

REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS IBRACON STRUCTURES AND MATERIALS JOURNAL

Ultrafine sugar cane bagasse ash: high potential pozzolanic material for tropical countries

Cinza ultrafina do bagaço de cana-de-açúcar: material pozolânico de alto potencial para países tropicais







G. C. CORDEIRO ^a gcc@uenf.br

R. D. TOLEDO FILHO b toledo@coc.ufrj.br

E. M. R. FAIRBAIRN b eduardo@coc.ufrj.br

Abstract

This work describes the characterization of sugar cane bagasse ashes produced by controlled burning and ultrafine grinding. Initially, the optimum burning conditions of the bagasse were determined aiming the maximum pozzolanic activity. In sequence, an ultrafine sugar cane bagasse ash was produced in vibratory mill. Finally, the influence of use of ultrafine sugarcane bagasse ash (10, 15 and 20% of cement replacement, in mass) in properties of high-performance concretes was studied. Rheology (BTRHEOM rheometer), compressive strength (7, 28, 90, and 180 days) and rapid chloride penetrability were investigated. The results indicated that the addition of sugarcane bagasse ash improved the durability characteristics, and did not change the rheological and mechanical properties.

Keywords: sugar cane bagasse ash, pozzolan, concrete, grinding, calcination.

Resumo

Este trabalho descreve a caracterização de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar produzidas a partir de queima controlada e moagem ultrafina. Inicialmente, as condições ótimas de queima do bagaço foram determinadas com o objetivo de alcançar a máxima atividade pozolânica. Em seguida, uma cinza ultrafina de elevada reatividade foi produzida em moinho vibratório. Por fim, estudou-se a influência do emprego de cinza ultrafina do bagaço de cana-de-açúcar (10, 15 e 20% de substituição de cimento, em massa) nas propriedades de concretos de alto desempenho. Foram avaliadas a reologia (reômetro BTRHEOM), a resistência à compressão (7, 28, 90 e 180 dias) e a penetração acelerada de íons cloro. Os resultados indicaram que a cinza do bagaço não altera as propriedades reológicas e mecânicas e possibilita a obtenção de concretos mais duráveis.

Palavras-chave: cinza do bagaço de cana-de-açúcar, pozolana, concreto, moagem, queima.

Laboratory of Civil Engineering, Center of Science and Technology, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, gcc@uenf.br, 2000 Av. Alberto Lamego, CEP 28013-602, Campos dos Goytacazes-RJ, Brazil;

b Program of Civil Engineering, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, toledo@coc.ufrj.br, eduardo@coc.ufrj.br, CT-Ilha do Fundão CEP 21945-970, Rio de Janeiro-RJ, Brazil.

1. Introdução

Os materiais pozolânicos são compostos silicosos ou sílico-aluminosos que isoladamente possuem pouca ou nenhuma propriedade aglomerante. Entretanto, quando finamente moídos e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes [1]. O emprego de pozolanas em conjunto com cimento Portland é uma prática usual em todo mundo. Materiais como cinza volante, sílica ativa, metacaulim, cinza da casca de arroz, dentre outros, conferem propriedades diferenciadas a concretos, argamassas e pastas. Inúmeros trabalhos destacam as vantagens técnicas, como aumento de resistência à compressão e de durabilidade, e ambientais advindas do emprego dos materiais apontados [1-4], normalmente produzidos a partir de subprodutos industriais ou agroindustriais.

Nos últimos anos, um novo aditivo mineral tem merecido a atenção de grupos de pesquisa no Brasil [5-7] e no exterior [8-12]: a cinza do bagaço de cana-de-açúcar. A cinza do bagaço, principal resíduo agroindustrial gerado no Brasil e um dos principais no mundo [5], é gerada no processo produtivo de açúcar e álcool. Após a extração do caldo de cana nas usinas sucroalcooleiras e pequenas destilarias, há produção de uma grande quantidade de bagaço, que é empregado, em sua quase totalidade, como combustível para caldeiras. Com os avanços tecnológicos do setor sucroalcooleiro e a necessidade de ampliação do parque de geração de energia elétrica, o bagaço passou a ser ainda mais valorizado como fonte primária de energia no país. Atualmente, o bagaço responde pelas necessidades energéticas do setor sucroalcooleiro e ainda gera um excedente passível de ser comercializado para concessionárias de energia ou outros pólos industriais [5]. No ano de 2008 foram produzidas cerca de 650 milhões de toneladas de cana-de-açúcar [13]. Uma vez que cerca de 0,7% da massa da cana permanecem sob a forma de cinza após processos de combustão [5], o Brasil apresenta um potencial de cerca de 4,5 milhões de toneladas de matéria-prima para a produção de aditivo mineral, distribuídas em todo território nacional.

