



Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland

Marcos O. de Paula¹, Ilda de F. F. Tinôco², Conrado de S. Rodrigues³, Elizabeth N. da Silva⁴ & Cecília de F. Souza²

RESUMO

Este trabalho, voltado para a avaliação do potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassa, objetivou apresentar opção viável para a destinação deste resíduo, cuja quantidade gerada aumentará significativamente nos próximos anos, em decorrência da ampliação do setor de produção de álcool combustível; além disso, o emprego da CBC como adição mineral, substituindo parte do cimento em argamassas e concretos, contribui para a redução do impacto ambiental desses materiais, em boa parte decorrente da produção do cimento. O procedimento experimental abordou não só caracterização da CBC mas também a avaliação, através de ensaios físicos e mecânicos, em que os resultados mostraram que o bagaço apresenta rendimento de CBC de 10%, com a cinza sendo composta de 84% de SiO₂ e 5% de Carbono. A sílica na CBC apresenta-se na fase amorfa e nas fases cristalinas de cristobalita e quartzo. Os índices de atividade pozzolânica comprovam a reatividade da CBC. Do ponto de vista da resistência à compressão, argamassas com teores de CBC entre 0 e 30% indicaram a possibilidade de substituição de até 20% do cimento pela CBC.

Palavras-chave: manejo de resíduos, materiais de construção, desenvolvimento sustentável

Potential of sugarcane bagasse ash as a partial replacement material for Portland cement

ABSTRACT

This study is focused on the evaluation of the effects of the partial replacement of Portland cement by sugarcane bagasse ash (CBC) in mortars. The main objective was to find a suitable destination for an agricultural residue generated in an increasing amount in Brazil, as a result of the boom of the use of ethanol as an alternative fuel to gasoline. Also, the use of CBC as a mineral admixture in mortars and concretes contributes to a decrease in the environmental impact of these materials related to cement production. Experimental techniques were applied both for the CBC characterization and for the evaluation of its use as a mineral admixture in mortars, based on mechanical and physical tests. The yield of CBC from sugarcane bagasse burning was 10% (weight basis). The CBC presented a SiO₂ content of 84% and a carbon content of 5%. Silica presented both amorphous and crystalline (cristobalite and quartz) structure. The pozzolanicity index applied indicates the reactivity of the CBC. Concerning the compression strength, the results from tests with mortars with up to 30% of CBC content indicated the viability of the partial substitution of cement by up to 20% of the CBC considered.

Key words: solid waste management, building materials, sustainable development

¹ Eng^o. Civil, Estudante de Doutorado, DEA/UFV, Viçosa, MG, Fone: (031) 9172-5297, E-mail: modep@vicosa.ufv.br.

² Eng^a. Agrícola, Prof. Associada, DEA/UFV, Viçosa, MG. Fone: (31) 3899-1884, E-mail(s): iftinoco@ufv.br; cfsouza@ufv.br.

³ Eng^o. Civil, Prof. do DEC/CEFET, MG. Fone: (31) 3319-6826, E-mail: crodrigues@civil.cefetmg.br

⁴ Eng^a. Florestal, Estudante de Doutorado, DEF/UFV. Viçosa, MG. Fone: (31) 3891-5295, E-mail: e_neire@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

A necessidade de geração de energia a partir de fontes renováveis vem impulsionando a produção de álcool etanol a partir da cana-de-açúcar. O Brasil se posiciona, atualmente, como o maior produtor mundial de açúcar e álcool e maior exportador mundial de açúcar. O Proálcool, Programa Nacional do Álcool, é o maior programa comercial de utilização de biomassa para a produção de energia no mundo e representou a iniciativa de maior sucesso mundial, na substituição de derivados de petróleo no setor automotivo, mediante o uso do álcool como combustível único nos veículos movidos a álcool hidratado; ainda hoje há cerca de 4 milhões de veículos que utilizam exclusivamente este derivado da cana como combustível, representando 40% da frota nacional. E não se deve esquecer o importante papel desempenhado na solução do problema da octanagem da gasolina, substituindo o chumbo tetraetila, altamente prejudicial à saúde humana, na mistura gasolina-álcool (gasohol), hoje aceita e usada em praticamente todo o mundo.

