



## Cinzas pozolânicas produzidas com lixiviação ácida de biomassas

**Mônica Nunes Lemos<sup>(1)</sup>; Kristian Vinco Xavier<sup>(2)</sup>; Charles Prado Ferreira de Lima<sup>(3)</sup>; Guilherme Chagas Cordeiro<sup>(4)</sup>**

(1) UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – monica.nlemos@hotmail.com; (2) UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – kristianvinco@gmail.com; (3) UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – pflcharles@gmail.com; (4) UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – gcc@uenf.br

### RESUMO

Este trabalho tem por objetivo estudar a produção e avaliar as características físicas e químicas de cinzas da casca de arroz (CCA), do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) e da folha de milho (CFM) com vistas à aplicação como pozolanas de elevada reatividade. As etapas de produção das cinzas consistiram basicamente de coleta e preparação das matérias-primas, tratamento químico por lixiviação com ácido cítrico, queima conjugada (beneficiamento térmico) e moagem ultrafina das cinzas produzidas (beneficiamento mecânico). A elevada pozzolanidade das cinzas foi confirmada em ensaios atividade pozzolânica (índice de desempenho) e pelas mudanças na cinética de hidratação de pastas cimentícias observadas em ensaio de calorimetria isotérmica.

**Palavras-chave:** Pozzolana de biomassa, Moagem ultrafina, Queima conjugada.

## Pozzolanic ashes produced from biomass acid leaching

### ABSTRACT

This study aims to study the production and the physical and chemical characterization of rice husk (CCA), sugar cane bagasse (CBCA), and corn straw (CFM) ashes for using as highly reactive pozzolans. The stages of the ash production basically consisted of raw material collection, chemical treatment by citric acid leaching, conjugated burning (thermal processing) and ultrafine grinding (mechanical processing) of the produced ashes. The high pozzolanicity of the ashes was confirmed in tests pozzolan activity (performance index) and hydration kinetics of cement pastes by isothermal calorimetry.

**Key-words:** Biomass pozzolan, Ultrafine grinding, Conjugated burning.



## 1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil gera impactos ambientais significativos tais como o alto consumo energético e de recursos naturais, elevada emissão de gases intensificadores de efeito estufa e geração de resíduos. A produção do cimento Portland contribui expressivamente para esse cenário. Esta atividade foi responsável por cerca de 2,6% das emissões de gases de efeito estufa no Brasil em 2016 <sup>(1)</sup>, com destaque para o CO<sub>2</sub>, que é liberado em grandes quantidades durante a produção do clínquer.

Neste contexto, o uso de resíduos industriais e agroindustriais em substituição parcial do cimento Portland tem sido fundamental para mitigar os impactos causados pela produção do cimento, além de possibilitar o reaproveitamento destes materiais <sup>(2)</sup>. Materiais pozolânicos e fíleres são utilizados como adições em cimentos comerciais em todo mundo. As pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, finamente moídos e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio proveniente das reações de hidratação do cimento e geram silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e aluminatos hidratados <sup>(3)</sup>.

Estudos sobre os efeitos de adições pozolânicas mostraram melhorias nas propriedades de produtos cimentícios em relação ao comportamento reológico <sup>(4)</sup>, à durabilidade <sup>(3,5)</sup> e ao desempenho mecânico <sup>(3,6)</sup>. Isso se deve ao aumento da formação de compostos hidratados decorrentes das reações pozolânicas <sup>(3)</sup> e ao efeito de preenchimento da matriz cimentícia proporcionado pelas partículas finas da adição mineral <sup>(7)</sup>. Pozolanas oriundas de resíduos necessitam, em geral, de diferentes processos para otimizar sua reatividade. Nesse aspecto, vale ressaltar o emprego de processos térmicos <sup>(8-10)</sup>, mecânicos <sup>(11)</sup> e químicos <sup>(12)</sup> utilizados na produção de pozolanas. Vayghan *et al.* <sup>(13)</sup> mostraram que tratamentos químicos de resíduos com lixiviação ácida podem potencializar o desempenho de cinzas em sistemas cimentícios pela a eliminação de óxidos contaminantes e aumento na concentração de sílica.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo estudar a produção e avaliar as características físicas e químicas de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), da casca de arroz (CCA) e da folha de milho (CFM) com vistas à aplicação como pozolanas de elevada reatividade. As etapas de produção das cinzas consistiram basicamente de coleta e preparação das matérias-primas, tratamento químico por lixiviação com ácido cítrico, queima conjugada (beneficiamento térmico) e moagem ultrafina das cinzas produzidas (beneficiamento mecânico). A escolha dos resíduos se



