

## **CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS E PROPOSTA DE APROVEITAMENTO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA USO NA INFRA-ESTRUTURA URBANA**

**A. Sales, S. A. Lima, F. C. R. Almeida e J. P. Moretti**

### **RESUMO**

A cana-de-açúcar ocupa atualmente um papel de destaque na economia mundial, sendo que o Brasil é líder na produção de açúcar e álcool. No processo de produção gera-se como resíduo o bagaço, o qual é utilizado para a co-geração de energia por meio da queima, restando ao final as cinzas residuais do bagaço de cana (CBC). Este trabalho trata das considerações ambientais sobre a CBC, e da possibilidade do seu aproveitamento na construção civil. Para tanto, foram produzidas argamassas com substituição de areia por CBC, nos teores de 0%, 10%, 15%, 20%, 30%, 50% e 100%, as quais foram submetidas a ensaios físicos e mecânicos. Também foi realizada a caracterização química, granulométrica, DrX, solubilização e lixiviação em amostras de CBC. Os resultados permitiram concluir que a CBC pode ser aproveitada em componentes de infra-estrutura urbana, pois apresenta propriedades tecnológicas semelhantes as da areia natural extraídas do leito dos rios.

### **1 INTRODUÇÃO**

O Brasil possui tradição no plantio de cana-de-açúcar desde o século XVIII. Somente no século XX o Brasil descobriu que o álcool poderia ser uma opção energética viável (Proálcool, 2009). Atualmente, o país produz cerca de 60% do álcool etílico (etanol) consumido no mundo e é o maior produtor mundial de açúcar. A cultura da cana-de-açúcar representa uma das principais atividades agrícolas do Brasil e ocupa uma área plantada de cerca de três milhões de hectares (Mapa, 2010; Única, 2009). A produção de cana-de-açúcar está em crescimento desde o ano 2000 e atingiu mais de 593.000.000 toneladas na safra 2009/2010, segundo o Departamento da Cana-de-açúcar e Agroenergia, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

Tecnicamente, o etanol é uma boa alternativa para a gasolina (Moreira e Goldemberg, 1999). É produzido a partir de produtos agrícolas e não tem as impurezas encontradas no petróleo, tais como os óxidos de enxofre e os materiais particulados, que são as principais fontes de poluição em grandes áreas metropolitanas. Além disso, se são realizadas práticas agrícolas adequadas, o etanol reduz as emissões dos gases de efeito de estufa (Goldemberg, 2007).

O setor sucroalcooleiro também apresenta um grande potencial de cogeração energética devido à queima de bagaço de cana-de-açúcar como combustível nas usinas (Prado, 2007). A cogeração de energia é uma prática comum na indústria de processamento de etanol no Brasil, reduz os danos ambientais e poderia ser significativamente aumentada se o desenvolvimento tecnológico conseguisse reaproveitar todos os resíduos da cana (topos e

folhas), além do bagaço, para geração de energia. Além disso, a utilização de etanol a partir da cana não resulta no aumento da emissão de gases de efeito estufa (principalmente o CO<sub>2</sub>). A razão para isto é que o CO<sub>2</sub> produzido pela queima do etanol (e do bagaço nas caldeiras) é reabsorvido pela fotossíntese durante o crescimento da cana na temporada seguinte (Goldemberg *et al.*, 2008).

A demanda por etanol de cana-de-açúcar deverá continuar crescendo nos próximos dez anos, de acordo com o Ministério das Minas e Energia (MME). A geração de eletricidade com a queima do bagaço e da palha poderá superar a capacidade da maior hidrelétrica do Brasil, a Usina de Itaipu (Revista Pesquisa Fapesp, 2009).

Mesmo assim, a indústria sucroalcooleira ainda busca soluções para o descarte dos resíduos gerados no processo de produção de açúcar e álcool. A cinza da queima do bagaço é o último resíduo gerado pela cadeia da cana-de-açúcar. Para cada tonelada de bagaço queimado, são gerados 25 kg de cinza. Somente na última safra, a produção de cinza passou de 10.000 toneladas por dia, no Brasil. Essas cinzas são utilizadas como adubo nas lavouras, mas não possuem nutrientes minerais adequados para essa finalidade. No entanto, as cinzas podem ser utilizadas como substituto do cimento ou da areia, em produtos para a construção civil (Cordeiro *et al.*, 2009; Lima *et al.*, 2009).

Esse trabalho se propõe a discutir a adequabilidade da destinação dos resíduos da cana-de-açúcar em termos ambientais, e a possibilidade do seu aproveitamento em componentes de infra-estrutura urbana, tais como guias e sarjetas, a partir da verificação dos valores das propriedades tecnológicas de argamassas contendo a CBC encapsulada.