Durante a extração do caldo da cana-de-açúcar é gerada grande quantidade de bagaço (aproximadamente 30% da cana moída), biomassa de suma importância como fonte energética. Cerca de 95% de todo o bagaço produzido no Brasil são queimados em caldeiras para geração de vapor gerando, como resíduo, a cinza de bagaço, cuja disposição não obedece, na maior parte dos casos, a práticas propícias, podendo-se configurar em sério problema ambiental. Constituída, basicamente, de sílica, SiO_2 , a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) tem potencial para ser utilizada como adição mineral, substituindo parte do cimento em argamassas e concretos (Cordeiro et al., 2008).

A utilização pela construção civil de resíduos gerados em outros setores da economia é vantajosa não apenas em virtude do aumento da atividade industrial e, conseqüentemente, de subprodutos mas, sobretudo, devido à redução da disponibilidade de matérias-primas não renováveis, tão necessárias às atividades da construção civil convencional. Grande parte dos resíduos gerados pode ser reciclada, reutilizada, transformada e incorporada, de modo a produzir novos materiais de construção e atender à crescente demanda por tecnologia alternativa de construção mais eficiente, econômica e sustentável (Savastano, 2003).

Dentre os resíduos se destacam as cinzas minerais oriundas de diferentes atividades agroindustriais, que apresentam altas porcentagens de sílica e de outros óxidos, podendo ser então utilizadas como pozolanas. A propriedade da pozolana é a sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio liberado durante o processo de hidratação do cimento, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (Oliveira et al., 2004).

As pesquisas realizadas sobre o assunto estão concentradas na cinza da casca de arroz, que apresenta teores de SiO_2 usualmente superiores a 90% (John et al., 2003); contudo, investigações demonstram que as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar podem ter o mesmo poder de utilização requerendo, entretanto, estudos mais aprofundados.

Ante o exposto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o potencial de utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como aditivo mineral na produção de pastas e argamassas de cimento Portland.

MATERIAL E MÉTODOS

A CBC foi obtida do bagaço da cana-de-açúcar (BC), originária da Usina Jatiboca (Urucânia, MG). O BC foi coletado e queimado em mufla, durante 6 horas, a 600 °C; após a queima, pôde-se observar uma camada superficial de cinza de cor clara sobre o restante do material, que se caracterizava por cinza de coloração preta e composição heterogênea, compreendendo restos de bagaço não queimados e partículas de carvão; desta forma, tornou-se conveniente uma nova queima para homogeneização da amostra e redução do teor de carbono (responsável pela coloração escura); a segunda queima da CBC foi realizada por 3 horas, a 700 °C, seguida de resfriamento natural.

A composição química e a estrutura cristalina da CBC foram determinadas, respectivamente, com os ensaios de espectroscopia de fluorescência de raios-X (equipamento EDX-700 da marca Shimadzu) e difração de raios-X (difratômetro de pó SEIFERT-FPM GmbH operando com radiação de $\text{CuK}\alpha$ ($\alpha = 1,5418 \text{ \AA}$) a 40 kV e 40 mA). O teor de carbono foi definido através da perda de massa a 700 °C.

Para estudo das características granulométricas da CBC, esta foi submetida a diferentes períodos de moagem em um moinho de bolas, com as distribuições granulométricas estabelecidas por difração a laser (método de Fraunhöffer) e as áreas de superfície específicas por adsorção de N_2 (método de S_{BET}) empregando-se o aparelho ThermoAnalytical Qsurfm3. Para a realização desses ensaios se coletaram amostras após moagem, por 0, 30, 60, 120, 180, 300, 420, 540 e 660 min.

Na produção das pastas e argamassas foram empregadas as seguintes taxas de substituição parcial do cimento por CBC: 0, 10, 20 e 30%. As relações entre cimento – CBC nas argamassas e a nomenclatura adotada para as pastas e argamassas, são: C1 (100-0), C2 (90-10), C3 (80-20) e C4 (70-30), em que os valores representam os percentuais de cimento e CBC; foram usados o cimento Portland CPV ARI PLUS da marca Barroso e o traço 1:3, com areia normal brasileira.

