

AVALIAÇÃO DA POZOLANICIDADE DAS CINZAS DO CAPIM ELEFANTE CAMEROON POR ENSAIOS DE TERMOGRAVIMETRIA

*EVALUATION OF POZOLANIC ACTIVITY OF CAMEROON ELEPHANT GRASS ASHES USING
TERMOGRAVIMETRIC TESTS*

**Elizeth Neves Cardoso Soares¹, Dayana Cristina Silva Garcia², Maria Irene Yoshida³, Maria Teresa
Paulino Aguiar⁴, Roberto Braga Figueiredo⁵**

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. Brasil

¹Engenheira Civil, Mestre em Construção Civil. E-mail: elizethcard@hotmail.com

²Engenheira Civil, Mestre em Construção Civil. E-mail: dayanacsgarcia@yahoo.com.br

³Doutora em Química. E-mail: mirene@ufmg.br

⁴Doutora em Engenharia Metalúrgica. E-mail: teresa@demc.ufmg.br

⁵Doutor em Engenharia Mecânica. E-mail: figueiredo@demc.ufmg.br

RESUMO

A incorporação de resíduos industriais em materiais de construção é de grande interesse tecnológico. O objetivo do trabalho foi avaliar a atividade pozolânica de cinzas de capim elefante por meio de análise térmica e ensaio de condutividade elétrica. As cinzas foram obtidas pela queima do capim elefante a 350 °C e 600 °C, por 3 horas em cada temperatura. A caracterização foi realizada por meio de fluorescência e difração de raios X. A análise térmica foi realizada em pastas de cimento com cimento tipo CPV, fator água/aglomerante de 0,5 e cura nas idades de 7, 28 e 90 dias. Foram analisadas duas condições, a primeira sem adição de cinza e a segunda com adição de cinza. O principal constituinte da cinza foi o SiO₂ amorfo, contudo, o teor de álcalis e de matéria orgânica foi alto. Com relação ao ensaio de variação de condutividade elétrica, as cinzas não foram consideradas como pozolanas, no entanto foi observada a diminuição da quantidade de hidróxido de cálcio nas pastas de cimento com cinza.

Palavras-chave: atividade pozolânica; materiais cimentícios suplementares; resíduos industriais; análise térmica

ABSTRACT

It is of great technological interest the use of industrial residues in civil construction materials. The objective of the present work is to evaluate the pozzolanic activity of elephant grass ashes using thermogravimetric analysis and electric conductivity tests. The ashes were obtained by calcination in laboratory at 350 °C and 600 °C, for 3 hours in each temperature. The ashes were characterized by X ray fluorescence and diffraction. The thermo analysis was carried out in cement pastes prepared with CPV cement type, water/binder ratio of 0.5 and curing to 7, 28 and 90 days. Two conditions were analyzed, with and without elephant grass ashes addition. The results show that the main constituent of the ashes was amorphous SiO₂. However, the amount of alkalis and organic matter is significant. The electrical conductivity test showed that the ashes are not considered good pozzolans. However, the thermogravimetric analysis showed reduction in the amount of lime in cement pastes with ashes.

Keywords: pozzolanic activity; supplementary cementitious materials; industrial residues; thermo analysis.

1 – INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil se destaca por movimentar grande quantidade de recursos financeiros e serviços, além de provocar a degradação do meio ambiente devido a exploração dos recursos naturais, alta demanda energética e geração de resíduos. O material mais utilizado na construção civil é o concreto, que apresenta como principal constituinte o cimento Portland que é responsável por elevado consumo energético e emissão de CO₂ durante a sua fabricação (METHA e MONTEIRO, 2013). Em função disso, várias pesquisas focam na produção de cimentos que apresentem maior eficiência energética e utilizem recursos naturais renováveis em sua fabricação, além da substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares (CORDEIRO e SALES, 2016).

A vantagem da utilização dos materiais cimentícios suplementares é que eles reduzem a quantidade de clínquer

do cimento e conseqüentemente diminuem a emissão de CO₂ proveniente do processo de fabricação do cimento Portland (ALI; SAIDUR; HOSSAIN, 2011). Outra vantagem é que as adições minerais geralmente são subprodutos industriais e, nesse caso, os resíduos que seriam descartados no meio ambiente serão aproveitados. Além disso, os materiais cimentícios suplementares são responsáveis pela melhoria das propriedades das pastas de cimento, tanto no estado plástico como no estado endurecido (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011). Os materiais cimentícios suplementares são classificados em três tipos: cimentante, fíler e pozolanas. Os materiais cimentantes são aqueles que na presença de água são capazes de reagirem e formarem produtos similares aos obtidos na hidratação do cimento Portland, entretanto, sua hidratação é muito lenta. Por outro lado, o fíler é um material inerte que apresenta a capacidade de

preenchimento de poros e age como pontos de nucleação para hidratação das partículas de cimento (SILVA, 2007).