justifica pela enorme oferta de bagaço, casca de arroz e folhas de milho no Brasil <sup>(14)</sup> e da presença predominante de sílica em sua composição química <sup>(2,3,7,10,15)</sup>.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A produção das cinzas (CCA, CBCA e CFM) ocorreu a partir de amostras de casca de arroz, bagaço de cana-de açúcar e folha de milho coletadas nos municípios de Mogi das Cruzes-SP, Campos dos Goytacazes-RJ e Castelo-ES, respectivamente. Após a coleta, todas as matérias-primas foram lavadas em água corrente para a eliminação de eventuais impurezas oriundas do ambiente de coleta, seguida de secagem em estufa por 24 h a 100 °C.

Para a produção da CCA e da CFM as matérias-primas foram submetidas à lixiviação (tratamento químico) com uma solução a 10% de ácido cítrico anidro (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>), por 72 h em temperatura ambiente. Em seguida, cada amostra foi lavada continuamente com água deionizada e filtrada com papel filtro qualitativo até a subida do pH para valores próximos a 6 (valor de pH da água deionizada utilizada). Por fim, o material lixiviado foi seco em estufa por 24 h a 100 °C <sup>(16)</sup>.

Após essa etapa, a casca de arroz e a folha de milho lixiviadas foram submetidas a uma queima conjugada, ou seja, uma queima em duas etapas de acordo com os procedimentos sugeridos por Andreão *et al.* <sup>(17)</sup>. Na primeira etapa de queima, os materiais residuais lixiviados foram calcinados em um forno rudimentar adaptado de Sugita <sup>(8)</sup> para a redução da quantidade de matéria orgânica. É importante ressaltar que essa queima objetivou otimizar o consumo energético, uma vez que a energia de combustão é fomentada pelo próprio material. Posteriormente, as duas cinzas geradas na primeira etapa foram requeimadas forno mufla a 600 °C em ambiente oxidante, com taxa de aquecimento de 10 °C/min e tempo de residência de 3 h <sup>(18)</sup>.

A produção de CBCA consistiu nos mesmos processos apresentados anteriormente, com exceção da etapa de lixiviação com ácido cítrico, que foi realizada entre as duas etapas da queima conjugada. Essa mudança ocorreu em razão do reduzido rendimento de CBCA em comparação com as demais cinzas estudadas. Após processo de queima, todas as cinzas foram cominuídas em moinho atritor (Union Process) com vistas à obtenção de produtos com granulometrias similares e com tamanho característico  $D_{50}$  em torno de 10 µm <sup>(17)</sup>.

A composição de óxidos das cinzas produzidas (CCA, CBCA e CFM) foi determinada por análise semi-quantitativa em espectrômetro de fluorescência de raios X (Shimadzu EDX-720). O ensaio de



perda ao fogo foi realizado em concordância com a NBR NM 18 <sup>(19)</sup>. A distribuição do tamanho de partícula das amostras foi determinada por ensaio de granulometria a laser (Malvern Mastersizer 2000). A superfície específica BET foi obtida em ensaio de adsorção de nitrogênio (Micromeritics Tristar II 3020). A composição mineralógica das cinzas foi obtida por difratometria de raios X em difratômetro Rigaku Miniflex 600, operando com radiação de Cu- $\alpha$ , tensão de 40 kV, corrente de 15 mA, passo de 0,02° e velocidade angular de 10°/min. Os dados foram coletados entre 8° e 70°.