A cinza do bagaço, quando utilizada em conjunto com cal ou cimento Portland, apresenta atividade pozolânica [6-9]. Com isso, é possível produzir concretos com cinza do bagaço com características mecânicas e de durabilidade positivas em comparação com concretos de referência [5,11], desde que as partículas da cinza apresentem tamanho micrométrico. É importante ressaltar que as cinzas utilizadas nas pesquisas supracitadas foram produzidas sem controle da queima. A produção de cinzas do bagaço com queima controlada poderia evitar a formação de fases cristalinas e. consequentemente, aumentar sua atividade pozolânica, conforme descrevem Payá et al. [10] e Cordeiro [5]. Esse comportamento é similar ao que ocorre com a cinza da casca de arroz [1-12,14]. Neste escopo, este trabalho apresenta resultados da caracterização físico-química de cinzas produzidas em sistemas controlados de queima e moagem. Desta forma, inicialmente são apresentados os resultados de um estudo sobre a influência da temperatura de queima do bagaço nas características físico-químicas da cinza. Em seguida, são descritos os resultados da determinação das condições ótimas de moagem vibratória de uma cinza residual com vistas à produção de uma pozolana ultrafina. Neste trabalho também são apresentados os resultados da comparação entre diferentes propriedades (tensão de escoamento, viscosidade plástica, resistência à compressão e penetração acelerada de íons cloro) de concretos com cinza residual ultrafina e um concreto de referência.

1.1 Justificativa

Estudos indicam o potencial da cinza do bagaço de cana-deaçúcar para emprego como pozolana em pastas e argamassas [5-8,10,12]. Entretanto, há poucas pesquisas sobre a aplicação da cinza em concreto [5,11]. Este trabalho apresenta diferentes métodos de produção de cinza pozolânica de bagaço de cana. A cinza do bagaço é o principal resíduo da indústria sucro-alcooleira, a qual passa atualmente por um período de grande crescimento. Assim, espera-se contribuir para o emprego deste resíduo como pozolana em diferentes partes do mundo, sobretudo nas regiões tropicais, onde a produção de cana-de-açúcar é expressiva.

2. Materiais e programa experimental

2.1 Materiais

O bagaço e a cinza residual do bagaço utilizados como matérias-primas foram coletados, respectivamente, no pátio de estocagem e nas caldeiras de uma usina sucroalcooleira no Município de São João

Tabela 1 – Composição química (% em massa) da cinza residual do bagaço e do cimento Portland

Composto	Cinza residual do bagaço	Cimento Portland
SiO ₂	78,34	20,85
Al_2O_3	8,55	4,23
Fe ₂ O ₃	3,61	5,25
CaO	2,15	63,49
Na₂O	0,12	0,16
K ₂ O	3,46	0,40
P ₂ O ₅	1,07	-
Perda ao fogo	0,42	1,05

da Barra/RJ. A coleta da cinza foi realizada em dias de limpeza dos salões das caldeiras ao longo de três meses. Após coleta, formouse um lote com cerca de 180 kg de cinza que foi homogeneizado e particionado para a realização das moagens. A Tabela 1 apresenta a composição química do bagaço e da cinza, além da composição do cimento Portland comum (sem adições minerais) utilizado para avaliação da atividade pozolânica das cinza em conjunto com areia normalizada [15]. Para a produção dos concretos foram utilizados, além do cimento, agregado graúdo com dimensão máxima nominal de 19 mm, areia quartzosa de rio (módulo de finura de 2,12), aditivo superplastificante com base em cadeia de éter carboxílico (solução aquosa com 32,6% de sólidos) e água deionizada.