## 2 OS AVANÇOS DO ETANOL E AS CONSEQUÊNCIAS AMBIENTAIS

A produção de cana aumentou de 120 para 240 milhões de toneladas, entre 1975 e 1985, e ficou nesse patamar entre 1985 e 1995. Em 1995, iniciou-se outro ciclo de expansão agrícola motivado pela exportação de açúcar. Em 1990, a exportação de açúcar foi de 1.200 toneladas e cresceu para 19.600 toneladas em 2006. Esses números mostram o aumento da competitividade dos subprodutos da cana-de-açúcar (Relatório ÚNICA, 2005). O etanol, usado como combustível no Brasil, desde a década de 1970, substituiu o açúcar no *ranking* das exportações brasileiras. A maior expansão do uso do álcool anidro adicionado à gasolina somente aconteceu com a criação do Programa Brasileiro do Álcool (Proálcool) pelo Governo Federal, que foi estabelecido em 1975 com o propósito de reduzir as importações de petróleo. Nessa época, o preço do açúcar no mercado internacional estava em declínio e tornou-se vantajoso trocar a produção de açúcar pelo álcool. Entre 1975 e 1985, a produção de cana de açúcar quadruplicou e o álcool tornou-se um combustível importante utilizado no país (Moreira e Goldemberg, 1999).

No Brasil, o etanol é utilizado de duas formas: i) misturado à gasolina na forma de 22% de álcool anidro a 99,6° GL (*Gay-Lussac*) e 0,4% de água, uma mistura conhecida como *gasohol*; ou ii) em motores movidos a etanol puro, sob a forma de álcool hidratado a 95,5° GL. O *gasohol* se tornou o combustível alternativo do Brasil (Revista Pesquisa Fapesp, 2009).

As discussões internacionais sobre a expansão dos biocombustíveis e a escassez de alimentos não deve frear o crescimento da cana-de-açúcar. No Brasil, apenas 1% da área agriculturável (0,5% do território brasileiro) é ocupada pela produção de cana-de-açúcar,

enquanto que 49% desse território são dedicados às pastagens (Revista Pesquisa Fapesp, 2009).

Atualmente, as plantações de cana ocupam uma área plantada de cerca de três milhões de hectares, distribuída por grande parte do território brasileiro. O Estado de São Paulo é responsável por mais de 60% da produção brasileira de cana-de-açúcar e por 62% do etanol produzido (Mapa, 2010; Unica, 2009).

Os fatos indicam que o cenário agrícola brasileiro aponta para o aumento na produção de cana-de-açúcar e na expansão dos canaviais, por dois motivos semelhantes: i) a independência nacional das importações de petróleo, substituindo o *gasohol* pelo álcool como combustível; ii) a possibilidade da cogeração de energia nas usinas de cana. Estes fatos ratificam a importância da cana-de-açúcar no setor energético brasileiro.

Sendo assim, o aumento na produção de etanol implicará no aumento da queima de bagaço como fonte de energia nas usinas e levará ao aumento na geração de vários resíduos, entre eles, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC).

No Brasil, em média, obtém-se 120 kg de açúcar e 14 litros de álcool ou 80 litros de álcool (no caso de destilarias) para cada tonelada de cana moída ou esmagada na unidade industrial. Para cada tonelada de cana, obtém-se mais 100 a 400 kg de torta de filtro, 800 a 1000 litros de vinhaça, 260 kg de bagaço de cana e 25 kg de cinza (Jendiroba, 2006).

Esses dados devem aumentar nos próximos anos por causa da expansão do mercado consumidor de álcool, das lavouras de cana-de-açúcar e do funcionamento de novas unidades agroindustriais (Spadotto, 2007). O último resíduo produzido pela cadeia produtiva da cana-de-açúcar é a cinza. A cinza leve gerada no processo é recolhida a partir de técnicas de lavagem e decantação e, com a cinza das caldeiras (cinza pesada), constituem-se em resíduos finais do processo industrial, os quais não há possibilidade de redução (Jendiroba, 2006; Souza *et al.*, 2007).

Atualmente há uma preocupação da comunidade internacional em certificar o processo produtivo sucroalcooleiro, como forma de garantir melhores práticas agrícolas, ambientais e sociais. Apesar de gerar muitos resíduos ao longo da produção do açúcar e do álcool, esse setor, liderado pelo Brasil, prepara-se para propor uma certificação global após pressões da comunidade internacional (Jornal da Ciência, 2009).