Os materiais pozolânicos são caracterizados por serem materiais silicosos ou alumino-silicosos, finos e que atuam química e fisicamente nas propriedades das pastas de cimento. Na presença de umidade, as pozolanas reagem com o hidróxido de cálcio e formam silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (MALHOTRA e METHA, 1996). O C-S-H representa a maior porcentagem de materiais sólidos da pasta de cimento, além de ser o principal responsável pelas propriedades dos concretos. Como vantagem da utilização de materiais pozolânicos, pode-se citar as diminuições do calor de hidratação e da porosidade e consequentemente o aumento da durabilidade e a melhoria das propriedades mecânicas de pastas de cimento (SILVA, 2007).

A atividade pozolânica em um material depende de diversos fatores como composição, tipo de estrutura, granulometria e superfície específica. É possível verificar se um material apresenta atividade pozolânica por meio de métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos avaliam a quantidade de hidróxido de cálcio presente em amostras de compósitos cimentícios hidratados. Neste caso, utiliza-se a análise térmica e a difração de raios X. Os métodos indiretos avaliam alguma propriedade do material e relacionam essa propriedade à de um material pozolânico ou inerte como é o caso dos ensaios de variação de condutividade elétrica e de resistência mecânica (FRÍAS *et al.*, 2005).

A análise térmica, mais especificamente a termogravimetria (TG) e a análise térmica diferencial (DTA), permitem determinar a quantidade de fases presente em pastas de cimento, e nesse caso, pode-se verificar se um material é pozolânico pela redução da quantidade de hidróxido de cálcio (ROSZCZYNSKI, 2002). A termogravimetria (TG) relaciona a perda de massa de um determinado material em função da temperatura, o que permite identificar a decomposição, desidratação e oxidação de um composto. No caso das pastas de cimento, os compostos irão apresentar perda de água quimicamente combinada ou desprendimento de CO₂ em temperaturas específicas. Assim, o silicato de cálcio hidratado e outros hidratos, hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio apresentam perda de massa nas faixas de temperaturas de 120-260 °C, 450-530 °C, 530-900 °C, respectivamente (KULIFFAYOVÁ *et al.*, 2011).

O método de variação de condutividade elétrica desenvolvido por Lúxan e colaboradores (LUXÁN; MADRUGA; SAAVEDRA, 1989) é um método indireto para determinar a atividade pozolânica e tem como base a variação da condutividade elétrica de uma solução saturada de hidróxido de cálcio a 40 °C. Se o material for pozolânico, espera-se que a condutividade decresça, uma vez que haverá a diminuição dos íons Ca⁺² e (OH)⁻ na solução. A classificação da pozolanicidade acontece conforme os dados estabelecidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação da atividade pozolânica de um material de acordo com a variação da condutividade elétrica

Classificação do material	Grau	Variação da condutividade elétrica (mS/cm)
Pozolanicidade	Ausente	< 0,4
	Variável	entre 0,4 e 1,2
	Boa	> 1,2

Fonte: (LUXÁN; MADRUGA; SAAVEDRA, 1989).

Os materiais pozolânicos mais conhecidos são a sílica ativa e as cinzas volantes. Entretanto, várias pesquisas estudam a viabilidade da utilização de cinzas provenientes de resíduos agrícolas como materiais pozolânicos. Isso só é possível porque essas cinzas apresentam alta concentração de SiO₂ amorfo (TOBÓN *et al.*, 2012). No entanto, para que estes resíduos sejam utilizados com adição no cimento, eles precisam passar por um pré-processamento. Assim, a queima do material deverá ser realizada com temperatura, taxa de aquecimento, resfriamento e moagem adequados (CORDEIRO, TOLEDO FILHO, FAIRBAIRN, 2009a; CORDEIRO *et al.*, 2009; HERNÁNDEZ *et al.*, 1998). Como exemplo de cinzas provenientes de resíduos agrícolas que apresentam atividade pozolânica, tem-se as cinzas de casca arroz (JAMIL *et al.*, 2013; VAN *et al.*, 2014), de bagaço de cana de açúcar (CORDEIRO *et al.*, 2009; FRÍAS, VILLAR, SAVASTANO, 2011) e trabalhos recentes mostram que as cinzas de capim elefante também podem apresentar atividade pozolânica (NAKANISHI *et al.*, 2016).

