontecendo nos cimentos misturados por causa da cinza de bagaço, devido ao consumo da portlandita na hidratação das misturas. Outros estudos [74, 80, 81] corroboram o melhoramento das propriedades físicas e mecânicas das argamassas cimentícias quando usadas substituições de cimento por cinzas em até 10%. O conteúdo de cinzas acima de 10% em argamassas atua para diminuir a necessidade de locais para alocar tais resíduos, concluem os autores.

PEREIRA *et al.* [75] avaliaram a reatividade das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como um resíduo pozolânico. Foram estudadas 5 diferentes substituições de cimento por CBC (0, 15, 25, 33 e 50%, em massa) em argamassas curadas por 3, 7, 28, 56 e 90 dias, a 25 °C e em umidade relativa superior a 95%. O bagaço foi coletado de um produtor de cana, seco ao ar livre por 24 horas, e tratado por um processo de autocombustão (sistema forno-fornalha) sem controle de temperatura, durante 24 horas. As cinzas foram obtidas a temperaturas abaixo de 700 °C, peneiradas e moídas por 50 minutos (moinho de bolas) para aumentar a atividade pozolânica. As CBCs foram caracterizadas pela presença de alta concentração de SiO₂ (78,6%) e pequenos percentuais de Al₂O₃ (4,5 %) e Fe₂O₃ (4,9%). O somatório destes 3 óxidos (88%) foi maior que 70%, confirmando a exigência química de uma pozolona de acordo com *American Society for Testing and Materials* (ASTM C-618). Após moagem, houve redução do tamanho das partículas em 60%.

Em argamassas frescas, foram observadas uma baixa reatividade pozolânica das CBCs (em idades precoces), através do ensaio de Frattini. Por outro lado, as análises termogravimétricas e de Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier mostraram alguma atividade pozolânica em maiores tempos de cura. Em termos de consistência de massa, não foram observadas alterações entre 0-25% de CBC. As argamassas contendo CBC com substituição entre 15-25%, foram as que atingiram maior resistência à compressão com o tempo de cura. Os pesquisadores concluíram que as cinzas em estudo devem ser valorizadas, ainda que sua reatividade pozolânica seja relativamente baixa.

BERENGUER *et al.* [80], fizeram um estudo sobre a resistência mecânica de argamassas com a substituição parcial de cimento por cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC-B, 0 e 15%). Os corpos de prova das argamassas foram curados em 28, 63 e 91 dias de idade. As análises indicaram que as cinzas apresentaram 62% de material amorfo, partículas irregulares e com alta porosidade, propriedades estas que demonstram o seu potencial pozolânico. Por difração de raios-X e termogravimetria foi possível verificar um consumo de Portlandita ao longo do tempo para as argamassas, o que também confirma o potencial pozolânico das cinzas. A substituição de 15% de CBC-B em argamassas cimentícias manteve a resistência mecânica (compressão e tração) equivalente à da argamassa controle, contribuindo para a reduzir a emissão de CO₂ para cada m³ de material produzido, favorecendo o meio ambiente.

Ao se adicionar pozolanas no cimento Portland, atribui-se à argamassa características como diminuição do calor de hidratação e aumento na durabilidade devido à inibição da reação álcali-agregado, refinamento da estrutura dos poros e uma matriz mais densa em comparação com os materiais de referência. Comportamentos como o aumento na resistência mecânica diante do ataque de ácidos como um reflexo da estabilização do hidróxido de cálcio também foram verificados [30, 74, 82, 83].

4.3 Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar associadas a outros aditivos

Recentemente, algumas pesquisas [15, 73, 77] têm focado em associar as cinzas de cana-de-açúcar a outros materiais aditivos de forma a obter melhores propriedades, sejam elas físicas, mecânicas, de durabilidade e até mesmo reológicas. Dentre os mais variados materiais que podem ser incorporados às misturas, contribuindo para a melhoria das propriedades finais, destacam-se os diversos tipos de resíduos agroindustriais, metalúrgicos e, ainda, de outros materiais da construção [43, 68, 74].

À luz dessa assertiva, podemos destacar o trabalho realizado por SANTOS *et al.* [60] que avaliaram o efeito dos resíduos de calcários como uma opção para a substituição de agregados finos em argamassas cimentícias contendo cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC), assim como o uso de aditivos superplastificantes. O *filler* calcário calcítico utilizado continha 94% de partículas abaixo de 45 µm. As cinzas do bagaço de cana-de-açúcar coletadas na usina apresentaram partículas abaixo de 0,595mm (pós peneiramento). Após prepararem as argamassas (0 e 40% de CBC), obtiveram melhores aspectos de fluidez e viscosidade quando produzidas com a relação de finos/cimento de 0,30 bem como com a adição de superplastificante, considerando a taxa ótima de dosagem deste aditivo entre 0,40 até 0,60%, em relação à massa de cimento. Do ponto de vista da resistência mecânica (compressão e tração) aos 28 dias, um ligeiro incremento destas resistências foi observado. Com base nestes resultados, os autores constataram que com o alto teor (40% substituição) de utilização das CBCs foi possível produzir argamassas auto adensáveis, facilitadas pelo aumento de quantidade de *filler* calcário, que preencheu os espaços vazios das argamassas e, consequentemente, aumentou a coesão entre as partículas devido à grande área superficial do material.