A atividade pozolânica das cinzas foi avaliada pelo índice de desempenho mecânico (ID) <sup>(20)</sup>, que é obtido pela relação entre a resistência à compressão aos 28 dias de uma argamassa com substituição de 25% em massa do cimento Portland por uma adição mineral e a resistência de uma argamassa de referência. A dosagem das argamassas foi estabelecida para relações água-material cimentício e areia-material cimentício (cimento e cinza) iguais a 0,48 e 3,0, respectivamente. Um cimento CPP classe G <sup>(21)</sup> foi utilizado nessa fase da pesquisa.

Na Tabela 1 são apresentados os teores de superplastificante (éter carboxílico modificado) usados em cada mistura para manutenção da consistência das argamassas na faixa definida em norma. Para cada mistura foram moldados 4 corpos de prova cúbicos de 2,54 cm de aresta, que foram mantidos nos moldes por 24 h em ambiente úmido. Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados e mantidos imersos em solução saturada com cal por 28 dias. O ensaio de compressão axial foi realizado em uma máquina universal de ensaios Shimadzu UHI-500kN, com velocidade de carregamento de 0,5 mm/min.

**Tabela 1 – Teor de superplastificante das argamassas.**

Argamassa	A-REF**	A-CCA	A-CBCA	A-CFM
Teor de SP (%)*	0,065	0,844	0,504	0,546

\* % de sólidos em relação ao material cimentício.

\*\* A-REF – argamassa de referência; A-X argamassa com a cinza X (CCA, CBCA ou CFM).

O estudo da cinética de hidratação em pastas cimentícias foi realizado por meio do ensaio de calorimetria isotérmica. Dessa forma, pastas com 10% e 20% de substituição em massa do cimento Portland por cada tipo de cinza produzida foram confeccionadas, bem como uma pasta de referência, confeccionada sem o uso de adição mineral. Nesse processo foram usados cimento CPP classe G, água deionizada e superplastificante. A dosagem das pastas foi definida a partir de uma relação água-material cimentício igual a 0,4. A Tabela 2 apresenta o teor de superplastificante usado na confecção das pastas. As pastas foram denominadas de P-REF (referência) e P-X-Y, sendo X o tipo de cinza e Y o teor de substituição empregado (% em massa).



**Tabela 2 – Teor de superplastificante das pastas.**

Pasta	P-REF	P-CCA-10	P-CCA-20	P-CBCA-10	P-CBCA-20	P-CFM-10	P-CFM-20
Teor de SP (%) <sup>*</sup>	0,03	0,10	0,21	0,05	0,10	0,07	0,13

\* % de sólidos em relação ao material cimentício.

Todas as pastas foram misturadas seguindo o mesmo procedimento, que consistiu em homogeneização da água deionizada e aditivo superplastificante, seguido de mistura manual com espátula, por 30 s, da parte líquida com o material cimentício. Posteriormente, a mistura foi concluída em misturador Hamilton Beach por 30 s a 260 rpm e por 60 s a 600 rpm. Imediatamente após o final da mistura, amostras de cada mistura foram inseridas no calorímetro isotérmico Calmetrix I-CAL 2000. As pastas foram monitoradas quanto ao perfil de liberação de calor na hidratação por 72 h a  $25 \pm 0,1$  °C.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta a composição de óxidos e os valores de perda ao fogo das diferentes cinzas, que apresentam cerca de 90% de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) em suas composições. No que diz respeito aos óxidos contaminantes, observou-se baixos teores de  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{SO}_3$  nas três cinzas. A presença excessiva desses compostos seria altamente indesejável, uma vez que eles ocasionam problemas de durabilidade, como por exemplo as reações álcali-agregados <sup>(22)</sup>. A elevada concentração de sílica nas cinzas e os baixos teores de óxidos contaminantes ressaltam a influência da lixiviação ácida no processo de purificação dos materiais estudados. Resultados similares foram obtidos em estudos prévios <sup>(13,16,23)</sup>. Os valores de perda ao fogo apontaram teores de carbono nas cinzas significativamente inferiores ao teor máximo de 6% estabelecido pela NBR 12653 <sup>(24)</sup>. Esse resultado é satisfatório, uma vez que o carbono residual reduz a concentração de sílica e prejudica a reatividade da cinza pozzolânica <sup>(25)</sup>.