O capim elefante foi implantado no Brasil para alimentação de gado, mas apresenta também potencial para ser utilizado como fonte de energia alternativa (FONTOURA; BRANDÃO; GOMES, 2015). Além disso, é rico em sílica e alumina, o que contribui para que o material apresente atividade pozolânica (WANG *et al.*, 2014). Contudo, assim como as demais cinzas obtidas de resíduos agrícolas, a sua composição química é muito variável (QUARCIONI *et al.*, 2015). Isso acontece, pois a composição química das cinzas varia em função das características do solo onde o insumo agrícola é plantado, das condições climáticas, da espécie e da utilização de fertilizantes. Os principais óxidos presente nas cinzas de capim elefante são o SiO₂, K₂O, MgO, CaO e de P₂O₅. Porém apresentaram altos teores de álcalis, o que compromete a qualidade da cinza como material cimentício suplementar (NAKANISHI; *et al.*, 2014a). Os objetivos desse trabalho são produzir cinzas de capim elefante Cameroon (CCEC) por meio do processo de queima controlada em laboratório, determinar composição química das cinzas produzidas e seu potencial para uso como adição mineral pozolânica por meio de análise térmica e ensaio de variação de condutividade elétrica.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar o potencial da cinza de capim elefante Cameroon como material cimentício suplementar foi necessário a produção do material em laboratório e realizar sua caracterização. Foram realizadas análises térmicas e ensaio de variação da condutividade em solução de hidróxido de cálcio. O procedimento adotado constitui-se das etapas descritas a seguir.

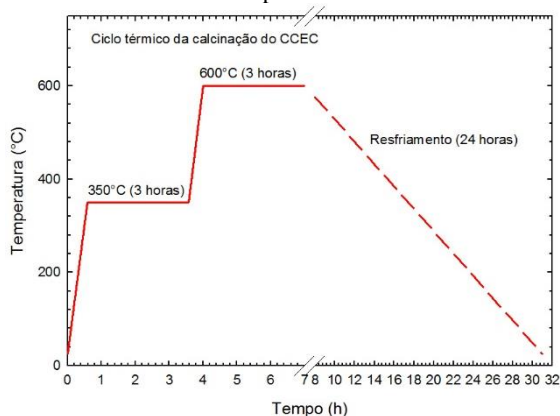
2.1 Obtenção das cinzas

O capim elefante Cameroon utilizado neste trabalho foi cultivado na fazenda Lagoas localizada no município de Divinópolis, MG (Brasil). Aos 150 dias de plantio, amostras do capim foram coletadas manualmente no local e foram utilizadas no estudo apenas as folhas, sem os talos. As folhas foram picadas e colocadas ao sol durante 30 dias para secagem natural. Posteriormente, foi realizada secagem em estufa na temperatura de 105 °C por 24 horas.

Para identificar a temperatura mais adequada para a queima do capim elefante foi realizada a termogravimetria. As análises térmicas foram realizadas no analisador termogravimétrico (TGA) modelo TGA-50/51 da marca Shimadzu. As condições experimentais foram: taxa de aquecimento de 10 °C·min⁻¹, fluxo de nitrogênio de 50 ml·min⁻¹, temperatura variando entre 25 °C até 1.000 °C, cadinho de alumina e massa de amostra de 6 mg.

A calcinação do capim elefante foi realizada em forno tipo Mufla modelo FT 1300/40PC com injeção de ar, com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹ e com dois patamares de temperatura, um a 350 °C e outro a 600 °C. A temperatura foi mantida constante em cada patamar por um período de 3 horas, com tempo total de queima de aproximadamente 7 horas (Figura 1). Após o tempo previsto de queima, a Mufla foi desligada e as cinzas permaneceram dentro do forno para o resfriamento lento, por 24 horas. Essa metodologia é similar a utilizada por Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009b) para a obtenção de cinzas de bagaço de cana de açúcar.

Figura 1 – Regime de temperatura adotado para a queima do capim elefante



Para a homogeneização da granulometria e também para a redução do tamanho dos grãos, a cinza foi moída em moinho de bolas, durante uma hora. Posteriormente, as cinzas foram caracterizadas por fluorescência, perda ao fogo e difração de raios X. A difração de raios X foi realizada no difratômetro Philips, modelo PW 1710, com Cu K α ($k = 1,5406 \text{ \AA}$), passo de 0,06° e tempo de contagem de 1 s. Para a determinação da atividade pozzolânica foi realizada a análise térmica (TG/DTA) e o ensaio de variação da condutividade elétrica.

Neste trabalho foram utilizadas dois tipos de pasta de cimento, uma moldada apenas com cimento e água e a outra com 20% de cinza de capim elefante em substituição parcial

da massa de cimento. As pastas foram moldadas com cimento Portland tipo CPV, fator água/aglomerante de 0,5 e analisadas com tempo de cura de 7, 28 e 90 dias. Para a confecção dos corpos de provas, os materiais secos foram misturados e a água foi adicionada em seguida. As pastas foram moldadas em recipientes plásticos e mantidas vedadas para evitar carbonatação. Após o tempo de cura, as amostras foram moídas em moinho de bolas com câmara fechada e peneiradas até a obtenção de partículas inferiores a 75 μm .

2.2 Análise térmica

A análise térmica, termogravimetria (TG) e a análise térmica diferencial (DTA) das amostras de pasta de cimento foram realizadas no analisador térmico DTG60H marca Shimadzu. A taxa de aquecimento e faixa de temperatura foi semelhante à usada na análise térmica do capim elefante (seção 2.1). A determinação das massas do hidróxido de cálcio e do carbonato de cálcio levou em consideração as perdas de massas referentes à desidratação do hidróxido de cálcio e ao desprendimento do CO₂, respectivamente. A Equação 1 foi utilizada para calcular o Ca(OH)₂, enquanto que a Equação 2 foi utilizada para o CaCO₃ (RAMACHANDRAN, 1969).