2.2 Queima controlada

Em laboratório, o bagaço foi lavado com água destilada e submetido à secagem em estufa a 80 °C por 48 horas. Em seguida, o bagaço

Tabela 2 – Composição dos	s concretos (em kg/m³)
---------------------------	------------------------

Materiais	Referência	Teor de cinza ultrafina do bagaço		
Maidiais		10%	15%	20%
Cimento Portland	478,0	430,2	406,3	382,4
Cinza ultrafina do bagaço	-	47,8	71,7	95,6
Agregado miúdo	860,0	860,0	860,0	860,4
Agregado graúdo	905,3	905,3	905,3	905,8
Superplastificante	1,43	1,43	1,43	1,20
Água	164,4	164,4	164,4	164,4

foi submetido à queima em forno resistivo (mufla) sem circulação forçada de ar, porém com renovação dos gases durante a queima por meio de dois orifícios (diâmetros de 10 e 40 mm) na câmara interna. As condições de queima adotadas foram: queima com dois patamares [5,16]; temperatura de 350 °C no primeiro patamar; temperatura entre 400 e 800 °C no segundo patamar, com variação de 100 °C; taxa de aquecimento de 10 °C/min; e tempo de residência em cada patamar de 3 h. A relação entre os volumes de amostra e da câmara interna do forno foi mantida constante para todas as queimas.

Após queima, todas as amostras foram submetidas a cominuição a seco em moinho de bolas planetário Restch PM-4 com operação a 300 rpm, jarro e corpos moedores (esferas de 10 mm de diâmetro) de ágata, grau de enchimento de 25%, preenchimento de vazios de 66% e tempo de moagem de 2 min. A distribuição de tamanho das cinzas foi obtida via analisador de partículas a laser Mastersizer 2000, Malvern Instruments. A análise de difração de raios X, pelo método do pó, foi realizada em difratômetro Rigaku Miniflex com tubo de Cu-Ka (30 kV/15 mA), com coleta entre 5 e 50° (20), velocidade do goniômetro de 0,05°/passo e tempo de contagem de 2 s por passo. A composição química foi determinada por fluorescência de raios X (espectrômetro Phillips PW 2400) com tubo de 3 kW e alvo de ródio. A perda ao fogo foi determinada com base nos procedimentos prescritos na NBR 5743 [17]. A superfície específica da amostra foi obtida por adsorção de nitrogênio (método BET) em equipamento Gemini 2375 V5. A massa específica foi determinada em picnômetro a gás (He), modelo Accupyc da Micromeritics. A atividade pozolânica foi determinada de acordo com as prescrições da NBR 5752 [18], com cálculo do índice de atividade pozolânica com cimento Portland.

2.3 Moagem ultrafina

A moagem a seco da cinza do bagaço de cana-de-açúcar foi efetuada em um moinho vibratório (Aulmann & Beckschulte Maschininfabrik) com vaso cilíndrico (diâmetro interno de 19 cm) de aço de 33 litros. A cada batelada, utilizou-se 16,5 litros de corpos moedores cilíndricos (diâmetro 13 mm e altura 13 mm) de alumina e 8 litros de amostra. Os tempos de moagem foram de 8, 15, 30, 60, 120 e 240 min. A caracterização das diferentes cinzas foi feita com base nos seguintes ensaios: granulometria, microscopia eletrônica

de varredura (microscópio Jeol JXA 840-A), superfície específica Blaine e índice de atividade pozolânica.

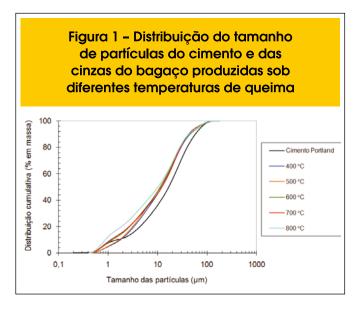
2.4 Dosagem, produção e caracterização de concretos de alto desempenho

A dosagem dos concretos foi realizada com auxílio do programa computacional Betonlab Pro2 [19], que possibilita a simulação numérica de diferentes composições para seleção adequada dos materiais com base no Modelo de Empacotamento Compressível, proposto por De Larrard [20]. A resistência à compressão foi estipulada em 60 MPa e a consistência, de acordo com ensaio de abatimento do tronco de cone, mantida na faixa entre 130 e 170 mm com teores específicos de aditivo superplastificante. Foram dosadas quatro misturas: referência e concretos com substituição de 10, 15 e 20% (em massa) de cimento Portland por cinza ultrafina do bagaço, conforme apresenta a Tabela 2. Além do ensaio de abatimento, a caracterização dos concretos no estado fresco foi realizada pela determinação da tensão cisalhante de escoamento (τ₀) e viscosidade plástica (μ) com emprego do reômetro BTRHEOM [21], após 10 minutos da etapa de mistura dos concretos em betoneira. Admitiu-se, neste trabalho, que os concretos comportaram-se como fluidos de Bingham. Com isso, a relação linear entre os valores de torque (Γ) e velocidade angular (Ω) – Equação 1 – possibilitou o cálculo de τ₀ e μ a partir das equações 2 e 3, respectivamente [21].