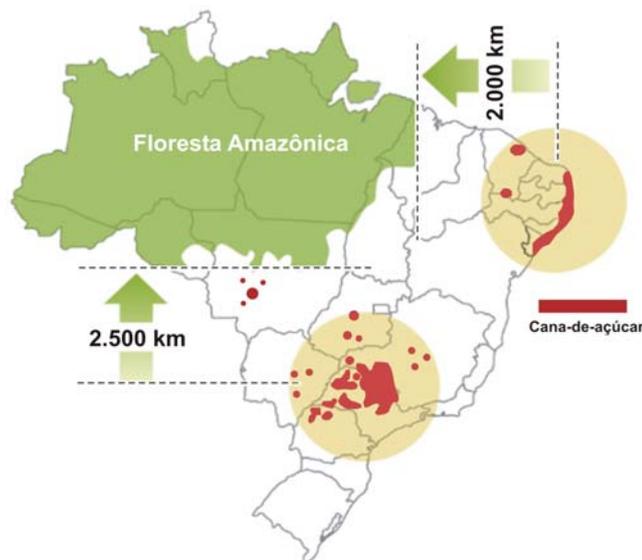
A ação conhecida como *Better Sugarcane Initiative (BSI)* começou a ser elaborada há três anos e reúne grandes produtores e consumidores de açúcar e álcool, além de financiadores e organizações não-governamentais. A iniciativa também levou em conta as diretivas da União Européia de promoção de energia renovável, adotadas em dezembro de 2008, que determinaram a redução de 35% nas emissões de gases de efeito estufa, subindo para 50% em 2017.

A *BSI* permitirá aos produtores brasileiros a aceitação dos produtos derivados da cana-de-açúcar pelos países europeus. Uma das principais críticas desses países é o avanço das plantações em áreas ocupadas pela floresta Amazônica, que é rebatido por pesquisadores brasileiros. A idéia corrente de que o avanço da cana ampliaria o desmatamento da Amazônia foi contestada no workshop *Physics and Chemistry of Climate Change and Entrepreneurship*, que ocorreu em 2008. Foi salientado que não é viável plantar cana-de-

açúcar na Amazônia e que as principais áreas de cultivo encontram-se nas regiões Sudeste e Nordeste, distantes mais de 2.000 km da floresta (Figura 1).

Outros estudos têm buscado uma definição sobre a sustentabilidade da produção de açúcar e etanol brasileiros. Em um estudo recente sobre a sustentabilidade do etanol brasileiro e as possibilidades de certificação do setor, dezessete áreas de preocupações ambientais e socioeconômicas são apontadas, sendo oito áreas de tema ecológico e ambiental: 1 – uso da água; 2 – poluição da água; 3 - biodiversidade; 4 – erosão do solo; 5 – uso de fertilizantes; 6 – organismos geneticamente modificados; 7 – queima da cana; e 8 – emissão de gases de efeito estufa e balanço energético (Smeets *et al.*, 2008). O estudo não aborda em nenhum momento a questão da disposição final dos resíduos.

A Resolução 313/2002 do CONAMA instituiu o Inventário de Fontes Poluidoras no Estado de São Paulo e cadastrou 1.923 indústrias. Observou-se que as indústrias do Estado de São Paulo geraram por ano mais de 500 mil toneladas de resíduos sólidos perigosos, cerca de 20 milhões de toneladas de resíduos sólidos não-inertes e não-perigosos, e acima de um milhão de toneladas de resíduos inertes (CONAMA, 2002).



**Fig. 1 Mapa da distribuição da cana-de-açúcar no Brasil. Fonte: Unica, 2008**

A prática de dispor a cinza como adubo, misturada à torta de filtro e/ou à vinhaça, é comum nos canaviais do Estado de São Paulo. Os produtores atestam, dessa forma, que há o aproveitamento de todos os resíduos na própria cadeia produtiva. Apesar de ser tratada como uma iniciativa “ambientalmente correta”, essa prática ignora o uso dos agrotóxicos nas plantações e a persistência desses produtos no solo quando a cinza é utilizada como adubo. A CBC deveria ter passado por testes de toxicidade, como os que são descritos na Resolução 313/2002 do CONAMA (baseados na norma NBR 10004 que trata da Classificação dos Resíduos Sólidos), antes de ser utilizada como adubo.

### 3 O USO DE RESÍDUOS COMO SUBSTITUTO DA AREIA

Várias pesquisas têm sido desenvolvidas sobre a viabilidade da substituição de agregado miúdo natural por resíduos de origens diversas (Marzouk *et al.*, 2007; Ismail and Al-Hashmi, 2008; entre outros).

Os resíduos de plásticos não-biodegradáveis (80% polietileno e 20% poliestireno) substituíram o agregado miúdo, em teores de 10%, 15% e 20%, na produção de concretos. Os valores do ensaio de resistência à compressão das misturas com resíduos ficaram abaixo dos valores de referência em todas as idades analisadas (Ismail e Al-Hashmi, 2008). Outros resíduos também têm sido estudados como substituto da areia natural. As cinzas provenientes da queima de resíduo sólido municipal (RSMI) substituíram a areia e o cimento Portland na produção de concretos. Os teores de 0%, 10%, 20% e 30% de substituição e o fator água/cimento (a/c) constante (no valor de 0,70) foram utilizados. Outros valores de fator a/c foram testados, mas produziram concretos com baixa trabalhabilidade. A amostra confeccionada com 30% de RSMI apresentou um aumento pouco significativo em relação ao exemplar com 20% de substituição. Os autores concluíram que, economicamente e tecnicamente, o valor de 20% foi o mais indicado (Al-Rawas *et al.*, 2005).