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{M_{\text{Ca(OH)}_2}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \text{H}_2\text{O} = \% \quad (1)$$

Em que:

Ca(OH)₂ = Teor de hidróxido de cálcio(%);

M_{Ca(OH)₂} = Massa molar do hidróxido de cálcio;

M_{H₂O} = Massa molar da água;

H₂O = Perda de massa de água referente à decomposição do Ca(OH)₂ (%).

$$\text{CaCO}_3 = \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CO}_2}} \cdot \text{CO}_2 = \% \quad (2)$$

Em que:

CaCO₃ = Teor de carbonato de cálcio (%);

M_{CaCO₃} = Massa molar do carbonato de cálcio;

M_{CO₂} = Massa molar do anidrido carbônico;

CO₂ = Perda de massa referente à decomposição do CaCO₃ (%).

2.3 Condutividade elétrica

O ensaio de condutividade elétrica consiste em medir a variação da condutividade elétrica de uma solução saturada de hidróxido de cálcio a 40 °C e com adição de 5 g de pozzolana em função do tempo. Para a preparação da solução de hidróxido de cálcio 200 ml de água deionizada foi aquecida, mantida em agitação até a estabilização da temperatura em 40 °C ($\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) e 2 g de hidróxido de cálcio foi adicionado em seguida. Após a homogeneização, foi adicionada água deionizada até a obtenção de 1 litro de solução e esta solução foi novamente aquecida e filtrada a 40 °C.

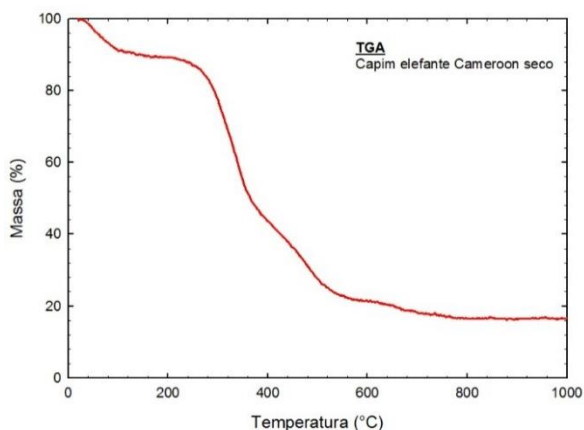
Para a realização do experimento, a primeira medida de condutividade elétrica foi realizada em 200 mL da solução saturada de hidróxido a 40 °C. Em seguida foram adicionadas 5g das cinzas do capim elefante e foram feitas medidas regulares de condutividade elétrica durante duas horas. Todo o experimento foi realizado em frascos de plásticos e durante as medições, a solução foi mantida vedada para evitar a sua carbonatação.

A cinza de capim elefante apresenta compostos que se dissociam em íons na presença de água e isso compromete a eficácia da medida da reação pozolânica. Assim, para avaliar a dissociação desses íons, a condutividade elétrica das cinzas misturadas apenas em água deionizada foi determinada nas mesmas condições descritas acima. Este procedimento foi proposto por Payá *et al.* (2001) para avaliar a pozolanicidade de materiais com alto teor de sais. A perda de condutividade pela fixação do hidróxido de cálcio foi determinada pela diferença entre as curvas da variação de condutividade elétrica em solução saturada de hidróxido de cálcio e em água deionizada.

3 – RESULTADOS

A curva de TGA do capim elefante está apresentada na Figura 2. Verifica-se que a maior perda de massa aconteceu na faixa de 200 °C e 400 °C devido ao desprendimento de materiais voláteis, provavelmente matéria orgânica. Além disso, os dados indicam que não ocorrem modificações significativas de massa em temperaturas superiores a 600 °C.

Figura 2 – Perda de massa do capim elefante com o aumento da temperatura



A composição química da cinza de capim elefante Cameroon (CCEC), determinada por fluorescência, está apresentada na Tabela 2. Observa-se que a cinza apresenta como principal constituinte o SiO₂ e baixos teores de Al₂O₃ e Fe₂O₃. Além disso, a cinza apresenta quantidades consideráveis de K₂O, P₂O₅, CaO e MgO. Com relação a perda ao fogo, o valor foi de 8,67%. Sabe-se que a perda ao fogo (PF) está relacionada com a quantidade de material volátil no capim, e por causa disso o teor de matéria orgânica residual do capim foi elevado.

Com o resultado da difração de raios X observa-se que as cinzas apresentaram padrão majoritariamente amorfo

(Figura 3). No entanto, é possível observar a presença de alguns picos cristalinos ($2\theta \approx 28^\circ$ e $2\theta \approx 40^\circ$) referentes à Silvita.