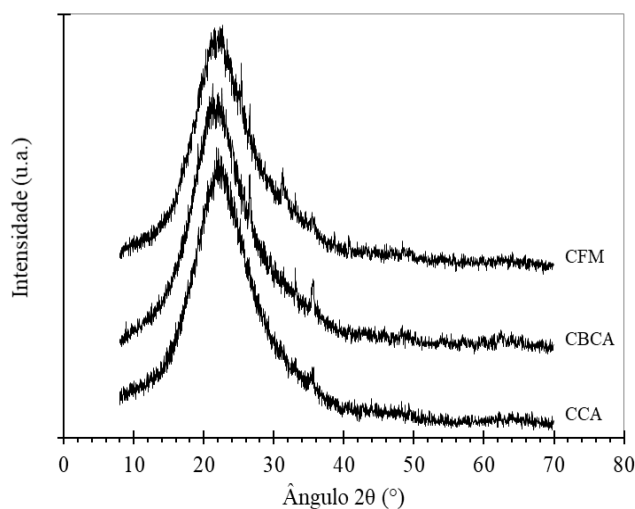
Os difratogramas de raios X das amostras CCA, CBCA e CFM estão indicados na Figura 1 e apontam que as três cinzas não contém fases cristalinas com intensidade significativa. Um típico halo de amorfização formou-se entre os ângulos  $2\theta$  de 20 e 30°, indicando que os procedimentos de queima e moagem mantiveram a sílica presente nas plantas em estado amorfo. Essa característica é fundamental para a produção de pozolanas e coincide com estudos prévios <sup>(12,16,23)</sup>.



Tabela 3 – Composição de óxidos e perda ao fogo das cinzas pozolânicas (%).

Óxido	CCA	CBCA	CFM
SiO <sub>2</sub>	92,3	90,8	89,1
K <sub>2</sub> O	-	2,4	2,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,9	-	-
CaO	0,1	0,9	1,6
SO <sub>3</sub>	1,4	2,3	2,7
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	0,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3	1,6	0,3
MnO	-	0,1	-
TiO <sub>2</sub>	-	-	0,1
Perda ao fogo	3,0	2,0	3,2

Figura 1 - Difratogramas de raios X das amostras de CCA, CBCA e CFM.



A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica das amostras de CCA, CBCA e CFM, indicando valores de tamanho característico  $D_{50}$  próximos a 10  $\mu\text{m}$  e inferiores ao valor do cimento utilizado (14,9  $\mu\text{m}$ ). Esses resultados evidenciam a eficiência da moagem na homogeneização das partículas, condição necessária para o efeito pozolânico dos materiais, visto que a atividade pozolânica é fortemente ligada ao tamanho e área superficial das partículas <sup>(26)</sup>.

Os valores de índice de desempenho mecânico estão indicados na Tabela 4. Os resultados mostraram que todas as cinzas apresentaram valores de ID superiores a 100%, com destaque para a CFM, que alcançou um índice de 148%. Tal resultado evidencia os efeitos físicos e químicos provocados pela adição pozolânica, associados ao elevado teor de sílica amorfa, reduzida perda ao fogo e alta superfície específica da cinza. O desempenho da CBCA foi superior ao observado em trabalhos que indicaram sua média atividade pozolânica <sup>(17,25)</sup> e ligeiramente superior ao valor observado para a CCA (136%). Isso pode ser atribuído à reduzida contaminação da amostra por quartzo e ao processo de lixiviação com ácido cítrico adotado.