O uso de cinzas pesadas em substituição a areia natural tem mostrado grande potencial de aproveitamento para produção de materiais à base de cimento Portland (Andrade *et al.*, 2007). Um problema na utilização das cinzas como aglomerante alternativo, material filler ou adição mineral é a pouca reatividade da maior parte delas. O processo (industrial ou agroindustrial) que as gera, raramente possui controle operacional da temperatura de combustão dos resíduos e do tipo de resfriamento das cinzas. Esses procedimentos tendem a produzir cinzas sem reatividade hidráulica (Souza *et al.*, 2007). A temperatura da chama na queima do bagaço da cana-de-açúcar pode variar entre 850°C e 920°C, com 50% umidade, e pode alcançar valores acima de 1000°C, quando a umidade estiver inferior a 35%.

A CBC tem sido estudada como adição mineral em materiais cimentícios (Hernández *et al.*, 1998; Souza *et al.*, 2007; Cordeiro *et al.*, 2008; entre outros) principalmente pela alta produção de etanol e de açúcar nos últimos anos e conseqüente aumento da geração de cinza. Mesmo com resultados satisfatórios, algumas pesquisas apontaram que a alta temperatura de queima e a combustão incompleta nas caldeiras reduziram a reatividade da cinza em função do elevado teor de carbono e da presença da sílica em estado estrutural cristalino (Hernández *et al.*, 1998; Souza *et al.*, 2007; Cordeiro *et al.*, 2009). Mesmo em estado estrutural cristalino e com pouca reatividade hidráulica, a CBC tem se mostrado um subproduto viável para aplicação em materiais de construção, ainda que sejam observadas suas características intrínsecas, como alto teor de sílica em forma de quartzo, um dos principais elementos presentes na areia natural (Cordeiro *et al.*, 2008). Essa alternativa de reciclagem da CBC é o objetivo deste trabalho, que avaliou o aproveitamento desse resíduo como substituto do agregado miúdo em argamassas.

#### **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram coletadas amostras de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em quatro usinas do Estado de São Paulo, Brasil. As características físicas e químicas das cinzas e a aplicação preliminar em argamassas como substituto da areia foram analisadas. As cidades onde foram coletadas as amostras de CBC foram: Jaú (amostra CBC-J); Araraquara (amostra CBC-A); Ibaté (amostra CBC-I); e Barra Bonita (CBC-B).

A CBC foi coletada diretamente das caldeiras (amostras CBC-J, CBC-A e CBC-I) durante a etapa de limpeza das caldeiras. A amostra CBC-B foi composta pela cinza pesada, de

fundo de grelha, colhida automaticamente por uma esteira, posteriormente misturada à cinza leve proveniente da lavagem dos gases das chaminés. Na Figura 2 pode ser observada a coleta de CBC nas usinas.



**Fig. 2 (a) Retirada da cinza da caldeira; (b) e (c) CBC coletada diretamente dos dutos, na usina da cidade de Barra Bonita**

Uma grande quantidade de areia foi observada misturada às cinzas. Essa areia é proveniente das lavouras e não é totalmente removida durante a etapa de lavagem da cana, fato também observado por Cordeiro *et al.* (2008).

#### 4.1. Caracterização da CBC

As amostras de CBC foram analisadas quanto à composição química, granulometria e difratometria de raios X. Os contaminantes foram analisados pelo ensaio de lixiviação e solubilização (NBR 10004, 10005 e 10006). Todas as amostras utilizadas na fase de caracterização passaram por secagem em estufa a 100°C, por 12h, e por moagem durante três minutos em moinho tipo almofariz-pistilo.

A espectrometria de fluorescência de raios X (Espectrômetro Philips PW 2400) foi utilizada para a análise química das amostras. As composições granulométricas dos agregados naturais foram determinadas segundo a NM 248. As amostras de cinza foram peneiradas por dez minutos no peneirador automático, com a série de peneiras de malha quadrada: 6,3 mm; 4,8 mm; 2,4 mm; 1,2 mm; 0,6 mm; 0,3 mm e 0,15 mm. As porções retidas nas peneiras foram pesadas e, em seguida, calculados o módulo de finura, a dimensão máxima característica e as porcentagens retidas acumuladas de cada amostra.