JOSHAGHANI, RAMEZANIANPOUR, ROSTAMI [69] estudaram a durabilidade das argamassas frente a ataques de sulfatos e usaram cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) completamente amorfas atuando em conjunto com aditivo superplastificante. O aditivo foi utilizado em todas as misturas de argamassas (0, 10, 15, 20, 25, 30% de CBC), com a função de reduzir a quantidade de água na mistura. As amostras de argamassa que continham 15% de cinzas apresentaram uma resistência aceitável ao ataque de sulfatos (sódio e magnésio), pois suas expansões diante dos ataques químicos foram menores que as demais composições com e sem cinzas. Em diferentes idades de cura, o aumento máximo na resistência à compressão também foi para a argamassa com 15% de substituição das CBCs. Portanto, o uso de cinzas em conjunto com aditivo superplastificante favoreceu as características mecânicas e de durabilidade das argamassas.

Diante disto, buscou-se destacar dentre os artigos recuperados através do levantamento, a relação entre a quantidade de documentos que utilizam as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) em conjunto com outros aditivos, formando misturas binárias, ternárias, dentre outras, como observada na Figura 3.

Destacam-se, portanto, algumas espécies de materiais envolvendo a junção destas cinzas nas misturas cimentícias preparadas: CBC e cinzas de casca arroz (1), CBC e cinzas de bambu (1), CBC, *filler* e aditivos (1), CBC, cinzas volantes, escórias de alto-forno e aditivos (1), CBC e resíduos de mármore (1), CBC, fibras e areia do bagaço de cana-de-açúcar, cinzas volantes e fibras de PVA (1), CBC, cinzas da casca de arroz e cinzas de eucalipto (1), CBC e cinzas inferiores (1), CBC e cinzas de forno de pizzaria (1), CBC e escórias de alto forno (2), CBC e aditivo plastificante (3), CBC e cinzas volantes (3) e CBC e aditivo (3). Não obstante, percebeu-se que a maioria das pesquisas utilizaram apenas as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar nas misturas, sem a adição de outros componentes, totalizando 14 dentre os 34 artigos analisados.

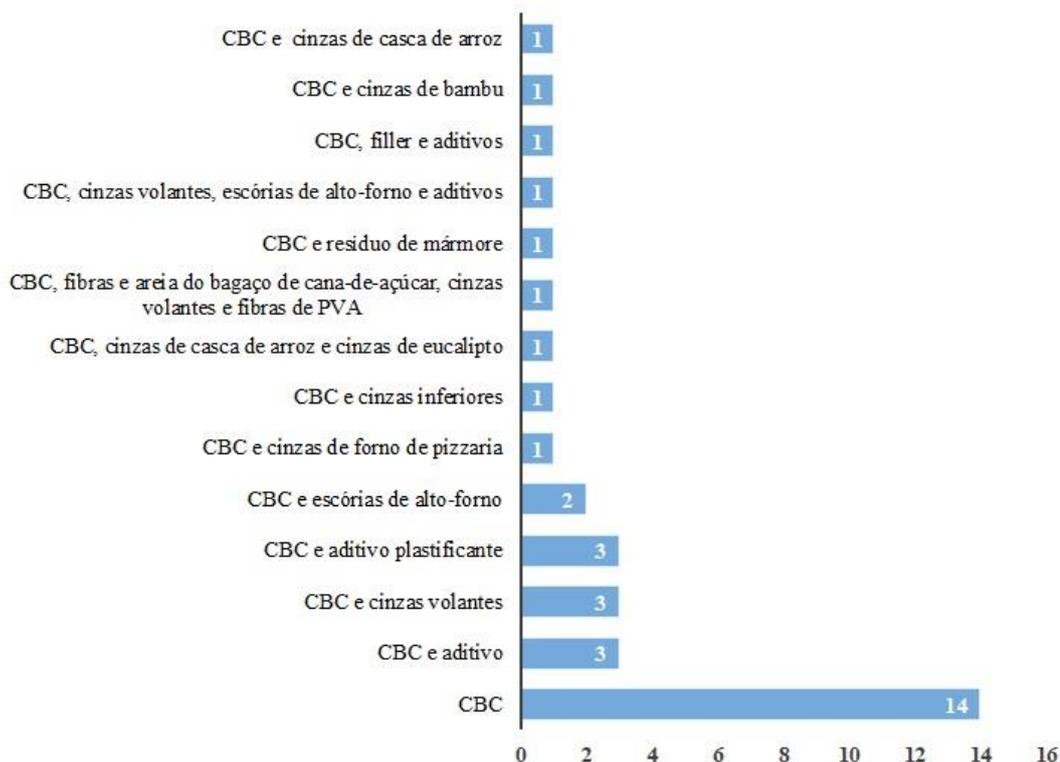


Figura 3: Número de artigos reportados nas bases que utilizam as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) associadas a outros componentes como aditivo em argamassas.