Figura 2 - Distribuição do tamanho de partículas do cimento e das adições minerais.

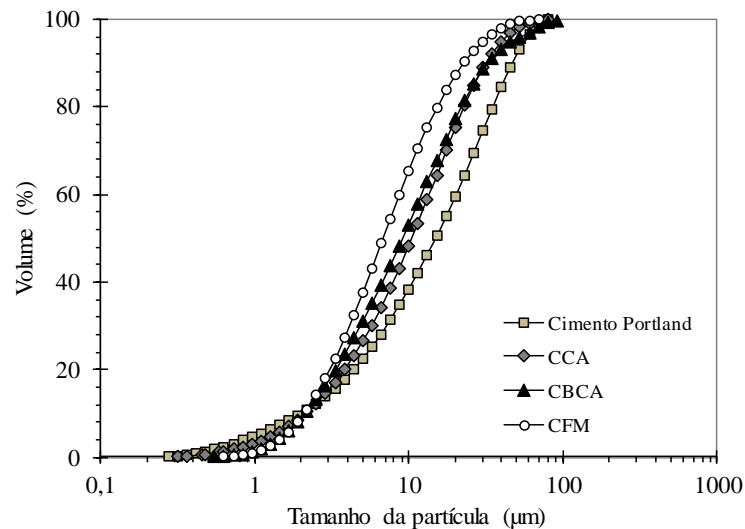


Tabela 4 – Principais parâmetros físicos das cinzas.

Cinza	$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	Superfície específica BET ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	ID* (%)
CCA	10,5	63.232	136
CBCA	9,2	13.332	107
CFM	6,8	91.630	148

\*parâmetro físico também referido como IAP (índice de atividade pozolânica).

A Figura 3 apresenta as curvas de fluxo de calor de hidratação das pastas com CCA, CBCA, CFM e da pasta de referência. Observou-se, como indicado na Tabela 5, que a adição de CCA promoveu ligeira redução do período de dormência da pasta cimentícia. Tal fenômeno ocorreu em função de efeitos de diluição e, principalmente, nucleação heterogênea associados a essa adição mineral <sup>(26)</sup>. Por outro lado, as pastas com CBCA e CFM apresentaram períodos de dormência mais prolongados que a referência, o que pode ser explicado pela presença de  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{SO}_3$  em ambas as cinzas, como foi previamente observado por Andreão *et al.* <sup>(17)</sup> para amostras de cinzas do bagaço.

A Figura 4 apresenta as curvas de energia acumulada ao longo de 72 horas, que revelam uma aceleração das reações de hidratação promovida pela CCA, sobretudo nas 24 h iniciais. As pastas com 20% de CBCA e CFM apresentaram menor calor acumulado que a referência, evidenciando o efeito de diluição e o retardo na hidratação provocados por ambas as cinzas. O calor máximo acumulado obtido para a P-CBCA-20, por exemplo, foi de 245,7 J/g (Tabela 5), que representou uma queda de cerca de 8% em relação à mistura P-REF.



Figura 3 - Fluxo de calor normalizado, por grama de material cimentício, de pastas com 10 e 20% de CCA, CBCA e CFM e referência.