A técnica de Difratometria de Raios X (DrX) foi utilizada na análise de quatro amostras de CBC *in natura*. Um difratômetro de Raios X da marca RIGAKU ROTAFLEX, modelo RU200B, foi utilizado com os seguintes parâmetros: i) radiação: Cu K $\alpha$ ; ii) tensão: 50Kv; iii) corrente: 100mA; iv) varredura com passo de 0,02° 2 $\theta$ ; v) tempo de coleta: 2°/min; vi) intervalo de varredura: 3 a 100° (2 $\theta$ ).

#### 4.2. Propriedades mecânicas de argamassas com CBC

A influência da variação dos teores de substituição da areia pela CBC foi analisada segundo o ensaio de resistência à compressão em corpos-de-prova cilíndricos de argamassa. Foi possível avaliar o teor ótimo de aplicação da CBC para que as propriedades mecânicas da matriz cimentícia fossem mantidas. As amostras CBC-A e CBC-J foram selecionadas entre as quatro amostras iniciais por apresentarem características mais similares às da areia natural comercializada na região de São Carlos. Seis traços foram moldados, com três amostras cada, e analisados nas idades de 7, 14 e 28 dias. Os dados da moldagem estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 Teores de substituição de areia por CBC nos traços moldados**

Grupo A - Araraquara	Grupo J - Jaú	% CBC (em massa)
R (referência)	R (referência)	0
C10-A	C10-J	10
C15-A	C15-J	15
C20-A	C20-J	20
C30-A	C30-J	30
C50-A	C50-J	50
C100-A	C100-J	100

As argamassas foram produzidas em bateadeira industrial e foram moldadas em formas cilíndricas ( $\varnothing$  5cm x 10 cm altura). Os materiais utilizados foram o cimento Portland CP V ARI RS (cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos), areia quartzosa, amostras de CBC-A e CBC-J e água, no traço 1:3 em massa. O cimento Portland CPV foi escolhido por ser isento de adições cimentantes (pozolanas ou escória). Isso possibilita maior precisão nos resultados sobre a viabilidade de aplicação da CBC em matrizes cimentícias. Os valores da composição física e química do cimento são apresentados na Tabela 2.

A caracterização do agregado miúdo apresentou os seguintes resultados, segundo as normas brasileiras: massa específica no valor de 2,45 kg/dm<sup>3</sup>; massa unitária, no estado seco e solto, no valor de 2,04 kg/dm<sup>3</sup>; e absorção de água no valor de 0,88%. A areia atendeu aos requisitos e pode ser classificada como areia fina (zona 2).

**Tabela 2 Propriedades do cimento CPV ARI RS.** Fonte: Ciminas S.A.

Propriedades	Unidade	Cimento	Elementos (%)	Cimento	
Tempo de pega – início	min	167	MgO	2,01	
Finura	Retido # 200	%	0,30	PF 1000°C	2,30
	Blaine	cm <sup>2</sup> /g	4633	CO <sub>2</sub>	1,24
Resistência à compressão ( $f_{cj}$ )	1 dia	MPa	21,30	Resíduo insolúvel	0,50
	3 dias	MPa	36,60	SO <sub>3</sub>	2,33
	7 dias	MPa	43,80		
	28 dias	MPa	52,00		

O valor do fator a/c das argamassas foi estipulado por meio de pesquisa na literatura (Al-Rawas *et al.*, 2005; Marzouk *et al.*, 2007; Ismail e I-Hashmi, 2008). O fator a/c foi mantido constante, para todas as misturas, nos estudos sobre a substituição de agregado miúdo por resíduos em matrizes cimentícias. Os pesquisadores utilizaram fatores a/c entre 0,45 e 0,60, e a presente pesquisa adotou o valor de 0,55, o qual foi usado em todas as misturas. Os corpos-de-prova permaneceram em seus moldes até a idade 24 horas, quando foram desmoldados, capeados e acondicionados em câmara úmida (temperatura de 23 °C  $\pm$  5° C e umidade de 90%  $\pm$  5%) até a idade de ruptura.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram observados valores elevados de sílica (SiO<sub>2</sub>) em todas as amostras, com teores acima de 75% (Tabela 3). O efeito da absorção do silício do solo pelas raízes da cana-de-

açúcar pode explicar esta presença do SiO<sub>2</sub>. O acúmulo de silício entre a cutícula e a parede das células da planta funciona como uma barreira física à penetração de fungos patogênicos e reduz as perdas de água por transpiração.