4.4 Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e os tratamentos utilizados para melhorar a atividade pozolânica

Considera-se material do tipo pozolânico todo aquele que, natural ou artificial, contém sílica na forma reativa, que sozinho não consegue apresentar atividade aglomerante. Porém, ao ser finamente dividido e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades aglomerantes [52]. As pozolanas podem ser utilizadas como parte do agregado miúdo e ainda como substituto parcial do cimento Portland. MORETTI *et al.* [37], RODIER *et al.* [48], SANTOS *et al.* [60], MOLIN FILHO *et al.* [62], ARENAS-PIEDRAHITA *et al.* [67], PEREIRA *et al.* [75], relatam que estas substituições parciais do cimento podem alcançar até 40% de composição formada por areia e 20% por clínquer, sem apresentar efeitos negativos ao produto.

De maneira geral, é necessário que esses materiais passem por tratamentos para que adquiram essas propriedades. Geralmente, algumas etapas de preparação são realizadas como lavagem, secagem e peneiração para remoção de materiais orgânicos, impurezas, umidade e desagregação de partículas [43, 47, 62] para, posteriormente, serem submetidos a tratamentos distintos. Cada método de tratamento é utilizado separadamente ou em conjunto com outras técnicas para conferir melhores propriedades para o resíduo, visando obter materiais mais pozolânicos [29, 40, 41, 63, 68].

Considerando os artigos analisados por este estudo, os principais métodos empregados para o tratamento de cinzas obtidas a partir do bagaço de cana-de-açúcar foram: moagem (39%), calcinação (32%), cinza natural não tratada (7%), tratamento alcalino (7%) e ácido (4%), e os resultados que não especificaram os métodos de tratamento empregados nas amostras totalizaram 11% (Figura 4). Como é possível perceber, moagem e calcinação são os métodos mais utilizados pelos pesquisadores. Acredita-se que a escolha por tratamentos mais simples se dá pela baixa complexidade e menores custos atrelados à produção, e também pela fácil reprodutibilidade, de forma que se produza um material viável economicamente e ecologicamente correto, a partir de uma matriz sustentável.

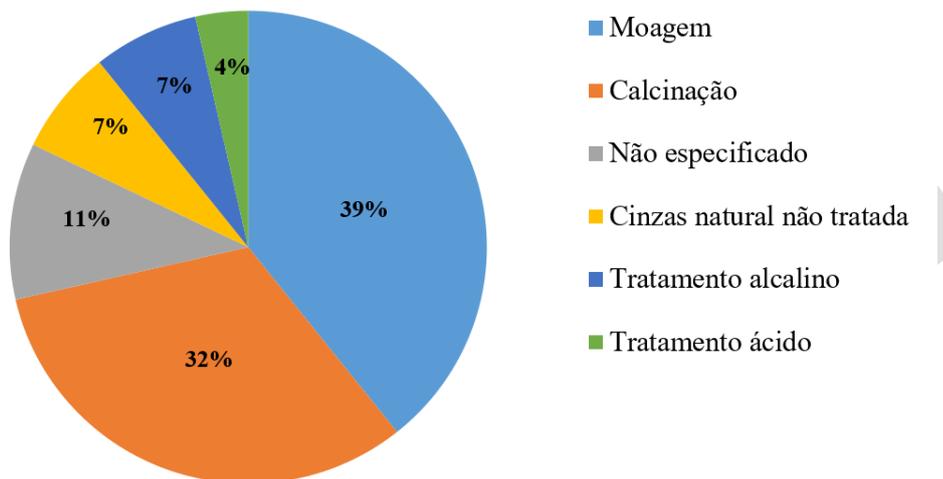


Figura 4: Principais técnicas empregadas para o tratamento de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar utilizadas pelos artigos reportados nas bases.

Tratamentos de calcinação são justificados pela necessidade de aperfeiçoamento da reatividade química das cinzas, de modo que possam ser empregadas em compostos cimentícios. As cinzas de cana-de-açúcar das caldeiras de cogeração geralmente apresentam alto teor de quartzo, baixo teor de sílica amorfa e baixa reatividade [37, 43, 51], características mais propícias para utilização como material de preenchimento. Uma vez que as CBCs possam ser recalcinadas, esta requeima é eficaz para reduzir a perda em ignição, adequando a composição química das CBCs e, ainda, para a diminuição da área superficial específica, que é associada à liberação de carbono, potencializando suas propriedades pozolânicas [84, 85].

O processo de moagem, por sua vez, é responsável por aumentar a superfície específica do material, tornando os grãos mais uniformes e bem distribuídos, favorecendo diversas propriedades dos materiais cimentícios: redução de porosidade e da absorção de água por capilaridade, aumento da compacidade da mistura, influenciando na resistência mecânica [30, 37, 47, 50, 61, 75]. De acordo com SILVA *et al.* [47], as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar moídas por um período de 7 horas, independente da temperatura de queima, quando adicionadas à argamassa, contribuíram para o aumento de resistência mecânica acima de 8,0 MPa, que é superior à 6,0 MPa exigido por norma técnica (NBR 12653). Isso comprova que a moagem é um processo primordial para a obtenção de pozolanas e materiais com efeito de preenchimento.