$$\Gamma = \Gamma_0 + \frac{\partial \Gamma}{\partial \Omega}.\Omega$$

$$\tau_0 = \frac{3.\Gamma_0}{2\pi . \left(R_2^3 - R_1^3\right)}$$
 (2)

$$\mu = \frac{2 \cdot h \cdot \frac{\partial \Gamma}{\partial \Omega}}{\pi \cdot \left(R_2^4 - R_1^4\right)}$$
(3)



Onde

 $Γ_0$: coeficiente linear da Equação 1;

∂Г

 $\partial\Omega$: coeficiente angular da Equação 1;

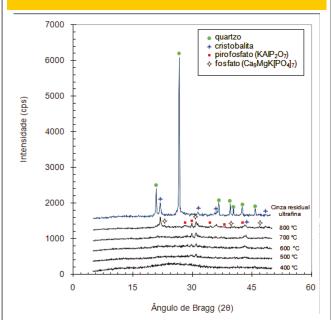
R₂: raio externo da massa de concreto no reômetro (120 mm);

R₁: raio interno da massa de concreto no reômetro (20 mm);

h: altura da massa de concreto no reômetro (100 mm).

A resistência à compressão dos concretos foi determinada pela

Figura 2 – Difratogramas de raios X das cinzas do bagaço produzidas sob diferentes temperaturas de queima (400 - 800 °C) e da cinza ultrafina residual produzida com moagem vibratória por 120 min



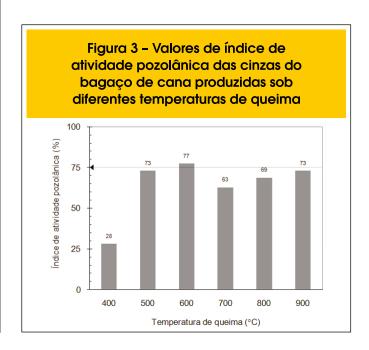
ruptura de corpos-de-prova cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) em prensa servo-controlada Shimadzu UH-F1000k-NI, após 7, 28, 90 e 180 dias de cura em câmara úmida (temperatura de 21 °C e umidade relativa de 100%). Os ensaios foram conduzidos de acordo com a NBR 5739 [22] com velocidade de 0,0075 mm/min e foram utilizados 4 corpos-de-prova para cada idade. O comportamento dos concretos com vistas à durabilidade foi investigado em ensaios de penetração acelerada de íons cloreto aos 28 dias, de acordo com as prescrições normativas da ASTM C1202 [23]. Neste caso, os testes foram feitos em duplicata.

3. Resultados e discussões

3.1 Produção de cinza pozolânica com queima controlada

As moagens, nesta etapa, foram realizadas no intuito de equiparar a granulometria das cinzas produzidas sob diferentes temperaturas. como pode ser observado na Figura 1. Tal procedimento é importante, pois a atividade pozolânica varia com o tamanho das partículas do material. Os diferentes produtos de moagem apresentam granulometria não uniforme e tamanho médio de partículas entre 7 e 12 µm, que é uma faixa granulométrica próxima da granulometria do cimento Portland utilizado neste trabalho. Os difratogramas de raios X da amostra, ilustrados na Figura 2, indicam a variação da cristalinidade da sílica em função da temperatura de queima. As cinzas produzidas a 400 e 500 °C são amorfas, com um halo difuso característico entre ângulos 20 de 20 e 30°. Com temperaturas acima de 600 °C observa-se uma incipiente cristalização de fostafos (Ca_oMgK[PO₄], e KAIP₂O₇). A cinza produzida a 800 °C apresenta sílica sob a forma de cristobalita, o que é indicativo, para as condições adotadas de moagem, da temperatura superior de queima para a produção de um material com atividade pozolânica adequada.