**Tabela 3 Resultado da análise química com os principais elementos identificados nas amostras de CBC**

Elementos	CBC-J (%)	CBC-I (%)	CBC-B	CBC-A (%)
SiO <sub>2</sub>	88,2	96,2	62,7	93,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,4	1,9	13,3	3,8
K <sub>2</sub> O+ Na <sub>2</sub> O	1,4	0,3	1,9	0,8
CaO	0,6	0,1	0,9	0,4
MgO	0,4	< 0,1	0,6	0,3
SO <sub>3</sub>	< 0,1	0,1	0,2	< 0,1
Perda ao fogo	0,35	1,04	16,28	0,34

Outra fonte de sílica na cinza é a areia (quartzo) oriunda da lavoura, que não é totalmente removida durante a etapa de lavagem da cana-de-açúcar. Esta areia permanece no bagaço e pode ser observada nas operações de limpeza dos salões das caldeiras, onde ocorre a combustão (Cordeiro *et al.*, 2008). A amostra CBC-B se diferenciou das demais em relação ao teor de sílica e de perda ao fogo. Essa característica pode ser devido ao sistema de coleta, que mistura a cinza pesada das caldeiras com a cinza leve das chaminés, bastante escura. A coloração escura das cinzas indica um alto teor de carbono, característica de combustão incompleta do bagaço (Cordeiro, 2006).

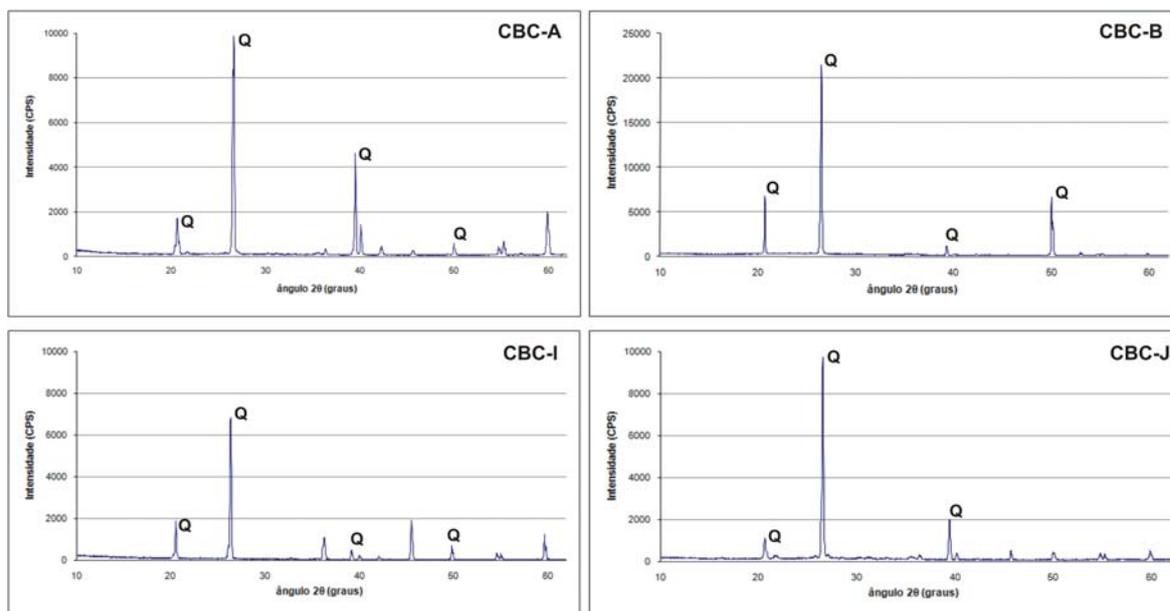
A CBC pode ser classificada como areia fina, segundo os resultados das análises granulométricas, com módulos de finura entre 0,6 e 1,2 (Tabela 4). Esses valores são similares aos da areia utilizada na cidade de São Carlos.

**Tabela 4 Propriedades físicas das amostras de CBC**

Propriedades	CBC-J	CBC-I	CBC-B	CBC-A
Módulo de Finura	1,23	1,46	0,52	1,46
Dimensão Máxima Característica	0,60	0,60	0,60	1,20
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,39	1,30	0,98	1,43
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	2,58	2,23	2,63

O estado estrutural cristalino das amostras analisadas foi determinado pela difratometria de raios X. Observou-se, também, a ausência de um halo amorfo nos difratogramas (Figura 3). O quartzo apareceu como o principal elemento constituinte da CBC, o mesmo observado por Cordeiro *et al.* (2008). Essa informação reforça a hipótese de substituição da CBC pelo agregado miúdo, que é um material inerte.

Os testes de solubilização realizados em amostras de CBC seguiram as prescrições da normalização brasileira (NBR 10004, NBR 10005 e NBR 10006. A norma 10004 é baseada na CFR – Title 40 – Protection of environmental – Part 260-265 – Hazardous waste management.



**Fig. 3 Difratomogramas das amostras de CBC (Q = quartzo)**

Na Tabela 5 estão apresentados os valores obtidos para o extrato solubilizado da CBC. Os resultados indicam a presença de metais pesados acima do limite máximo permitido (Lima *et al.*, 2009).