Segundo a pesquisa de BEZERRA *et al.* [85], a requeima seguida de moagem resultou em uma morfologia aparentemente mais homogênea das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e reduziu sua granulometria. Os ensaios de resistência à flexão de argamassas substituídas por 20 e 30% de cinzas, apresentaram valores superiores aos da referência. Como este teste está intimamente relacionado à ligação entre as partículas, os autores concluíram que as cinzas apresentaram atividade pozolânica. Este estudo foi corroborado pelo relato de MANSANEIRA *et al.* [13], que afirmaram que as cinzas calcinadas e moídas se apresentaram mais reativas, quando comparadas com cinzas in natura. As amostras que seguiram os procedimentos de calcinação e de moagem, analisados por TORRES *et al.* [86], atingiram os valores mínimos necessários para indicar a atividade pozolânica, comprovando a importância da execução das duas etapas.

CHENG *et al.* [65] em suas pesquisas fizeram o uso de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar não

tratadas (CBC-NT), as quais passaram apenas por um processo de peneiramento para retirada de impurezas. Logo, as argamassas incorporadas com estas cinzas (mesmo sem nenhum tratamento) apresentaram altos valores de Índice de Atividade Pozolânica, 94% aos 28 dias, em comparação à argamassa referência. Neste estudo, as cinzas mantêm uma quantidade considerável de SiO₂ e o aumento na resistência mecânica foi devido a alta pozolanicidade obtida. Já para a resistência à compressão (aos 56 dias), as CBCs-NT provoveram somente um leve aumento entre 1-3% em relação as argamassas controle. Nos estudos realizados por SANTOS *et al.* [60] foram empregadas cinzas in natura, ou seja, sem tratamento, e estas possuíam baixa atividade pozolânica. Com base nisso, os autores entenderam que seria mais propício o seu uso como material de preenchimento para aplicação em materiais cimentícios. As propriedades mecânicas (compressão e tração) aumentaram sutilmente à medida que houve o aumento do teor de finos, assim como aditivos.

Trabalhos como o de EMBONG *et al.* [41], optaram pelo uso de tratamento ácido (HCl) no bagaço de cana-de-açúcar e, após a queima, gerou cinzas tratadas. Através do teste de Chapelle Modificado identificaram um maior consumo de portlandita nas cinzas tratadas, fator que intensificou a pozolanicidade das cinzas, em comparação as amostras não tratadas. KUSBIANTORO, EMBONG, AZIZ [40] converteram as sílicas das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em sílica solúvel por meio de tratamento com NaOH e HCl. Os resultados indicaram um aumento na resistência à compressão das argamassas com amostras de cinzas tratadas, atribuída à maior solubilidade do gel silicioso que está diretamente envolvido na reação pozolânica e na amorficidade de partículas nanométricas. Uma melhora na resistência a compressão de argamassas com cinzas tratadas por ativação alcalina foi observada por MURUGESAN, VIDJEAPRIYA, BAHURUDEEN [77]. Em comparação com aquelas não tratadas, o bom desempenho é justificado pela melhoria da solubilidade da sílica presente nas cinzas, que favorece a atividade pozolânica.

5. CONCLUSÕES

A análise criteriosa de artigos apresentada por este estudo demonstrou que a reutilização de resíduos de biomassa possui uma grande aplicabilidade na área da construção civil. Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar aplicadas em teores que variam entre 7,5 – 40% e 5 - 20% em substituição parcial da areia e do cimento, respectivamente, favorece positivamente as propriedades (reológicas, mecânicas e de durabilidade) dos seus produtos. Assim, é nítido que o reaproveitamento destes resíduos gerados nas usinas sucroalcooleiras pela indústria de construção civil reduz significativamente as extrações de matérias-primas naturais e as emissões de gases de efeito estufa durante os processos produtivos. Os dados da pesquisa apontam um número pequeno de artigos (34) científicos correspondendo ao uso de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar aplicadas à produção de argamassas cimentícias. Não foram encontradas patentes pertinentes ao tema em estudo. Conclui-se que cinzas de cana-de-açúcar aplicadas a materiais compósitos cimentícios ainda podem em muito contribuir em inovações e descobertas, como potencial solução sustentável para a construção.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a jornalista Eloiza Strachicini Terrabuio, pela revisão de português.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] ALMEIDA, K.S., SOARES, R.A.L., MATOS, J.M.E., “Efeito de resíduos de gesso e de granito em produtos da indústria de cerâmica vermelha: revisão bibliográfica”, *Revista Matéria*, v. 25, n. 1, e-12568, 2020.
- [2] GOIÁS, ASSEMBLEIA LEGISLATIVA, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*, São Paulo, 2020.
- [3] CAPELIN, L.J., MORAES, K.K., ZAMPIERI, J.P., *et al.*, “Avaliação dos efeitos da fibra de coco e da microcelulose cristalina nas propriedades de argamassas cimentícias”, *Revista Matéria*, v. 25, n.01, e-12551, 2020.
- [4] CUNHA, S., AGUIAR J., FERREIRA V., *et al.*, “Argamassas eco-eficientes com incorporação simultânea de material de mudança de fase e cinzas volantes”, *Revista Matéria*, v. 24, n.02, e-12367, 2019.