A Figura 3 apresenta os valores de índice de atividade pozolânica, calculados a partir da resistência à compressão de referência de 37,81 MPa. É possível observar que há variação da atividade



Т		uímica e características físicas de cana produzida a 600 °C	
Composto	Teor (% em massa)	Característica	Valor
SiO_2	60,96	Massa específica	2569 kg/m³
Al_2O_3	0,09	Superfície específica BET	11887 m²/kg
Fe_2O_3	0,09	Resíduo, peneira 325 mesh	8.3%
CaO	5,97	Resíduo, peneira 325 mesh	11,6 µm
Na ₂ O	0,70		
K_2O	9,02		
MnO	0,48		
MgO	8,65		
P_2O_5	8,34		
Perda ao fogo	5,70		

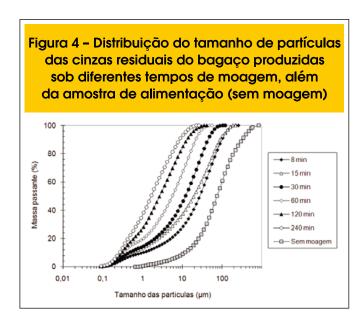
pozolânica da cinza em função da temperatura de queima. Com exceção da cinza produzida a 600 °C, que apresenta índice de atividade igual a 77%, as demais amostras não alcançam o valor mínimo (75%) estipulado pela NBR 12653 [24] para que um material possa ser classificado como pozolana. A reduzida reatividade da cinza produzida a 400 °C pode ser atribuída à diluição das fases ativas, em razão do elevado teor de carbono presente na amostra (85%). De acordo com as variáveis investigadas, a temperatura de queima de 600 °C é a mais apropriada, dentre as temperaturas e demais condições de queima estudadas, para a produção de uma cinza pozolânica do bagaço de cana-de-açúcar.

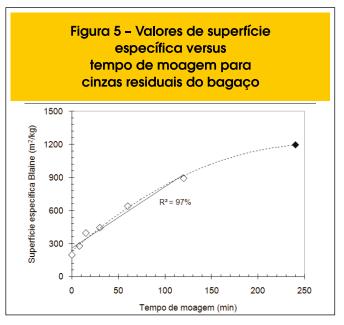
A Tabela 3 apresenta a composição química e algumas importantes características físicas da cinza produzida a 600 °C. A amostra apresenta, para as condições de cominuição adotadas, 8,27% da massa retida na peneira de 325 mesh (45 $\mu m)$ e tamanho médio

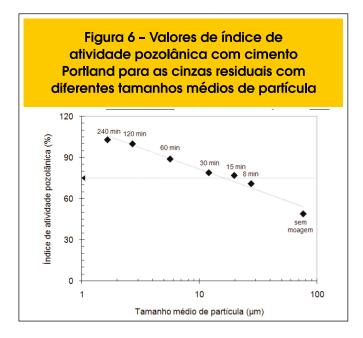
igual a 11,6 μ m. A cinza apresenta massa específica dentro da faixa esperada para materiais silicosos e o valor apresentado para a superfície específica (BET) da cinza é característico para cinzas de origem celular e com elevado teor de sílica amorfa, comparável, por exemplo, à cinza da casca de arroz [5].

3.2 Produção de cinza residual ultrafina com moagem vibratória

A Figura 4 apresenta as curvas granulométricas das cinzas residuais do bagaço produzidas em diferentes tempos de moagem vibratória. Após 60 min de moagem, por exemplo, as cinzas produzidas apresentam tamanhos de partículas inferiores a 40 µm e as curvas

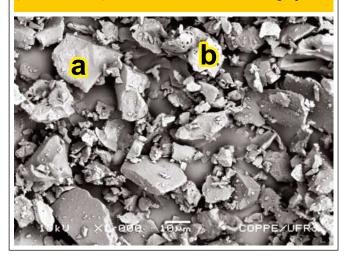


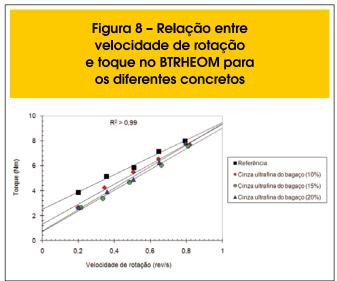




granulométricas apresentam faixas mais estreitas de tamanho de partícula. Com 240 min de moagem um tamanho médio de 1,7 µm é alcançado. O aumento dos valores de superfície específica em função do aumento do tempo de moagem, observado na Figura 5, comprova a elevada taxa de quebra das partículas proporcionada pela moagem ultrafina. A relação aproximadamente linear (R² = 97%) entre a superfície específica e o tempo de moagem sugere a validade da Lei de Rittinger de cominuição para as condições empregadas até 120 min de moagem. Esta lei estabelece que a nova superfície específica, produzida pelo processo de moagem, é diretamente proporcional ao trabalho útil consumido nesta operação [25]. Contudo, para o tempo de 240 min ocorre uma divergência