As curvas de TG e DTA das pastas de cimento sem adição de cinza de capim elefante e com idades de 7, 28 e 90 dias estão apresentadas na Figura 4. A perda de massa inicial observada na curva TG se refere a eliminação da água livre e da água associada ao C-S-H. A acentuada perda de massa entre 390 °C e 450 °C corresponde a desidratação do hidróxido de cálcio, e estas foram maiores na amostra com idade de 90 dias. A faixa de temperatura em que ocorre a desidratação do hidróxido de cálcio também está associada a uma variação pronunciada na curva DTA. A decomposição do carbonato de cálcio ocorre no intervalo de 620 °C e 690 °C e se manteve praticamente constante em todas as idades.

Figura 3 – Difratoograma da cinza de capim elefante

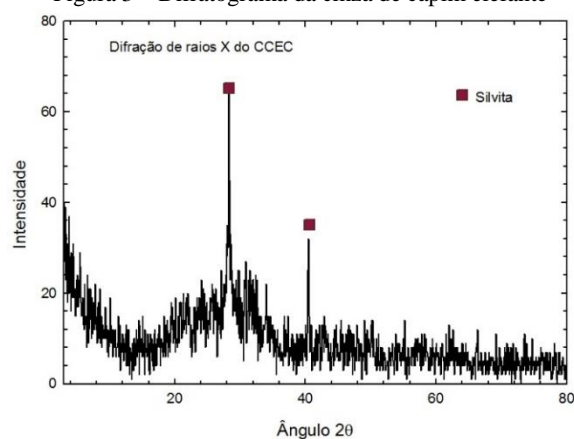
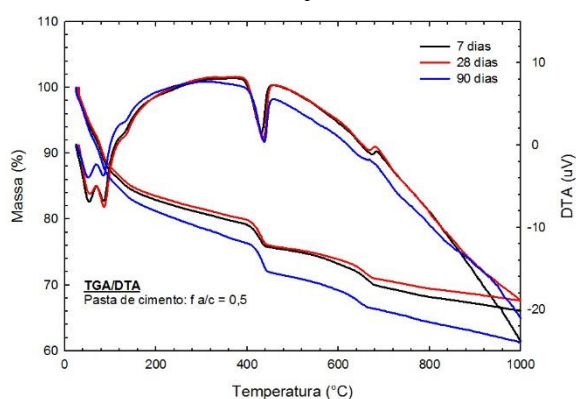


Figura 4 – TG e DTA das pastas de cimento sem adição de cinza de capim elefante



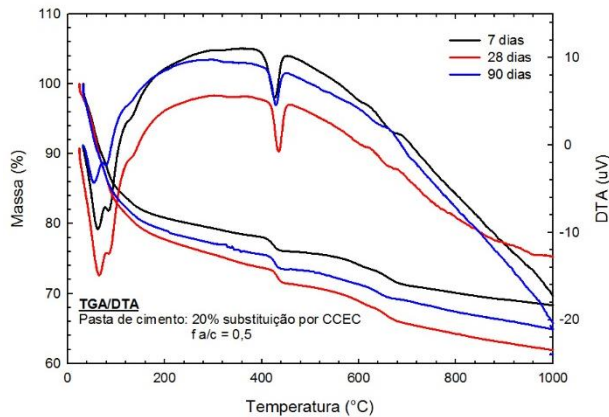
As curvas de TG e DTA das pastas de cimento moldadas com cinza de capim elefante estão apresentadas na Figura 5. O formato das curvas é semelhante ao observado nas pastas de cimento sem adição o que sugere que não há outras fases presentes no material. As perdas de massas referentes ao hidróxido de cálcio e ao carbonato de cálcio apresentaram uma ligeira variação nas diferentes idades de cura. Contudo, os menores valores foram observados na amostra com cura de 90 dias. A perda de massa na faixa de temperatura na qual ocorre a

decomposição do carbonato de cálcio é discreta, o que sugere baixa quantidade desta fase.

Tabela 2 – Composição química da cinza de capim elefante em porcentagem de massa (%)

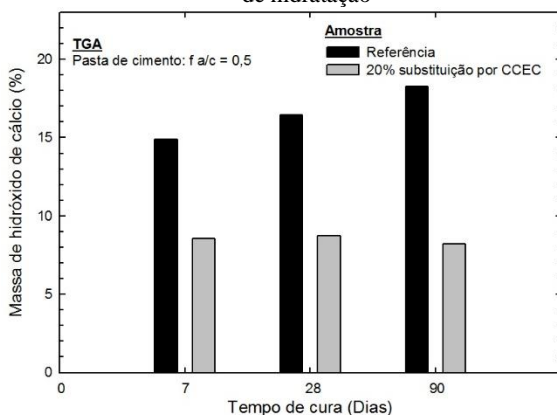
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MnO	CaO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	Cl	S	PF
48,6	0,88	1,02	17,3	0,47	0,12	0,08	6,47	<0,1	7,31	5,95	0,15	0,47	8,67

Figura 5 – TG e DTA das pastas de cimento com 20% de substituição por cinza de capim elefante



Mostra-se, na Figura 6, o resultado dos cálculos da massa de hidróxido de cálcio em função de tempo de hidratação das pastas de cimento referências e com adição de cinzas. Observa-se que a quantidade de hidróxido de cálcio aumentou com o tempo de cura nas amostras de referência, mas se manteve praticamente constante nas pastas com cinza. Este resultado sugere que o consumo do hidróxido de cálcio aumenta com o tempo de cura. Esta observação está em acordo com o previsto para adições pozzolânicas uma vez que a reação pozzolânica é lenta e seu efeito é mais pronunciado em idades avançadas.