- [5] KOLAWOLE, J.T., BABAFEMI, A.J., FANIJO, E., *et al.*, “State-of-the-art review on the use of sugarcane bagasse ash in cementitious materials”, *Cement and Concrete Composites*, v.118, pp.103975, Apr. 2021.
- [6] VIANA NETO, L.A.C., SALES, A.T.C., SALES, L.C., “Efeitos da variabilidade de agregados de RCD sobre o desempenho mecânico do concreto de cimento Portland”, *Revista Matéria*, v. 23, n. 1, e-11958, 2018.
- [7] SÉRGIO FILHO, J., SINHORELLI, K., MEDEIROS G., *et al.*, “Estudo da reologia de pastas cimentícias contendo resíduo de tijolo cerâmico moído e metacaulim”, *Revista Matéria*, v. 25, n. 1, e-12554, 2020.
- [8] KLERK, M.D., KAYONDO, M., MOELICH, G.M., *et al.*, “Durability of chemically modified sisal fibre in cement-based composites”, *Construction and Building Materials*, v. 241, pp. 117835, Apr. 2020.
- [9] CECHIN, L., MATOSKI, A., LIMA, A.J.M., *et al.*, “Efeito da adição de escória de alto-forno em compósitos com bambu mossô”, *Revista Matéria*, v. 23, n. 04, e-12240, 2018.
- [10] TRENTIN, P.O., MANICA, J., VANZETTO, S.C., *et al.*, “Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa”, *Revista Matéria*, v. 25, n.01, e-12576, 2020.
- [11] AMANCIO, F.A., LIMA, D.A., DIAS, A.R.O., *et al.*, “Propriedades mecânicas de argamassas com substituição da areia natural por escória de aciaria BSSF (baosteel's slag short flow)”, *Revista Matéria*, v. 25, n. 1, e-12562, 2020.
- [12] KRETZER, M.B., EFFTING, C., SCHWAAB, S., *et al.*, “Hybrid geopolymer-cement coating mortar optimized based on metakaolin, fly ash, and granulated blast furnace slag”, *Cleaner Engineering and Technology*, v. 4, pp. 100153, Oct. 2021.
- [13] MANSANEIRA, E.C., SCHWANTES-CEZARIO, N., BARRETO-SANDOVAL, F. *et al.*, “Ceniza de bagazo de caña de azúcar como material puzolânico”, *Dínamo*, v. 84, n. 201, pp. 163–171. Jun. 2017.
- [14] YADAV, A.L., SAIRAM, V., MURUGANANDAM, L., *et al.*, “An overview of the influences of mechanical and chemical processing on sugarcane bagasse ash characterisation as a supplementary cementitious material”, *Journal of Cleaner Production*, v. 245, Feb. 2020.
- [15] JOSHAGHANI, A., MOEINI, M.A., “Evaluating the effects of sugarcane-bagasse ash and rice-husk ash on the mechanical and durability properties of mortar”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 7, pp. 04018144, May. 2018.
- [16] BONFIM, W.B., PAULA, H.M., “Characterization of different biomass ashes as supplementary cementitious material to produce coating mortar”, *Journal of Cleaner Production*, v. 291, pp. 125869, Apr.2021.
- [17] LYRA, G.P., BORRACHERO, M.V., SORIANO, L., *et al.*, “Comparison of original and washed pure sugar cane bagasse ashes as supplementary cementing materials”, *Construction and Building Materials*, v. 272, pp. 122001, Feb. 2021.
- [18] MORETTI, J.P., SALES, A., ALMEIDA, F.C.R., *et al.*, “Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 113, pp. 317–323, Jun. 2016.
- [19] XU, Q., JI, T., GAO, SJ., *et al.*, “Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials”, *Materials*, v. 12, n. 1, pp. 39, Dec. 2019.
- [20] EDUARDO, A.F., NÓBREGA, M.V, FERREIRA, R.L.S., “Evaluation of the behavior of mortars produced with fibers from the straw of carnauba: effects of the content of addition and length used”, *Revista Matéria*, v. 26, n. 02, e12979, 2021.
- [21] MANSOUR, G., ZOUMAKI, M., TSONGAS, K., *et al.*, “Starch-sandstone materials in the construction industry”, *Results in Engineering*, v. 8, pp. 100182, Dec. 2020.
- [22] FERREIRA, S.R., SILVA, F.A., LIMA, P.R.L., *et al.*, “Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems”, *Construction and Building Materials*, v. 139, pp. 551-561, May. 2017.
- [23] DIAS, L.S., BESERRA, A.V.S., SANTOS, R.A., *et al.*, “Incorporação de resíduos da produção de fibras de sisal em argamassa: Efeitos nas propriedades físicas e mecânicas”, *Revista Matéria*, v. 26, n.03, e13034, 2021.

