

Analysis of the influence of the sugar cane bagasse ashes on mechanical behavior of concrete

Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos



Z. L. M. SAMPAIO^a
zodinio@hotmail.com

P. A. B. F. SOUZA^a
paulo.alysson@ig.com.br

B. G. GOUVEIA^a
dedeguida@hotmail.com

Abstract

Concrete is the second most consumed product in the world and the incorporation of agro-industrial waste to this material, such as Sugar Cane Bagasse Ash (SBA), can provide solutions for the utilization of by-products from other industries, thus reducing the environmental impact. The main objective of this paper was to analyze the mechanical behavior of concrete containing SBA from three different species of cane sugar (SP911049, SP816949 and RB92579) by testing consistency, voids, absorption, porosity and compressive strength. Were produced 13 specimens of standard concrete and for each SBA content (10%, 20% and 30%) of the three varieties collected, totaling 130 samples of concrete. We employed a mix proportion 1:2:3 (cement: sand: gravel) over the mass of cement with a water / cement ratio of 0.532 and 1% Tec Mult 400 Additive also based on the weight of cement. The results showed that the variety of cane sugar, used in the production of the SBA, influenced the mechanical behavior of the resulting concrete. All concrete with addition of SBA showed a reduction of at least 10% in the properties related to permeability and an increase in compressive strength of up to 20% compared to standard concrete after 28 days. The use of the SBA addition the concrete proved to be a very feasible option in improving the mechanical properties of concrete for use in normal constructions and also an appropriate destination to the agro-industrial by-product.

Keywords: concrete; bagasse ash from sugar cane; variety of sugar cane; sugarcane industry.

Resumo

O concreto é o segundo produto mais consumido no mundo e a incorporação de resíduos agroindustriais, tais como a Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBC), a este material pode apresentar soluções para o aproveitamento de subprodutos de outros setores, reduzindo assim o impacto ambiental. O objetivo principal deste trabalho foi de analisar o comportamento mecânico dos concretos contendo incorporações de CBC de três diferentes espécies de cana-de-açúcar (SP911049, RB92579 e SP816949), mediante ensaios de consistência, índice de vazios, absorção, porosidade total e resistência à compressão. Foram produzidos 13 corpos de prova para o concreto padrão e para cada teor de incorporação de CBC (10%, 20% e 30%) das três variedades coletadas, totalizando 130 amostras de concreto. Foi empregado o traço 1:2:3 (cimento:areia:brita) em relação à massa do cimento com um fator água/cimento de 0,532 e 1% de aditivo Tec Mult 400 também baseado na massa do cimento. Os resultados mostraram que a variedade da cana-de-açúcar, utilizada na produção das CBC, influenciou no comportamento mecânico dos concretos resultantes. Todos os concretos com adição de CBC apresentaram uma redução de no mínimo 10% nas propriedades relacionadas à permeabilidade e um incremento na resistência à compressão de até 20% em relação ao concreto padrão aos 28 dias. O uso da CBC em adição ao concreto se mostrou uma opção bastante viável na melhoria das propriedades mecânicas do concreto para uso em construção civil em geral e também uma destinação adequada ao subproduto agro-industrial.

Palavras-chave: concretos; cinza do bagaço de cana-de-açúcar; variedade de cana-de-açúcar; indústria sucroalcooleira.

^a Departamento de Engenharia Civil, UFRN, Natal, RN, Brasil.

1. Introdução

Nas últimas décadas notou-se um aumento gradativo de descarte de diferentes resíduos no meio ambiente, assim como problemas oriundos da escassez de matérias-primas naturais no ramo da construção civil. Tais fatores vêm impulsionando o desenvolvimento de pesquisas nas universidades, centros acadêmicos, institutos e empresas na busca de alternativas específicas para o aproveitamento de resíduos industriais, como novos materiais, na tentativa de reduzir o seu impacto ambiental.

As pesquisas que visam adequar o uso de alguns subprodutos, como a escória de alto forno moída e sílica ativa no concreto, transformaram esses resíduos em materiais de grande valor comercial. Sobretudo pela utilização eficiente desses resíduos, assim como, as suas combinações, que produzem concretos com características melhoradas (NEVILLE, [1]).

Na mesma tendência, têm-se pesquisado novas adições minerais, economicamente viáveis, nas quais se podem citar a cinza da casca de arroz (CCA) e a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), entre outros (PRUDÊNCIO JR. ET AL. [2]).

Durante a produção de açúcar e álcool é gerado, como subproduto, o bagaço de cana resultante da extração do caldo da cana-de-açúcar pelo processo de moagem. O bagaço tem sido aproveitado como fonte energética, pois cerca de 95% desta biomassa é queimada em caldeiras para geração de vapor na produção de açúcar e álcool gerando-se um novo resíduo, que é a CBC (PAULA, ET AL. [3]).