Para se avaliar a influência da adição de CBC na argamassa, realizaram-se ensaios de tempo de pega inicial e final, resistência a compressão, índice de atividade pozolânica, determinação da massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios, ambos os ensaios foram realizados com base na Associação Brasileira de Normas Técnicas. O experimento foi desenvolvido adotando-se delineamento experimental inteiramente casualizado, constituído de 4 tratamentos, ou seja: 3 níveis de adição de CBC e um testemunho (100% cimento), com 3 repetições. Os melhores níveis de adição de CBC foram avaliados com base no teste de Tukey para todas as combinações, aos 7 e 28 dias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O bagaço usado apresenta um rendimento de cinza de 10%, em massa. A composição química é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química da CBC realizada por espectroscopia de fluorescência de raios-X

Composto químico	Composição (%)
SiO ₂	83,707
Fe ₂ O ₃	6,537
K ₂ O	6,146
CaO	1,183
TiO ₂	1,162
SO ₃	0,682
ZrO ₂	0,303
Cr ₂ O ₃	0,094
MnO	0,081
Sc ₂ O ₃	0,040
ZnO	0,037
V ₂ O ₅	0,029

Neste caso, a cinza apresentou teor de sílica de aproximadamente 84 e 5% de carbono, valores semelhantes foram encontrados por Villar-Cociña et al. (2006). O material, antes da queima e após a queima, é mostrado na Figura 1. A fase ativa dos diferentes aditivos minerais é composta basicamente de sílica, ou seja, quanto maior o teor de sílica ativa melhor será a atividade pozolânica da cinza (Massazza, 1998).

Segundo Cook (1986), a presença de cerca de 20% de carbono na cinza, não afeta significativamente a resistência a compressão, porém o decréscimo na resistência passa a ser percebido quando são empregadas cinzas com teores de carbono elevados, decréscimo este devido à queda na quantidade de sílica ativa correspondente.



Figura 1. Bagaço da cana-de-açúcar antes e após a queima a 700 °C

As fases cristalinas da CBC são descritas pelo espectro de difração de raios-X mostrado na Figura 2, na qual segundo Villar-Cociña et al. (2003), o halo entre $2\theta = 06$ e 18° caracteriza a fase amorfa. Os picos mostram a presença de fases cristalinas da sílica nas formas de: cristobalita (C)

($2\theta = 36,5^\circ$) e quartzo (Q) ($2\theta = 21^\circ$, $2\theta = 27^\circ$ e $2\theta = 39^\circ$); além desses, foram detectados picos relacionados à estrutura da muscovita (M) ($2\theta = 24,5^\circ$) o que se deve, provavelmente, à contaminação do bagaço por partículas do solo, assim como o quartzo. A presença desses contaminantes pode ser evitada com a lavagem do bagaço ou com a disposição em local apropriado.

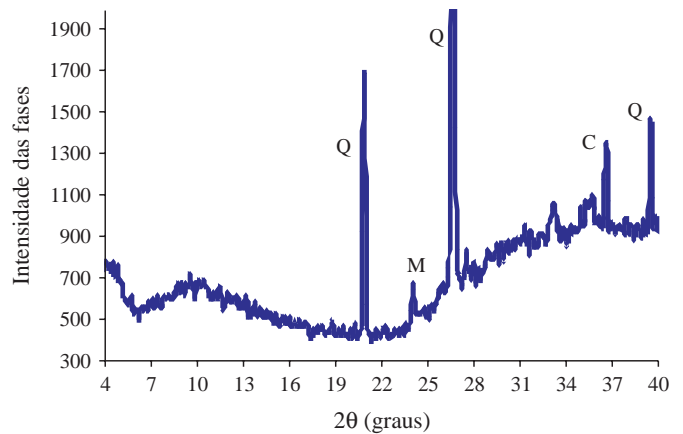


Figura 2. Análise de difração de Raio-X da CBC

Os resultados encontrados para a composição granulométrica e área de superfície demonstraram que a cinza em estudo é composta de partículas com tamanho entre 1 e 14 μm e com uma área de superfície da ordem de $24 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$.

No que diz respeito ao ensaio de tempo de pega inicial e final, as adições de 10, 20 e 30% de CBC não causaram adiantamento nem retardo do início da pega, o que era de se esperar, uma vez que a reação pozolânica ocorre em estágio mais adiantado da hidratação do cimento (7 e 15 dias após a mistura); assim, o tempo de início de pega não detectaria influência da atividade pozolânica. As adições de 10, 20 e 30% de CBC acarretaram retardo de 10 min no intervalo de tempo entre os tempos de pega; este retardo se deve à redução do teor de cimento nas combinações.