- [24] MADHAVI, K., VINAY, G.N., RENUKA DEVI, M.V., *et al.*, “Shear behavior of brick masonry strengthened with jute fiber reinforced composite”, *Materials Today: Proceedings*, Nov., 2020.
- [25] BELTRAME, N.A.M., LUZ, C.A., PERARDT, M., *et al.*, “Alkali activated cement made from blast furnace slag generated by charcoal: Resistance to attack by sodium and magnesium sulfates”, *Construction and Building Materials*, v. 238, pp. 117710, Mar. 2020.
- [26] ALCANTARA, M.A.M., MELLO, A.B.A., ALBUQUERQUE de., M.C.F., “A influência potencial das cinzas de casca de arroz em argamassas autoadensáveis: casos da resistência mecânica e da absorção d’água”, *Revista Matéria*, v. 23, n. 3, e-12153, 2018.
- [27] SHEN, Y., “Rice husk silica derived nanomaterials for sustainable applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, pp. 453–466, Dec. 2017.
- [28] FERNANDES, S.E., TASHIMA, M.M., MORAES, J.C.B., *et al.*, “Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade”, *Revista Matéria*, v. 20, n. 04, pp. 909-923, 2015.
- [29] BERENQUER, R.A., SILVA, F.A.N., MONTEIRO, E.C.B., *et al.*, “Effect of Sugarcane Bagasse Ash as Partial Replacement of Cement on Mortar Mechanical Properties”, *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 21, pp. 4577-4586, 2016.
- [30] ANDRADE NETO, J.S., FRANÇA, J.S., AMORIM JÚNIOR, N.S., *et al.*, “Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete”, *Construction and building materials*, v. 266, Parte A, Jan. 2021.
- [31] Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: Safra 2020/21 N.3 - Terceiro levantamento-DEZEMBRO 2020. CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília, v.7, 2020.
- [32] SOUZA, C.C., LEANDRO, J.P., REIS NETO, J.F., *et al.*, “Cogeneration of electricity in sugar-alcohol plant: Perspectives and viability”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 91, pp. 832-837, Aug. 2018.
- [33] FRÍAS, M., RODRÍGUEZ, O., ROJAS, M.I.S., *et al.*, “Advances on the development of ternary cements elaborated with biomass ashes coming from different activation process”, *Construction and Building Materials*, v. 136, pp. 73-80, Apr.2017.
- [34] VAZ, S., “Sugarcane for renewable chemistry”, In: *Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives*, Academic Press, pp. 165-178, 2020.
- [35] SALES, A., LIMA, S. A., “Use of brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement”. *Waste Management*, v. 30, n. 6, pp. 1114-1122, Jun. 2010.
- [36] GAR, P.S., SURESH, N., BINDIGANAVILE, V., “Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic admixture in concrete for resistance to sustained elevated temperatures”, *Construction and Building Materials*, v. 153, pp. 929-936, Oct. 2017.
- [37] MORETTI, J.P., SALES, A., QUARCIONI, V.A., *et al.*, “Pore size distribution of mortars produced with agroindustrial waste”, *Journal of Cleaner Production*, v. 187, pp. 473-484, Mar. 2018.
- [38] AKKARAPONGTRAKUL, A., JUPHUNTHONG, P., NOCHAIYA, T., “Setting time and microstructure of Portland cement-bottom ash–sugarcane bagasse ash pastes”, *Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly*, v. 148, n. 7, pp. 1355-1362, May.2017.
- [39] YOGITHA, B., KARTHIKEYAN, M., REDDY, M.G.M., “Progress of sugarcane bagasse ash applications in production of Eco-Friendly concrete-Review”, *Materials Today: Proceedings*, v. 33, pp. 695-699, Jun. 2020.
- [40] KUSBIANTORO, A., EMBONG, R., AZIZ, A.A., “Strength and Microstructural Properties of Mortar Containing Soluble Silica from Sugarcane Bagasse Ash”, *Key Engineering Materials*, v. 765, pp. 269-274, Mar. 2018.
- [41] EMBONG, R., SHAFIQ, N., KUSBIANTORO, A., *et al.*, “Effectiveness of low-concentration acid and solar drying as pre-treatment features for producing pozzolanic sugarcane bagasse ash”, *Journal of Cleaner Production*, v. 112, pp. 953-962, Jan. 2016.
- [42] CÂMARA, E., PINTO, R.C.A., ROCHA, J. C., “Setting process on mortars containing sugarcane bagasse ash”, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 9, n. 4, pp. 617-629, Jul./Aug. 2016.