Figura 7 – Detalhes morfológicos da cinza do bagaço de cana produzida em moagem de 120 no moinho vibratório. Em destaque, partícula de quartzo (a) e da cinza do bagaço (b)





entre o valor obtido e a Lei de Rittinger, provavelmente em razão da excessiva sobremoagem neste estágio.

Os resultados dos ensaios de atividade pozolânica são apresentados na Figura 6 e indicam um aumento da reatividade da cinza em função da redução do tamanho médio de partículas que, por sua vez, é inversamente proporcional ao tempo de moagem. Todas as cinzas obtidas, após 15 min de moagem, apresentam índice de atividade pozolânica superior ao valor mínimo estabelecido por norma [24], com destaque para os valores alcançados para as cinzas moídas por períodos de 120 e 240 min. Contudo, não há uma diferença expressiva entre os valores de índice de atividade alcançados pelas cinzas produzidas nos dois maiores tempos de moagem. Como a moagem por 120 min possibilita a produção de uma cinza com índice igual a 100% e atende à Lei de Rittinger, o que possibilita estimar de forma simples o gasto energético com a moagem [5], optou-se por essa condição para a produção de uma cinza residual ultrafina do bagaço para emprego em concretos de alto desempenho. A Figura 7 apresenta os detalhes morfológicos da cinza do bagaço produzida após 120 min de moagem, com destaque para a presença de partículas de quartzo como contaminação por areia não removida na lavagem da cana na usina [5]. Esta evidência corrobora os resultados de difração apresentados na Figura 2. É importante destacar que a presença do quartzo não compromete o emprego da cinza como pozolana, principalmente em razão de pronunciado efeito filer promovido pelas partículas ultrafinas da cinza residual [6].

3.3 Aplicação de cinza residual ultrafina em concretos de alto desempenho

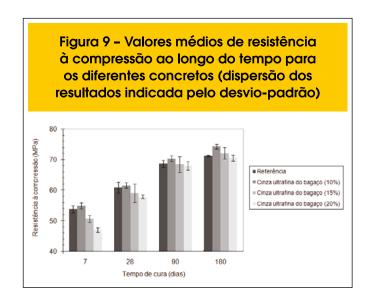
A cinza ultrafina do bagaço (120 min de moagem), quando em substituição parcial ao cimento Portland, proporciona características diferenciadas aos concretos, tanto no estado fresco quanto endurecido. O emprego da cinza ultrafina acarreta aumento dos valores de abatimento do tronco de cone. Em particular, a mistura confeccionada com 20% de cinza ultrafina apresenta consumo de aditivo superplastificante (dosagem de 1,20 kg/m³) menor que os demais concretos. Como observado em ensaio, caso a dosa-

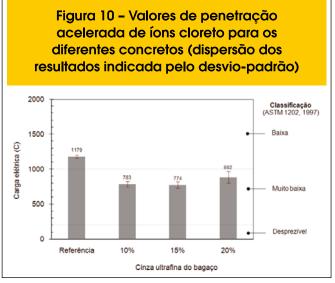
Tabela 4 – Propriedades no estado fresco dos concretos				
Mistura	Abatimento (mm)	τ ₀ (Pa)	μ (Pa.s)	
Referência	130	693	306	
Cinza ultrafina do bagaço - 10%	150	362	353	
Cinza ultrafina do bagaço - 15%	170	196	363	
Cinza ultrafina do bagaço - 20%	170	211	380	