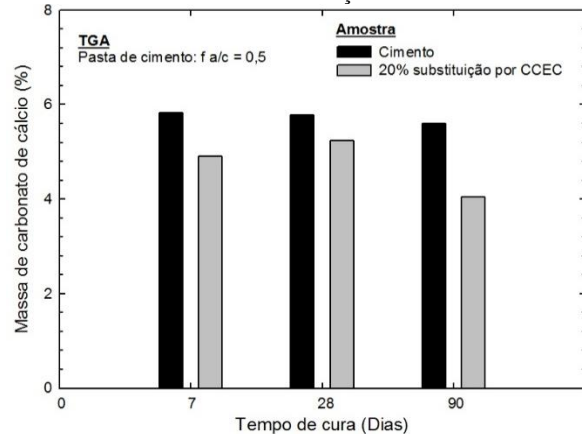
Figura 6 – Variação da massa de hidróxido de cálcio com a idade de hidratação



Os dados referentes à evolução da quantidade de massa do carbonato de cálcio em função do tempo de hidratação das pastas de cimento são mostrados na Figura 7. O carbonato de cálcio se manteve praticamente constante na amostra referência, mas teve uma pequena variação na amostra com cinzas, apresentando menor valor na idade de 90 dias. A quantidade de carbonato de cálcio nas amostras

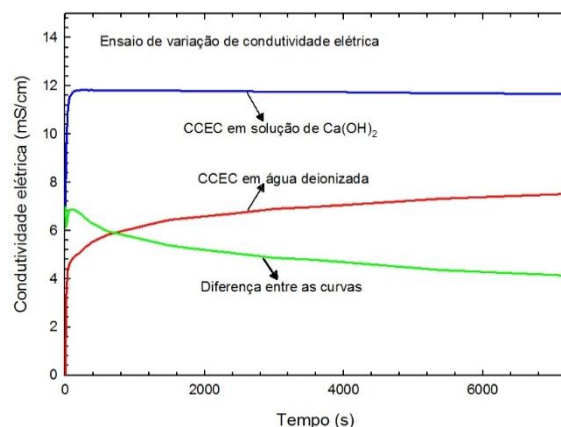
com CCEC é menor do que nas amostras referência o que também sugere atividade pozzolânica neste material.

Figura 7 – Variação da massa de carbonato de cálcio com a idade de hidratação



Os resultados do ensaio de condutividade elétrica da cinza de capim elefante estão apresentados na Figura 8. A curva em azul corresponde ao experimento realizado em solução saturada de hidróxido de cálcio a 40 °C. Observa-se que a condutividade elétrica aumentou consideravelmente no início do ensaio atingindo um valor máximo e reduziu lentamente com o tempo. A curva em vermelho corresponde as medidas de condutividade elétrica da cinza misturada apenas com água deionizada. A condutividade elétrica aumentou com o tempo, e isso mostra a dissociação iônica de compostos presentes na cinza. A curva em verde foi obtida pela diferença entre as duas curvas e é considerada a perda de condutividade relativa à fixação de hidróxido de cálcio. Nota-se que, apesar de uma pequena oscilação no início do ensaio, a condutividade diminuiu com o passar do tempo e isso indica o consumo de hidróxido de cálcio.

Figura 8 – Variação da condutividade elétrica



4 – DISCUSSÃO

A análise da composição química mostrou que o composto mais abundante da cinza é o SiO_2 , seguido pelo K_2O , CaO , P_2O_5 e MgO . Em contrapartida, os teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 são baixos. Este resultado é semelhante ao reportado em outros trabalhos na literatura (NAKANISHI *et al.*, 2014a; NAKANISHI *et al.*, 2014b). Porém, alguns autores reportaram cinzas de capim elefante com maior concentração de Al_2O_3 e menor quantidade de potássio e fósforo (CORDEIRO e SALES, 2015; CORDEIRO e SALES, 2016). Essa diferença da composição química das cinzas é atribuída ao tipo do solo onde o capim elefante é cultivado, à utilização de fertilizantes, condições climáticas e até mesmo à espécie do capim elefante (NAKANISHI *et al.*, 2014b).