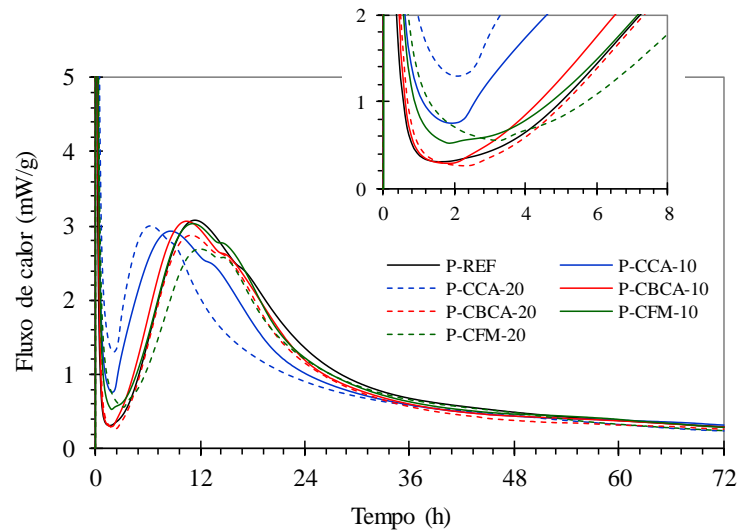
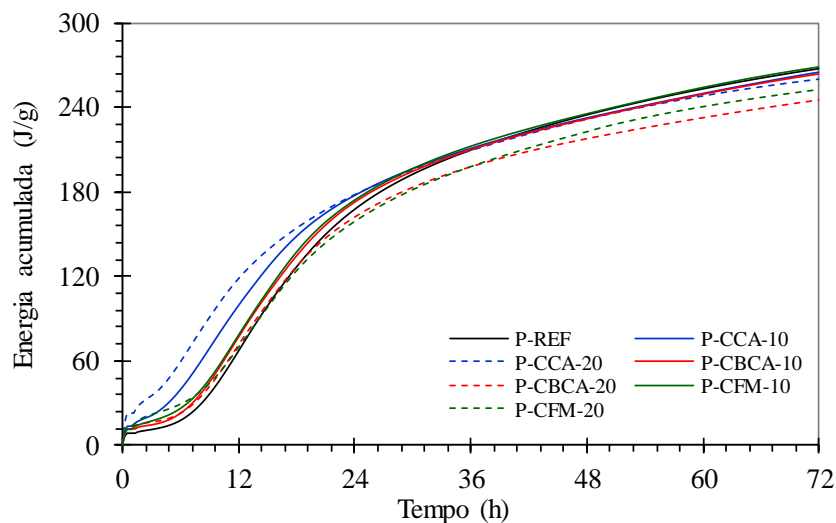


Tabela 5 - Dados do fluxo de calor e de energia acumulada das diferentes misturas.

Pasta	Final do período de dormência (h:min)	Fluxo de calor máximo (mW/g)	Energia acumulada às 72 h (J/g)
P-REF	03:24	3,07	267,3
P-CCA-10%	02:24	2,93	265,9
P-CCA-20%	02:30	3,00	260,5
P-CBCA-10%	03:00	3,06	264,2
P-CBCA-20%	03:30	2,87	245,7
P-CFM-10%	03:40	3,03	268,8
P-CFM-20%	04:50	2,69	252,9

Figura 4 - Curvas de energia acumulada da P-REF e das P-CCA, P-CBCA e P-CFM com teores de substituição de 10 e 20% relativos à massa de material cimentício nas pastas.







## 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram concluir que as cinzas produzidas pela confluência de diferentes métodos de beneficiamento apresentaram propriedades típicas de materiais pozolânicos. A composição de óxidos das cinzas mostrou elevados teores de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) em estado amorfo e reduzidos valores de perda ao fogo, resultado de um processo de calcinação eficiente.

A presença predominante de sílica amorfa, em conjunto com elevado valores de superfície específica, possibilitou a classificação das três cinzas como pozolanas na avaliação pelo índice de desempenho, uma vez que todos os resultados foram significativamente superiores ao mínimo descrito em norma (90%).