gem superplastificante fosse igual à utilizada nas demais misturas (1,43 kg/m³), o abatimento seria de 190 mm, valor superior ao limite máximo da faixa de abatimento adotada (150 ± 20 mm). Pela análise dos resultados dos ensaios de reologia no BTRHEOM, apresentados na Figura 8, é possível inferir que a consideração dos concretos no estado fresco como fluidos de Bingham revelase adequada para os concretos estudados. Os coeficientes de determinação (R2) para os ajustes lineares entre os valores de torque e velocidade angular são superiores a 99% para todas as misturas. A Tabela 4 apresenta os valores de abatimento do tronco de cone, de tensão de escoamento e de viscosidade plástica para os concretos avaliados. Observa-se que a viscosidade plástica não é expressivamente alterada em razão da incorporação da cinza ultrafina do bagaço. Todavia, a tensão de escoamento é menor nos concretos com cinza ultrafina, o que indica efeito positivo do aditivo químico na reologia do concreto. O melhor comportamento das misturas com cinza ultrafina pode ser atribuído ao reduzido teor de carbono (perda ao fogo de 0,42%) e à presença de partículas de quartzo de morfologia regular (vide Figura 7).

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados após 7, 28, 90 e 180 dias de cura estão indicados na Figura 9. Aos 7 dias, os valores médios de resistência à compressão dos concretos de referência (53,8 MPa) e com 10% de cinza ultrafina do bagaço (55,0 MPa) não apresentam diferenças significativas entre si, de acordo com o teste de média de Duncan ao nível de 5% de probabilidade. Os concretos com 15 e 20% de cinza ultrafina apresentam valores de resistência à compressão significativamente inferiores (50,7 e 47,1 MPa, respectivamente). Após 28 dias de cura, verifica-se que o concreto de referência alcança um valor de resistência muito próximo ao estabelecido na dosagem (60,9 MPa). Os concretos com cinza ultrafina do bagaço, nesta mesma idade, não apresentam diferenças significativas entre si e com relação à mistura de referência - resistências iguais a 61,6, 59,0 e 57,8 MPa para os concretos com 10, 15 e 20% de cinza, respectivamente. Para os tempos de cura de 90 e 180 dias também não há diferenças significativas entre todas as quatro misturas investigadas, de acordo com o teste de média de Duncan ao nível de 5% de probabilidade. O valor final de resistência alcançado pelo concreto de referência é igual a 71,2 MPa; para os concretos com cinza os valores são equivalentes a 74,3 (10% de cinza), 72,1 (15% de cinza) e 70,5 MPa (20% de cinza). É importante destacar a reduzida dispersão dos resultados de cada composição nas idades de avaliação investigadas. O maior valor de desvio-padrão (3 MPa), por exemplo, é verificado para o concreto com 15% de cinza do bagaço aos 28 dias e corresponde a um coeficiente de variação de apenas 5%.

O comportamento dos concretos à compressão está de acordo com o valor de índice de atividade pozolânica da cinza ultrafina selecionada (Figura 6). De fato, o método utilizado para a avaliação da ati-





vidade pozolânica contempla os efeitos físicos e químicos da cinza, pois é calculado a partir de valores de resistência à compressão de argamassas. Como a cinza apresenta índice igual a 100%, a substituição de cimento Portland por cinza ultrafina do bagaço não acarreta redução na resistência à compressão, desde que o teor de substituição não seja muito elevado (acima de 20%).

No que se refere à penetração acelerada de íons cloreto, a cinza ultrafina do bagaço proporciona reduções de cerca de 30% nos valores de carga elétrica dos concretos quando comparados com a mistura de referência. Neste caso, o concreto de referência pode ser classificado como de "baixa" penetração, enquanto os concretos com cinza ultrafina são classificados como de "muito baixa" penetração iônica, com carga elétrica menor que 1000 C, como indica a Figura 10. Resultados similares foram observados por Ganesan et al. [11] ao comparar um concreto de referência de 40 MPa com um concreto com 20% de substituição de cimento por cinza do bagaço de cana-de-açúcar proveniente da Índia. A menor penetração iônica nos concretos com cinza pode ser atribuída aos efeitos físicos e pozolânicos da cinza ultrafina do bagaço [6].