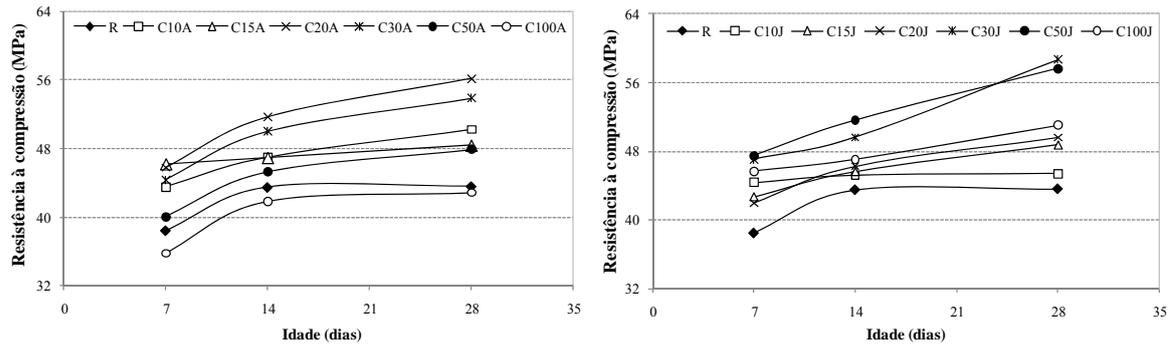
**Tabela 5 Elementos encontrados no extrato solubilizado da CBC**

Elemento	Unidade	CBC-B	CBC-A	CBC-J	CBC-I	Limite no extrato (mg/L)*	Limite de detecção (LD)
Alumínio	mg Al/L	<LD	<u>0,56</u>	<u>0,25</u>	0,12	0,200	0,010
Cádmio	mg Cd/L	<u>0,032</u>	<LD	<u>0,028</u>	<u>0,008</u>	0,005	0,0006
Chumbo	mg Pb/L	<u>0,22</u>	<u>0,02</u>	<u>0,26</u>	<u>0,05</u>	0,010	0,010
Fenóis totais	mg C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	<u>0,02</u>	<LD	<LD	<LD	0,010	0,001

\* NBR 10005 (2004); LD = limite de detecção do equipamento

Os resultados do extrato lixiviado se mantiveram dentro do limite para o grupo dos componentes inorgânicos, segundo o Anexo F, da NBR 10004. No ensaio de solubilização, foram encontrados elementos químicos acima do permitido pela NBR 10006. Dessa forma, todas as amostras de CBC analisadas foram classificadas como “Resíduo Não perigoso – Classe II A – Não inerte”, de acordo com a NBR 10004. Os resíduos com tal classificação podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Os resultados dos ensaios mecânicos nas amostras produzidas com CBC indicaram valores maiores que o exemplar de referência (R), com exceção da amostra C100A. As amostras C20A e C30J apresentaram os maiores valores aos 28 dias, com 56,15 MPa e 58,70 MPa, respectivamente. O efeito de empacotamento físico das partículas de cinza pode explicar o fato das argamassas com CBC terem obtido valores até 25% acima dos valores de referência (Cordeiro *et al.*, 2008). A trabalhabilidade permaneceu constante para todas as amostras, com exceção das argamassas com 100% de substituição de areia por cinza (C100A e C100J). Esse fato pode ser devido a menor massa específica da CBC, o que requer mais água de amassamento para manter a mesma trabalhabilidade. Os valores de resistência à compressão dos corpos-de-prova de argamassa são apresentados na Figura 4.



**Fig. 4 Valores de resistência à compressão das argamassas com CBC – Grupos A e J**

A magnitude dos valores da resistência à compressão determinada na presente pesquisa permite validar o uso na CBC de forma encapsulada em matrizes cimentícias para constituir componentes de infra-estrutura urbana, tais como guias e sarjetas.

## 6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos por esta pesquisa, pode-se concluir que:

- i. Todas as amostras de CBC apresentam teores de sílica maiores que 75% ( $\text{SiO}_2$ ). A amostra CBC-B apresentou alto teor de perda ao fogo (acima de 5%) e fragmentos de bagaço de cana não-queimados em sua composição, o que restringe sua utilização em matrizes cimentícias, devido ao alto teor de carbono;
- ii. As amostras CBC-J e CBC-A apresentaram propriedades físicas semelhantes as da areia natural. A CBC pode ser comparada à areia fina, segundo os resultados das análises granulométricas;
- iii. Todas as amostras de CBC apresentam estrutura cristalina, segundo as análises de difratometria de raios X. Essa informação reforça a hipótese de substituição da CBC pelo agregado miúdo, que é um material inerte, e não pelo cimento Portland, que tem propriedades aglomerantes;
- iv. Todas as amostras de CBC analisadas foram classificadas como “Resíduo Não perigoso – Classe II A – Não inerte”. Os resíduos com tal classificação podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. A partir desta constatação, sugere-se que a CBC não seja utilizada como auxiliar na adubação de plantações de cana-de-açúcar, como é praticado atualmente;
- v. Nas análises com argamassas, as amostras confeccionadas com 20 e 30% de CBC em substituição à areia obtiveram valores de resistência à compressão maiores que os exemplares de referência, sendo que a magnitude destes valores é adequada para a produção de guias e sarjetas.