Os resultados encontrados para os índices de atividade pozolânica (IAP) (Tabela 2) comprovam a reatividade da CBC, uma vez que todas as combinações apresentaram valores para o IAP superiores ao valor mínimo de 75% estabelecido pela norma técnicas. Do exposto, a CBC pode ser classificada como pozolana.

Notou-se que o acréscimo de CBC nos corpos-de-prova acarretou um gradativo escurecimento na coloração dos

Tabela 2. Resistência média à compressão em MPa da argamassa aos 28 dias e respectivos índices de atividade pozolânica (IAP) para as diferentes misturas de cimento e CBC

Mistura	Resistência Média* (MPa) aos 28 dias	IAP (%)
C1	47,8	100
C2	48,0	100
C3	46,9	99
C4	40,7	86

* Média de 3 corpos de prova

mesmos. As Figuras 3A e 3B ilustram os resultados de resistência a compressão realizados nos corpos-de-prova, em função da interação entre o teor de substituição de cimento por cinza de CBC, aos 7 e 28 dias de idade.

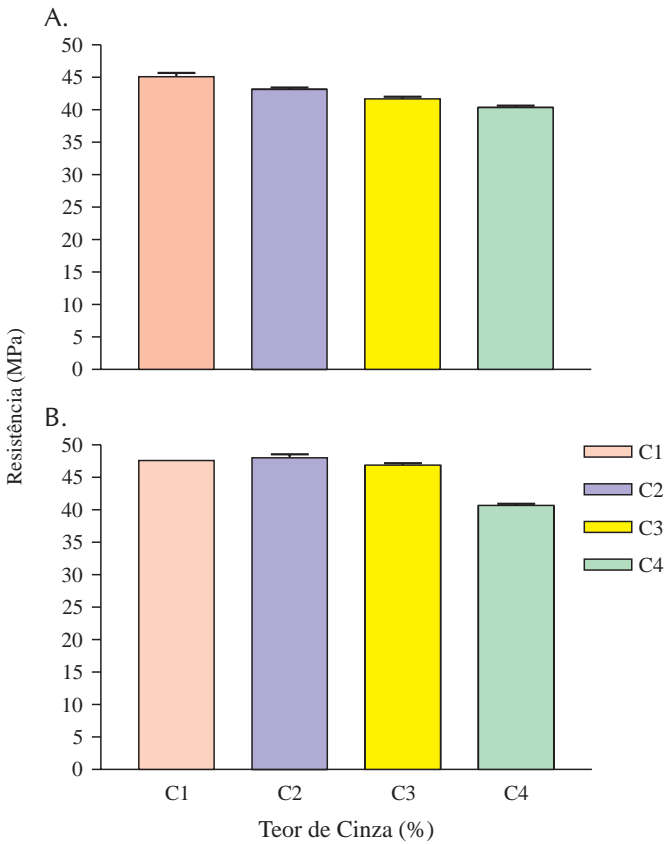


Figura 3. (A.) Resistência a compressão aos 7 dias nas argamassas incorporadas com resíduos; (B.) idem aos 28 dias

A análise de variância aplicada aos dados de resistência a compressão mostrou, a nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, alto grau de significância para combinações aos 7 e 28 dias. Aplicado aos dados de resistência a compressão aos 7 e 28 dias na argamassa de cimento com adição de CBC, o teste de Tukey mostrou que aos 7 dias de idade, independentemente da adição de CBC considerada, o tratamento C1 apresentou-se estatisticamente diferente em relação aos demais. As combinações C2 e C3 não foram diferentes entre si, assim como as combinações C3 e C4, conforme apresentado na Tabela 3. Observa-se que a resistência a compressão das argamassas aos 7 dias é inversamente proporcional ao teor de cinza adicionado.

Tabela 3. Valores médios da resistência a compressão (fcm) aos 7 e 28 dias de idade na argamassa sem CBC e com adição de CBC no níveis de 10, 20 e 30% (C2, C3 e C4 respectivamente)

Idade	Mistura			
	C1	C2	C3	C4
fc7	45,10 a	43,13 b	41,7b c	40,37 c
fc28	48,0 a	47,8 a	46,9 a	40,7 b

* As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si, a nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey

Considerada aos 28 dias, a análise estatística mostrou que os maiores valores de resistência foram alcançados pelas combinações C1, C2 e C3, estatisticamente iguais entre si (Tabela 3). Este emparelhamento da resistência aos 28 dias indica que a reação pozolânica tem início entre 7 e 15 dias após a mistura, quando a hidratação do cimento se apresenta já em estado avançado, conforme observado por Rodrigues (2006); tais resultados apontam a possibilidade de se substituir até 20% do cimento Portland por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, sem prejuízo da resistência a compressão.