- [43] ALMEIDA, F.C.R., SALES, A., MORETTI, J.P., *et al.*, “Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar”, *Construction and Building Materials*, v. 82, pp. 31-38, May. 2015.
- [44] KHALIL, M.J., ASLAM, M., AHMAD, S., “Utilization of sugarcane bagasse ash as cement replacement for the production of sustainable concrete—A review”, *Construction and Building Materials*, pp. 121371, Feb. 2021.
- [45] JIMÉNEZ-QUERO, V.G., ORTIZ-GUZMÁN, M., MONTES-GARCÍA, P., “Durability of mortars containing sugarcane bagasse ash”, *Journal of Physics: Conference Series 1221*, pp. 012004, 2019.
- [46] KAZMI, S.M.S., MUNIR, M.J., PATNAIKUNI, I., *et al.*, “Pozzolanic reaction of sugarcane bagasse ash and its role in controlling alkali silica reaction”, *Construction and Building Materials*, v. 148, pp. 231-240, Sep. 2017.
- [47] SILVA, E.J., BASTO, P.E.A., ARAÚJO, F.W.C., *et al.*, “Avaliação por análise de DRX da influência do beneficiamento de moagem na atividade pozzolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar”, *Revista Matéria*, v. 24, n. 04, e-12497, 2019.
- [48] RODIER, L., VILLA-COCINA, E., BALLESTEROS, J.M., *et al.*, “Potential use of sugarcane bagasse and bamboo leaf ashes for elaboration of green cementitious materials”, *Journal of cleaner production*, v. 231, pp. 54-63, Sep. 2019.
- [49] CLARK, M.W., DESPLAND, L.M., LAKE, N.J., *et al.*, “High-efficiency cogeneration boiler bagasse-ash geochemistry and mineralogical change effects on the potential reuse in synthetic zeolites, geopolymers, cements, mortars, and concretes”, *Heliyon*, v. 3, n. 4, pp. e00294, Apr. 2017.
- [50] BONILLA, M., BORRACHERO, M.V., MONZÓ, J.M., *et al.*, “Study of pozzolanic properties of two sugarcane bagasse ash samples from Honduras”, *Key Engineering Materials*, v. 668, pp 357-366, Oct. 2016.
- [51] ARIF, E., CLARK, M.W., LAKE, N., “Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production”, *Construction and Building Materials*, v. 128, pp. 287-297, Dec. 2016.
- [52] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 12653: Materiais pozzolânico – Especificação*, Rio Janeiro, ABNT, 2012.
- [53] BUCIO, J.L.R., REYES-ARAIZA, J.L., GUZMÁN, E.M.A., *et al.*, “Study on the Pozzolanic Effect of Sugarcane Bagasse Ash from Taretan, Michoacán, Mexico, on a Portland Cement Mortar.” *Key Engineering Materials*, v. 668, pp. 367-374, Oct. 2015.
- [54] CORDEIRO, G.C., KURTIS, K.E., “Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity”, *Cement and Concrete Research*, v. 97, pp. 41-49, Jul. 2017.
- [55] ROSSIGNOLO, J.A., BORRACHERO, M.V., SORIANO, L., *et al.*, “Influence of microwave oven calcination on the pozzolanicity of sugar cane bagasse ashes (SCBA) from the cogeneration industry”, *Construction and building materials*, v. 187, pp. 892-902, 2018.
- [56] JUENGER, M.C.G., SIDDIQUE, R., “Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 78, pp. 71-80, Oct. 2015.
- [57] SANDE, V.T., SADIQUE, M., PINEDA, P., *et al.*, “Potential use of sugar cane bagasse ash as sand replacement for durable concrete”, *Journal of Building Engineering*, v. 39, pp. 102277, Jul. 2021.
- [58] PESONEN, J., KUOKKANEN, V., KUOKKANEN, T., *et al.*, “Co-granulation of bio-ash with sewage sludge and lime for fertilizer use”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 4, n. 4, pp. 4817-4821, Dec. 2016.
- [59] NORSURAYA, S., FAZLENA, H., NORHASYIMI, R., “Sugarcane Bagasse as a Renewable Source of Silica to Synthesize Santa Barbara Amorphous-15 (SBA-15)”, *Procedia Engineering*, v. 148, pp. 839-846, 2016.
- [60] SANTOS, V.C., VANDERLEI, R.D., MORAES, K.K., *et al.*, “Behavior of the self-compacting mortar with sugarcane bagasse ash in the fresh and hardened state”, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 12, n. 1, pp. 179-198, Feb. 2019.