Apesar do elevado teor de SiO_2 da CCEC, nenhum pico associado a uma fase cristalina deste composto foi observado na difração de raios X e isso significa que a estrutura da cinza é predominantemente amorfa. É importante ressaltar que diversos trabalhos reportam picos de quartzo na difração de raios X da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, mas a presença desta fase está associada à grande quantidade de poeira aderida na cana-de-açúcar antes da queima (SOARES *et al.*, 2014). Picos de quartzo também foram observados em cinza do capim elefante (CORDEIRO, SALES, 2015; CORDEIRO, SALES, 2016; NAKANISHI *et al.*, 2014a).

A obtenção de SiO_2 com estrutura amorfa é comum em cinzas de casca de arroz. Trabalho recente (SOARES *et al.*, 2014) mostra que as condições de queima influenciam o tipo de estrutura da sílica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Cinza com estrutura amorfa foi obtido em queima a $600\text{ }^\circ\text{C}$, enquanto se obteve sílica com estrutura cristalina (crystalobalita) em queima a $800\text{ }^\circ\text{C}$. Assim, a formação de sílica com estrutura amorfa na CCEC calcinado em $600\text{ }^\circ\text{C}$ está em acordo com o observado na cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Materiais com elevado teor de sílica amorfa são considerados bons candidatos a adições pozolânicas. A soma do teor de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 na CCEC está acima do mínimo estipulado pela norma ABNT NBR 12.653 para materiais pozolânicos (ABNT NBR 12.653: 2014). Contudo, o teor de óxidos alcalinos (K_2O e Na_2O) foi superior ao estabelecido por esta norma, que é de 1,5%. A desvantagem da presença de álcalis é que esses provocam reações indesejáveis e conseqüentemente formam produtos expansivos responsáveis pela propagação de fissuras e comprometimento da matriz cimentícia (HEWLETT, 1990). Uma maneira de reduzir a quantidade de álcalis seria por meio da utilização de tratamentos químicos da cinza de capim elefante. Esses tratamentos podem ser feitos com água deionizada quente ou com soluções de ácido clorídrico (CORDEIRO e SALES, 2015).

Com relação a perda ao fogo, o valor obtido foi considerado alto e isto indica elevada quantidade de matéria orgânica residual nas cinzas. Sabe-se que alta quantidade de carbono residual modifica as propriedades reológicas das pastas de cimento e conseqüentemente prejudicam as propriedades das pastas endurecidas (TASHIMA, 2006).

Além disso, quanto maior a porcentagem da perda ao fogo, menor será a atividade pozolânica da cinza, pois nesse caso o teor de sílica é reduzido (MALHOTRA e METHA, 1996).

Os ensaios de variação da condutividade elétrica mostraram que a cinza não foi considerada como material pozolânico, uma vez que a variação, em 2 minutos, foi inferior a $0,4\text{ mS cm}^{-1}$. Este resultado difere do observado na literatura (CORDEIRO e SALES, 2015), em que a cinza do capim elefante apresentou variação de condutividade superior a $1,2\text{ mS cm}^{-1}$, característica de boa pozolana. Esta diferença é atribuída à diferença de composição química entre as cinzas.

Trabalho anterior (CORDEIRO e SALES, 2015) mostrou, por meio de caracterização por TG/DTA, redução no teor de hidróxido de cálcio em pastas de cimento entre 1 e 28 dias de cura indicando atividade pozolânica nas cinzas de capim elefante. Os presentes resultados, realizados até 90 dias de cura, também indicam consumo do hidróxido de cálcio em amostra com CCEC em relação a amostra de referência. Este resultado também indica atividade pozolânica nas cinzas de capim elefante estudadas.

CONCLUSÕES

Cinzas do capim elefante Cameroon (CCEC) foram obtidas por calcinação em laboratório e sua atividade pozolânica foi avaliada por ensaios de termogravimetria e variação de condutividade elétrica em solução de hidróxido de cálcio. Os resultados levaram às seguintes conclusões:

- O CCEC apresentou teor de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 superiores a 50%, que é o teor mínimo de materiais pozolânicos mas o teor de óxidos alcalinos foi superior ao limite;
- A principal fase encontrada foi a sílica amorfa;
- As cinzas não foram classificadas como pozolânicas de acordo com o ensaio de condutividade elétrica;
- Ensaios de termogravimetria em pastas de cimento mostraram que a adição de CCEC reduz a quantidade de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio e este efeito é mais significativo aos 90 dias de cura, apesar desta adição não ser considerada pozolânica.