Nas Figuras 4A, B e C se apresentam os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica dos corpos-de-prova de argamassa, em função do teor de substituição aos 28 dias de idade.

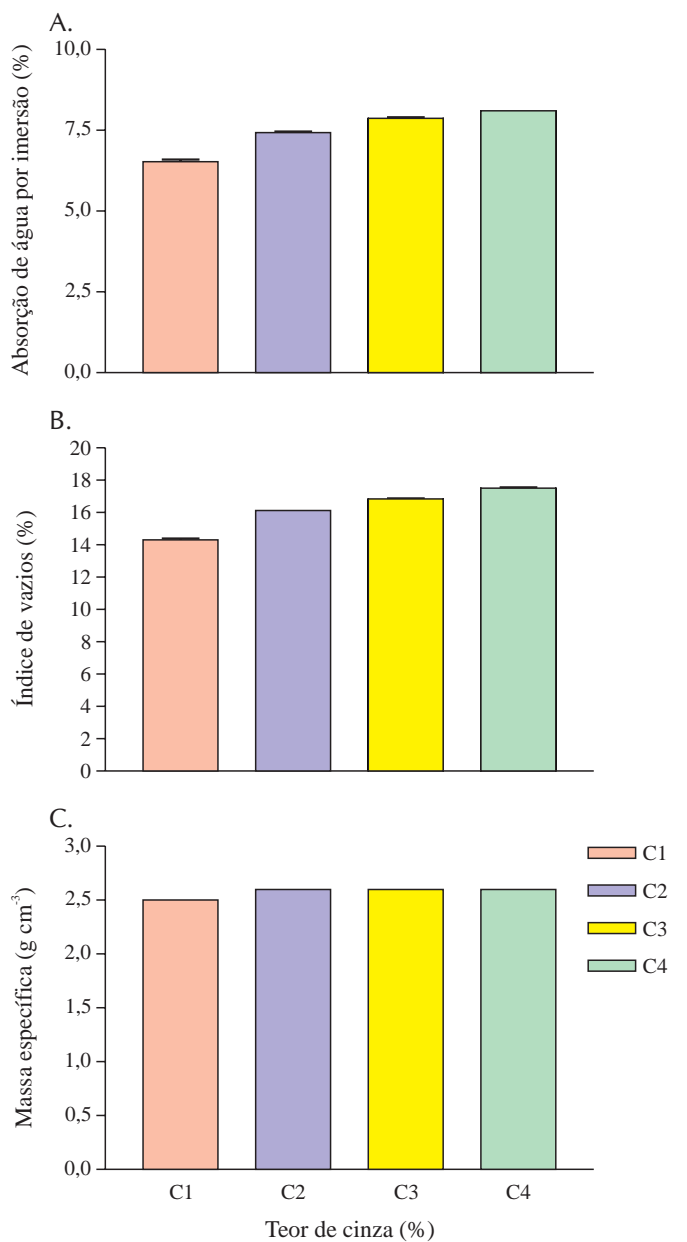


Figura 4. (A) Absorção de água por imersão, (B) índice de vazios e (C) massa específica, aos 28 dias, nas argamassas confeccionadas com diferentes concentrações de cimento e cinza de bagaço de cana-de-açúcar

Observa-se, tanto para a absorção de água por imersão quanto para o índice de vazios, que as combinações resultaram em uma função crescente, donde se conclui que as argamassas com maiores teores de cinza tendem a ser mais porosas, o que justifica os maiores valores de absorção. Segundo Barbosa et al. (1998), este fato pode ser resolvido controlando-se o fator água/cimento de cada combinação estudada. Com relação à massa específica, observou-se um pequeno aumento com a adição de CBC (0,5% em todas as combinações).

Com base nas análises de variância, pode-se observar influência significativa do teor de adição de CBC nos resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios. Aplicado aos dados de absorção de água por imersão e do índice de vazios aos 28 dias na argamassa de cimento com adição de CBC, o teste de Tukey mostrou que não houve interação significativa entre as combinações estudadas (Tabela 4).