- [61] MACEDO, P.C., PEREIRA, A.M., AKASAKI, J.L., *et al.*, “Performance of mortars produced with the incorporation of sugar cane bagasse ash”, *Revista Ingeniería de Construcción*, v. 29, n. 2, pp. 187-199, Jun. 2014.
- [62] MOLIN FILHO, R.G. Dal., LONGHI, D.A., SOUZA, R.C.T., *et al.*, “Self-compacting mortar with sugarcane bagasse ash: development of a sustainable alternative for Brazilian civil construction”, *Environment, Development and Sustainability*, v. 21, n. 5, pp. 2125-2143, Oct. 2019.
- [63] RIBEIRO, B., YAMASHIKI, Y., YAMAMOTO, T., “A study on mechanical properties of mortar with sugarcane bagasse fiber and bagasse ash”, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 22, n. 6, pp. 1844-1851, Jun. 2020.
- [64] WANG, I.F., LEE, C.H., LU, C.K., “Application of Bagasse Ash and Pozzolanic Material to Cement Mortar”, In: International Conference on Power Engineering & Energy, Environment (PEEE 2016), ShangHai, China, Jun. 2016.
- [65] CHENG, A., LIN, W.T., CHAO, S.J., *et al.*, “Variation in Fineness of Cement-Based Composites Containing Sugarcane Bagasse Ashes”. *Advanced Materials Research*, v. 894, pp. 13-17, Feb. 2014.
- [66] PAULA, M.O., TINÔCO, I.F.F., RODRIGUES, C.de S., *et al.*, “Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 3, pp. 353–357, Mai/Jun. 2009.
- [67] ARENAS-PIEDRAHITA, J.C., MONTES-GARCÍA, P., MENDOZA-RANGEL, J.M., *et al.*, “Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash”, *Construction and building materials*, v. 105, pp. 69-81, Feb. 2016.
- [68] CASTALDELLI, V.N., MORAES, J.C.B, AKASAKI, J.L., *et al.*, “Study of the binary system fly ash/sugarcane bagasse ash (FA/SCBA) in SiO₂/K₂O alkali-activated binders”, *Fuel*, v. 174, pp. 307-316, Jun. 2016.
- [69] JOSHAGHANI, A., RAMEZANIANPOUR, A. A., ROSTAMI, H., “Effect of incorporating Sugarcane Bagasse Ash (SCBA) in mortar to examine durability of sulfate attack”, In: *Proceedings of the Second International Conference on Concrete Sustainability*, pp. 13-15, Madrid, Spain. 2015.
- [70] REZA, S.M.S., “Experimental studies of strength and cost analysis of mortar using bagasse waste obtained from sugarcane factory of Bangladesh”, *Journal of Environmental Treatment Techniques*, v. 7, n. 3, pp. 300-305, Sep. 2019.
- [71] PRAVEENKUMAR, S., SANKARASUBRAMANIAN, G., SINDHU, S., “Strength, permeability and microstructure characterization of pulverized bagasse ash in cement mortars”, *Construction and Building Materials*, v. 238, pp. 117691, Mar. 2020.
- [72] PAULA, M.O., TINÔCO, I.F. F., RODRIGUES, C. de S., *et al.*, “Sugarcane Bagasse ash as a partial-Portland-cement-replacement material”, *Dyna*, v. 77, n. 163, pp. 47-54, Jul-Sep. 2010.
- [73] ANDREÃO, P.V., SULEIMAN, A.R., CORDEIRO, G.C., *et al.*, “Sustainable use of sugarcane bagasse ash in cement-based materials”, *Green Materials*, v. 7, n. 2, pp. 61-70, Jun. 2019.
- [74] MALDONADO-GARCÍA, M.A., HERNÁNDEZ-TOLEDO, U.I., MONTES-GARCÍA, P., *et al.*, “The influence of untreated sugarcane bagasse ash on the microstructural and mechanical properties of mortars”, *Materiales de Construcción*, v. 68, n. 329, pp. 1-12, Jan-Mar. 2018.
- [75] PEREIRA, A.M., MORAES, J.C.B, MORAES, M.J.B, *et al.*, “Valorisation of sugarcane bagasse ash (SCBA) with high quartz content as pozzolanic material in Portland cement mixtures”, *Materiales de Construcción*. v. 68, n. 330, Apr–Jun. 2018.
- [76] PEREIRA, A., AKASAKI, J.L., MELGES, J.L.P., *et al.*, “Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag”, *Ceramics International*, v. 41, n. 10, pp. 13012-13024, Dec. 2015.
- [77] MURUGESAN, T., VIDJEAPRIYA, R., BAHURUDEEN, A., “Development of sustainable alkali activated binder for construction using sugarcane bagasse ash and marble waste”, *Sugar Tech*, v. 22, n. 5, pp. 885-895, Apr.2020.

- [78] MALDONADO-GARCÍA, M.A., HERNÁNDEZ-TOLEDO, U.I., MONTES-GARCÍA, P., *et al.*, “Long-term corrosion risk of thin cement composites containing untreated sugarcane bagasse ash”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 31, n. 4, pp. 04019020, Apr. 2019.
- [79] GARCÍA, H.L.C., MOLINA, W.M., GUZMAN, E.M.A., *et al.*, “Prediction of Compressive Strength and Modulus of Rupture of Mortar Containing Added Ash Bagasse”. In: *2nd International Conference on Green Materials and Environmental Engineering*, Atlantis Press, Phuket, Thailand, Dec. 2015.
- [80] BERENQUER, R.A., CAPRARO, A.P.P.B., MEDEIROS, M.H.F., *et al.*, “Sugar cane bagasse ash as a partial substitute of Portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 8, n. 2, pp. 103655, Apr. 2020.
- [81] PATIL, C., MANJUNATH, M., HOSAMANE, S., *et al.*, “Pozzolonic activity and strength activity index of bagasse ash and fly ash blended cement mortar”, *Materials Today: Proceedings*, v. 42, pp. 1456-1461, Mar. 2021.
- [82] LE, D.H., SHEEN, Y.N., LAM, M.N.T. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with sugarcane bagasse ash–slag blended cement. *Construction and Building Materials*, v. 185, p. 138–147, Oct. 2018.
- [83] CORDEIRO, L.B., BERENQUER, R.A., ANDRADE, G.P., *et al.*, “Case Study on the Impact of Alkali-Aggregate Reaction on a Residential Buildings Concrete Structure”, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 20, pp. 12095-12108, 2015.
- [84] BAHURUDEEN, A., SANTHANAM, M., “Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash”, *Cement and Concrete Composites*, v. 56, pp. 32-45, Feb. 2015.
- [85] BEZERRA, A.C.S., SARAIVA, S.L.C., LARA, L.F.S., *et al.*, “Effect of partial replacement with thermally processed sugar cane bagasse on the properties of mortars”, *Revista Matéria*, v. 22, n.1, e11785, 2017.
- [86] TORRES, S.M., LIMA, V.E., BASTO, P.A., *et al.*, “Assessing the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash using X-ray diffraction”, *Construction and Building Materials*, v. 264, Dec. 2020.

ORCID

Wdyelle Elcine de Carvalho Matos

<https://orcid.org/0000-0002-7535-9021>

Hitalo de Jesus Bezerra da Silva

<https://orcid.org/0000-0001-6008-3600>

Gilvan Moreira da Paz

<https://orcid.org/0000-0002-6849-0320>

Valdeci Bosco dos Santos

<https://orcid.org/0000-0002-2386-5424>