REFERÊNCIAS

- ALI, M. B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2252-2261, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2014.
- CORDEIRO, G. C.; SALES, C. P. Pozzolanic activity of elephant grass ash and its influence on the mechanical properties of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 331-336, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.019>.
- _____. Influence of calcining temperature on the pozzolanic characteristics of elephant grass ash. **Cement**

- and Concrete Composites**, v. 73, p. 98-104, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.008>.
- CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. *Química Nova*, v. 32, n. 1, p. 82-86, 2009a. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422009000100016>.
- CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Effect of calcinations temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 10, p. 3301-3303, 2009b. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.013>.
- CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 39, p. 110-115, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.005>.
- FONTOURA, C. F.; BRANDÃO, L. E.; GOMES, L. L. Elephant grass biorefineries: towards a cleaner Brazilian energy matrix? *Journal of Cleaner Production*, v. 96, p. 85-93, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.062>.
- FRÍAS, M.; VILLAR-COCIÑA, E.; SANCHES DE ROJAS, M. I.; VALENCIA-MORALES, E. The effect that different pozzolanic activity methods has on the kinetic constants of the pozzolanic reaction in sugar cane straw-clay ash/lime systems: Application of a kinetic-diffusive model. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 11, p. 2137-2142, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.005>.
- FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO, H. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 4, p. 490-496, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.003>.
- HERNÁNDEZ, J. F. M.; MIDDENDORF, B.; GEHRKE, M.; BUDELMANN, H. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. *Cement and Concrete Research*, v. 28, n. 11, p. 1525-1536, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00130-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00130-6).
- HEWLETT, P. C. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. London: Butterworth-Heinemann, 1990.
- JAMIL, M.; KAISH, A. B. M. A.; RAMAN, S. N.; ZAIN, M. F. M. Pozzolanic contribution of rice husk ash in cementitious system. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 588-593, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.088>.
- KULIFFAYOVÁ, M.; KRAJČI, L.; JANOTKA, I.; ŠMATKO, V. Thermal behaviour and characterization of cement composites with burnt kaolin sand. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 108, n.2, p. 425-432, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1964-0>.
- LOTTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1244-1256, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>.
- LUXÁN; M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. *Cement and Concrete Research*, v. 19, n. 1, p. 63-68, 1989. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(89\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(89)90066-5).
- MALHOTRA, V. M.; METHA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Amsterdam: Gordon & Breach Publishers, 1996.
- METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete Microstructure Properties and Materials**. New York: McGraw-Hill Professional, 2013, 659 p.
- NAKANISHI, E. Y.; FRÍAS, M.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; SANTOS, S. F.; RODRIGUES, M. S.; RODRÍGUEZ, O.; SAVASTANO JR., H. Characterization and properties of elephant grass ashes as supplementary cementing material in pozzolan/Ca(OH)₂ pastes. *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 391-398, 2014a. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.078>.
- NAKANISHI, E. Y.; FRÍAS, M.; SANTOS, S. F.; RODRIGUES, M. S.; VILLA, R. V. D. L.; RODRIGUEZ, O.; SAVASTANO JR., H. Tratamentos térmico e químico para remoção de óxidos alcalinos de cinzas de capim elefante. *Química Nova*, v. 37, n. 5, p. 766-769, 2014b. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140123>.
- NAKANISHI, E. Y.; FRÍAS, M.; SANTOS, S. F.; RODRIGUES, M. S.; VILLA, R. V. D. L.; RODRIGUEZ, O.; SAVASTANO JR., H. Investigating the possible usage of elephant grass ash to manufacture the eco-friendly binary cements. *Journal of Cleaner Production*, v. 116, n. 10, p. 236-243, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.113>.
- PAYÁ, J.; M. V. BORRACHERO; MONZÓ, J.; PERIS-MORA, E.; AMAHJOUR, F. Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 1, p. 11-49, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00434-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00434-8).
- QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; COELHO, A. C. V.; CINCOTTO, M. A. Indirect and direct Chapelle's methods for the determination of lime consumption in pozzolanic materials. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 8, n.1, p. 1-7, 2015. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000100002>.
- RAMACHANDRAN, V. S. **Applications of thermal analysis in cement chemistry**. New York: Chemical Publishing Company, 1969.
- ROSZCZYNSKI, W. Determination of pozzolanic activity of materials by thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 70, n.2, p. 387-392, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1021660020674>.
- SILVA, M. G. D. Cimentos Portland com Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de**

Construção Civil: e princípios de ciência e engenharia dos materiais. São Paulo: ISAIA, G. C., v.1, 2007. cap. 23.

SOARES, M. M. N. S.; POGGIALI, F. S. J.; BEZERRA, A. C. S.; FIGUEIREDO, R. B.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. The effect of calcination conditions on the physical and chemical characteristics of sugar cane bagasse ash. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 67, n. 1, p. 33-39, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672014000100005>.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** 2006. (Doutorado). Universidade do Estado de São Paulo, São Paulo.

TOBÓN, J. I.; PAYÁ, J. J.; BORRACHERO, M. V.; RESTREPO, O. J. Mineralogical evolution of Portland cement blended with silica nanoparticles and its effect on mechanical strength. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 736-742, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.043>.

VAN, V.-T.-A.; RÖBLER, C.; BUI, D.-D.; LUDWIG, H.-M. Pozzolanic reactivity of mesoporous amorphous rice husk ash in portlandite solution. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 111-119, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.046>.

WANG, Y.; SHAO, Y.; MATOVIC, M. D.; WHALEN, J. K. Recycling of switchgrass combustion ash in cement: Characteristics and pozzolanic activity with chemical accelerators. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 472-478, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.114>.