Tabela 4. Valores médios da absorção de água e índice de vazios aos 28 dias de idade na argamassa sem e com adição de CBC

Parâmetros		Combinações			
		C1	C2	C3	C4
Absorção de água (%)	Média	6,6 a	7,5 b	7,8 c	8,0 d
Índice de Vazios (%)	Média	14,4 a	16,3 b	16,8 c	17,3 d

* As médias nas linhas, seguidas de pelo menos uma mesma letra, não diferem entre si, a nível de 5% de probabilidade, pelo teste Tukey

A análise de variância mostrou que não houve influência significativa do teor de adição de CBC nos resultados de massa específica. O que se pode depreender dessa análise, é que a substituição parcial do cimento Portland por até 30% de cinzas na mistura não provocou qualquer modificação significativa nos valores da massa específica.

CONCLUSÕES

1. O bagaço de cana-de-açúcar utilizado apresentou rendimento de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) de 10%, com teor SiO₂ de 84%.
2. Esses teores, combinados com previsões de aumento na geração deste resíduo em decorrência da expansão do setor sucroalcooleiro no Brasil, apresentam a CBC como fonte viável de adição mineral de cimentos, dependendo das características da sílica presente.
3. No caso, a sílica na CBC apresentou-se tanto na fase amorfa quanto nas fases cristalinas de cristobalita e quartzo.
4. Argamassas com maiores teores de cinza foram mais porosas e com maior absorção de água.
5. Os índices de atividade pozolânica comprovaram a reatividade da CBC.
6. Os resultados dos ensaios de compressão aos 28 dias indicaram a viabilidade de substituição de até 20% de cimento por CBC sem prejuízo da resistência.
7. A obtenção de cinzas com maiores teores de sílica reativa, principalmente por meio de procedimentos de queima melhor ajustados, pode permitir maiores teores de substituição

ou melhorias mais significativas nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, nos seus diversos seguimentos, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental.

À FAPEMIG, pelo financiamento do projeto e pela bolsa de Iniciação científica e de apoio técnico, e a CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

LITERATURA CITADA

- Barbosa, M. F., Lima, E., Pires Sobrinho, C. W. A. Estudo de argamassas com adições de cinza de casca de arroz e cinza de cana-de-açúcar. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído Qualidade no Processo Construtivo, 7, 1998, Florianópolis. Anais... Florianópolis: UFSC/ANTAC, 5p. 1998.
- Cook, D. J. Rice husk ash. In: Swamy, R. N. (ed). Concrete technology and design – v.3: Cement replacement materials. London: Blackie & Son Ltd, 1986. 170p.
- Cordeiro, G. C.; Toledo Filho, R. D.; Fairbairn, E. M. R.; Tavares, L. M. M. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. Cement & Concrete Composites, v.30, p.410-418, 2008.
- John, V. M.; Cincotto, M. A.; Silva, M. G. Cinza e aglomerantes alternativos. In: Freire, W. J.; Beraldo, A. L. Tecnologia e materiais alternativos de construção. Campinas: UNICAMP, 2003. cap.6, p.145-190.
- Massazza, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: Hewlett, P. C. (ed.), Lea's chemistry of cement and concrete, 4th edition, London: Arnold Publishers, 1998. p.485-500.
- Oliveira, M. P.; Nobrega, A. F.; Campo, M. S.; Barbosa, N. P. Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. Conferencia Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitação e infraestrutura de interesse social Brasil – NOCMAT 2004, Pirassununga. Anais... Pirassununga: USP, 2004. 15p.
- Rodrigues, C. S.; Ghavami, Khosrow; Stroeven, P. Porosity and water permeability of rice husk ash-blended cement composites reinforced with bamboo pulp. Journal of Materials Science, v.41, p.6925-6937, 2006.
- Savastano, Jr., Warden, P. G. Special theme issue: Natural fibre reinforced cement composites. Cement & Concrete Composites, v.25, n.5, p.517-624, 2003.
- Villar-Cociña, E.; Valencia-Morales, E.; Gonzales-Rodrigues, R.; Hernandez Ruíz, J. Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: A kinetic-diffusive model. Cement and Concrete Research, v.33, p. 517-524, 2003.
- Villar-Cociña, E.; Valencia-Morales, E.; Sanches Rojas M. I. An Evaluation of different kinetics models for determining the kinetic coefficients in sugar cane-straw – ash/lime system. Advances in Cement Research, v.18, p. 17-26, 2006.