4. Conclusões

De acordo com os resultados apresentados é possível concluir que:

- O bagaço de cana-de-açúcar pode ser uma importante matéria-prima para a produção de pozolana, principalmente em países tropicais, onde a cultura da cana-de-açúcar merece destaque. Especificamente, uma cinza amorfa de elevada superfície específica e reduzida perda ao fogo pode ser produzida com queima a 600 °C em forno tipo mufla. A atividade pozolânica da cinza do bagaço pode ser atribuída à presença de sílica amorfa;
- Pozolanas podem ser produzidas com moagem vibratória da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar. Neste caso, a moagem em moinho vibratório por 120 min possibilita a produção de uma cinza com índice de atividade pozolânica igual a 100%;
- Com a cinza residual produzida em moagem ultrafina de 120 min é possível a substituição de até 20% de cimento em concretos de alto desempenho com melhoria das propriedades reológicas, sem redução da resistência à compressão e com "muito baixa" penetração de íons cloro.

5. Agradecimentos

À Capes, ao CNPq e à Faperj pelo auxílio financeiro, ao Instituto Nacional de Tecnologia (INT) pelo ensaio de superfície específica BET e ao Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ pelas análises de microscopia eletrônica de varredura.

6. Referências bibliográficas

- [01] MALHOTRA, V. M., MEHTA, P. K. Pozzolanic and Cementitious Materials, 1st ed., Amsterdam: Gordon and Breach Publishers: Amsterdam, 1996, 191 p.
- [02] MASSAZZA, F. In: Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Hewlett, P. C. (ed.), 4th ed., New York: J. Wiley, 1988, pp. 471-631.
- [03] SABIR, B. B., WILD, S., BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete:

- a review. Cement and Concrete Research, v.23, n.2, 2001, pp. 441-454.
- [04] MEHTA, P. K. Greening of the concrete industry for sustainable development. Concrete International, v.24, n.7, 2002, pp. 23-28.
- [05] CORDEIRO, G. C. Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto, Rio de Janeiro, 2006, Tese (Doutorado) COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 445 p.
- [06] CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., TAVARES, L. M., FAIRBAIRN, E. M. R. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. Cement and Concrete Composites, v.30, n.5, 2008, pp. 410-418.
- [07] 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, 2009, pp. 82-86.
- [08] MARTIRENA HERNÁNDEZ, J. F. M., MIDDEENDORF, 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, 1998, pp. 1525-1536.
- [09] SINGH, N. B., SINGH, V. D., RAI, S. Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. Cement and Concrete Research, v.30, n.9, 2000, pp. 1485-1488.
- [10] PAYÁ, J., MONZÓ, J., BORRACHERO, M. V., ORDÓÑEZ, L. M. Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, v.77, n.3, 2002, pp. 321-325.
- [11] GANESAN, K., RAJAGOPAL, K., THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. Cement and Concrete Composites, v.29, n.6, 2007, pp. 515-524.
- [12] MORALES, E. V., VILLAR-COCIÑA, E., FRÍAS, M., SANTOS, S. F., SAVASTANO JR., H. Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation. Cement and Concrete Composites, v.31, n.3, 2009, pp. 22-28.
- [13] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. http://www.ibge.net/home/estatistica, acessada em Junho de 2009.
- [14] MEHTA, P. K. Properties of blended cements made from rice husk ash. ACI Journal, v.74, n.40, 1977, pp. 440-442.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Areia Normal para ensaio de cimento -NBR 7214, Rio de Janeiro, 1982.
- [16] SUGITA, S. On the burning principle and the furnace design based on the principle for producing highly active rice husk ash. *In*: 3th International Conference on the Concrete Future, Kuala Lumpur, 1994.

- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação da perda ao fogo - NBR 5743. Rio de Janeiro, 1989.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento - NBR 5752, Rio de Janeiro, 1992.
- [19] SEDRAN, T., DE LARRARD, F. Betonlab Pro2, Computer-aided mix-design, software pub. by presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 2000, http://www.lcpc.fr/LCPC/Bottin/ Organigramme/TGCE/formulation/pagebetonlabpro.htm.
- [20] DE LARRARD, F. Concrete mixture proportioning: a scientific approach, 1st ed., London: E. & F.N. Spon, 1999, p. 421.
- [21] HU, C., DE LARRARD, F. The rheology of fresh high-performance concrete. Cement and Concrete Research, v.26, n.2, 1996, pp. 283-294.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - NBR 5739, Rio de Janeiro, 1994.
- [23] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration ASTM C1202, Philadelphia, 1997.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais pozolânicos - NBR 12653, Rio de Janeiro, 1992.
- [25] RUMPF, H. Physical aspects of comminution and new formulation of a law of comminution. Powder Technology, v.7, n.3, 1973, pp. 145-159.