Além disso, as cinzas em substituição parcial ao cimento Portland (10 e 20% em massa) promoveram pequenas alterações na cinética de hidratação de pastas cimentícias a poucas idades, sobretudo a CBCA e CFM. Desta forma, conclui-se que procedimentos de lixiviação ácida, queima conjugada e moagem de alta energia foram eficientes para a produção de pozolanas com resíduos de importantes biomassas. Ressalta-se, por fim, que o procedimento de lixiviação pode ser realizado com efluentes ácidos dentro das indústrias que utilizam biomassas para geração de energia, como é o caso do vinhoto produzido nas destilarias de etanol, por exemplo.

## 5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Além disso, os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), por auxílio financeiro, e ao Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, onde as análises granulométricas foram realizadas.

## 6. REFERÊNCIAS

1. AGÊNCIA FAPESP. **Especialistas discutem papel da indústria do cimento nas emissões de CO<sub>2</sub>**. 2016. FAPESP. Disponível em: <<http://agencia.fapesp.br/especialistas-discutem-papel-da-industria-do-cimento-nas-emissoes-de-co2/23449/>>. Acesso em: 16 jun. 2019.
2. GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, v.29, p. 515-524, 2007.



3. MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanitic and cementitious materials**. 1 ed. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 191 p., 1996.
4. CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIN, E. M. R. Use of ultra-fine sugar cane bagasse ash as mineral admixture for concrete. **ACI Materials Journal**, v. 105, p. 487-493, 2008.
5. HOPPE FILHO, J.; SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E. Potencial de mitigação do ataque por sulfatos provocado por adições minerais. In: **1º CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES**, Foz do Iguaçu, 2014. Anais do 1º Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, Foz do Iguaçu: ALCONPAT, 2014.
6. CORDEIRO, G. C.; PAIVA, O. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R.; TAVARES, L. M. Long-term compressive behavior of concretes with sugarcane bagasse ash as a supplementary cementitious material. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 46, p. 564-573, 2018.
7. CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Pozzolanitic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 410-418, 2008.
8. SUGITA, S. **Method of producing active rice husk ash**. United States Patent US 5329867 A, 1994.
9. SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, p. 441-454, 2001.
10. CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Effect of calcinations temperature on the pozzolanitic activity of sugar cane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 3301-3303, 2009.
11. CORDEIRO, G. C.; TAVARES, L. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Improved pozzolanitic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 269-275, 2016.
12. REAL, C.; ALCALÁ, M. D.; CRIADO, J. M. Preparation of silica from rice husks. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 79, p. 2012-2016, 1996.
13. VAYGHAN, A. G.; KHALOO, A. R.; RAJABIPOUR, F. The effects of a hydrochloric acid pre-treatment on the physicochemical properties and pozzolanitic performance of rice husk ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 131-140, 2013.
14. IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola - LSPA**. 2019. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 12 jun. 2019.
15. ADESANYA, D. A.; RAHEEM, A. A. Development of corn cob ash blended cement. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 347-352, 2009.
16. CORDEIRO, G. C.; VIEIRA, A. P.; LOPES, E. S. Study on the pozzolanitic activity of sugar cane straw ash produced using different pretreatments. **Química Nova**, v. 40, p. 264-269, 2017.
17. ANDREÃO, P. V.; SULEIMAN, A. R.; CORDEIRO, G. C.; NEHDI, M. L. Sustainable use of sugarcane bagasse ash in cement-based materials. **Green Materials**, v. 7, p. 61-70, 2019.
18. CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 445 p. Tese (Doutorado) - PEC/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.



19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.
20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9831**: Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos - Requerimentos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2006.
22. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 782 p., 2014.
23. KRISHNARAO, R. V.; SUBRAHMANYAM, J.; JAGADISH KUMAR, T. Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 21, p. 99, 2001.
24. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
25. CORDEIRO, G. C.; BARROSO, T. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Enhancement the properties of sugar cane bagasse ash with high carbon content by a controlled re-calcination process. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, p. 1250-1257, 2018.
26. CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, v. 97, p.41-49, 2017.