Este conjunto de resultados indica que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar como um substituto da areia natural é uma alternativa tecnicamente viável para a produção de componentes de infra-estrutura urbana, tais como guias e sarjetas. Além disso, o encapsulamento da CBC em matrizes cimentícias poderá mitigar os problemas ambientais resultantes da crescente e persistente disposição deste resíduo na agricultura e aterros sanitários, além de diminuir a necessidade cada vez maior de extração de areia natural dos rios.

## 7 REFERÊNCIAS

Al-Rawas, A. A.; Hago, A. W.; Taha, R.; Al-Kharousi, K. (2005). Use of incinerator ash as a replacement for cement and sand in cement mortars. **Building and Environment** 40, 1261-66.

Andrade, L. B.; Rocha, J. C.; Cheriaf M. (2007). Evaluation of concrete incorporating bottom ash as natural aggregates replacement. **Waste Management** (Elmsford) 27 (9), 1190-99.

CONAMA (2002). Resolução 313. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Diário Oficial da União, 16 p.

Cordeiro, G. C. (2006). Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 416 p.

Cordeiro, G. C.; Toledo Filho, R. D.; Tavares, L. M.; Fairbairn, E. M. R. (2008). Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites** 30, 410–418.

Cordeiro, G. C.; Toledo Filho, R. D.; Tavares, L. M.; Fairbairn, E. M. R. (2009). Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. **Cement and Concrete Research** 39, 110-115.

Goldemberg, J. (2007). Ethanol for a sustainable energy future. **Science** 315, 808-810.

Goldemberg, J.; Coelho, S. T.; Guardabassi, P. (2008). The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy** 36, 2086– 2097.

Hernández, J. F. M.; Middendorf, B.; Gehrke, M.; Budelmann, H. (1998). Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reactions. **Cement and Concrete Research** 28, 1525-1536.

Ismail, Z. Z.; Al-Hashmi, E. A. (2008). Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. **Waste Management** 28 (11), 2041-2047.

Jendiroba, E. (2006). Aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira. In *Gestão de resíduos na agricultura e na agroindústria*. / C. Spadotto e W. Ribeiro (ed.). Botucatu : FEPAF, 319 p.

Jornal da Ciência (2009). **Cana agora terá certificação global**. Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência. Disponível em: <http://www.jornaldaciencia.org.br/>.

Lima, S. A.; Sales, A.; Santos, T. J. (2009). Caracterização físico-química da cinza do bagaço da cana-de-açúcar visando o seu uso em argamassas e concretos como substituto do agregado miúdo. Anais do 51º. Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, São Paulo, 12 p.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2010). **Evolução da Produtividade da cana-de-açúcar no Brasil**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br>.

Marzouk, O. Y.; Dheilily, R. M.; Queneudec, M., 2007. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. **Waste Management** 27, 310–318.

Moreira, J. R., Goldemberg, J. (1999). The alcohol program, **Energy Policy** 27 (4), 229-245.

NBR 10004 (2004). **Resíduos sólidos** – Classificação. Rio de Janeiro, 77 p.

NBR 10005 (2004). **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 20 p.

NBR 10006 (2004). **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 7 p.

Prado, T. G. F. (2007). **Externalidades do ciclo produtivo da cana-de-açúcar com ênfase na produção de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado - Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia) Universidade de São Paulo, 252 p.

Proálcool (2009). **Programa Brasileiro do Álcool**. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com/proalcool/proalcool.htm>.

Relatório UNICA (2005). **A energia da cana-de-açúcar** – Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade / I. C. M. (org.). São Paulo: UNICA – União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, 245 p.

Revista Pesquisa Fapesp (2009). **Cardápio energético**. Edição Impressa, 157, 8 p.

Souza, G. N.; Formagini, S.; Custódio, F. O.; Silveira, M. M. (2007). **Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar**. Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, São Paulo, 11 p.

Smeets, E.; Junginger, M.; Faaij, A.; Arnaldo, W.; Dolzan, P.; Turkenburg, W. (2007). The sustainability of Brazilian ethanol - An assessment of the possibilities of certified production. **Biomass and Bioenergy** 32, 781-813.

Spadotto, C. A. (2007). Gestão de Resíduos: realizações e desafios no setor sucroalcooleiro EMBRAPA Meio Ambiente. Available at: [http://www.cnpma.embrapa.br/down\\_hp/360.pdf](http://www.cnpma.embrapa.br/down_hp/360.pdf).

Unica - União das Indústrias de Cana-de-açúcar (2009). **Setor Sucroenergético** - Mapa da Produção. Disponível em: <http://www.unica.com.br/content/show.asp>.