De acordo com a FIESP/CIESP [4], para cada 250 kg de bagaço queimado há uma produção de cerca de 6 kg de cinza residual (0,7% da massa de cana-de-açúcar). Normalmente essas cinzas são usadas como fertilizantes (adubação) nas próprias lavouras de cana, no entanto, devido à carência dos nutrientes, muitas vezes, são descartadas na natureza sem uma destinação adequada (CORDEIRO [5]).

A cinza possui como composto químico principal a sílica (SiO_2), em quantidades normalmente acima de 60% em massa (CORDEIRO [5]). Controlando as condições de queima é possível manter a sílica contida no bagaço em estado amorfo, característica principal que possibilita o uso desse resíduo como pozolana. O alto teor de silício (Si) presente na CBC é absorvido do solo pelas raízes da cana-de-açúcar na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4). Posteriormente a transpiração da planta (saída de água), o silício fica retido na parede externa das células da epiderme sob a forma de sílica gel (BORJA [6]).

Os principais estudos sobre o assunto estão concentrados na CCA que, normalmente, apresenta teores de silicatos (SiO_2) acima de 90% (JOHN ET AL. [7]), porém, outras pesquisas vêm demonstrando que as CBC podem ter igual potencial de utilização necessitando apenas de estudos mais aprofundados. O uso do resíduo CBC pode permitir não só vantagens técnicas, como também benefícios sociais relacionados com a redução de descartes de resíduos no meio ambiente o que, de certo modo, incentiva a inovação em pesquisas que averiguam as potencialidades desses materiais.

Paula et al., [3] mostraram em pesquisa que a CBC é uma fonte viável de adição mineral de cimentos, dependendo das características da sílica presente. No caso, da pesquisa citada, a sílica (SiO_2) encontrada na CBC (em teores de 84%), apresentou-se tanto na fase amorfa quanto nas fases cristalinas de cristobalita e quartzo. As argamassas produzidas com maiores teores de CBC foram mais porosas, com maior absorção de água e os índices

de atividade pozolânica comprovaram a reatividade da CBC. Os resultados dos ensaios de compressão aos 28 dias apontaram a viabilidade de substituição de até 20% de cimento por este material sem prejuízo da resistência.

Martins e Machado [8] usaram a CBC em substituição à areia na produção de concretos e constataram valores máximos de resistência aos 28 dias com 20% de substituição da CBC em relação à massa do cimento.

Cordeiro et al., [9] estudaram o comportamento da CBC como uma mistura mineral em concretos convencionais e de alto desempenho com uma relação água/cimento de 0,60 e 0,35 respectivamente. Foram utilizadas substituições de 0%, 10%, 15% e 20% do cimento pela CBC. Os concretos com a cinza mostraram desempenho melhor nos ensaios reológicos e a viscosidade plástica não foi significativamente alterada pelo uso de CBC. O concreto com CBC apresentou os melhores resultados nos testes de permeabilidade do íon cloreto.

Nunes et al., [10] pesquisaram concretos com adição de CBC em substituição ao cimento Portland, na qual houve substituição de até 13% de cimento pelas cinzas. Obtiveram um grande aumento na resistência à compressão, no qual o maior valor foi indicado pela substituição de 7% de cinza.

Entretanto, Santos [11] adverte que mesmo com as vantagens citadas, oriundas da utilização de pozolanas junto ao cimento Portland, o uso do material apresenta também algumas desvantagens. Exemplo disso é a exigência do uso de aditivos redutores de água em função do aumento da demanda de água nas misturas e a necessidade de cura adequada para que a reação pozolânica aconteça em sua plenitude, como no caso da cinza volante. Além disso, com a substituição de parte do cimento por pozolana, os concretos passam a ter menores resistências iniciais, em função das reações pozolânicas serem mais lentas.

No Brasil, a utilização do CBC nos concretos torna-se extremamente relevante, já que o país é um dos maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar com inúmeras variedades. De acordo com MAPA [12] as projeções para o agronegócio de 2008/2009 até 2018/2019, a área plantada de cana-de-açúcar no Brasil deve aumentar para 6,0 milhões de hectares, aumentando também as variedades de cana (Figura 1) e a quantidade de resíduos.

Figura 1 – Variedades de cana-de-açúcar



Fonte: AGEITEC (24)

O objetivo deste artigo concentra-se em analisar o comportamento mecânico dos concretos com a adição da CBC de três variedades distintas de cana-de-açúcar no cimento Portland. Para tanto, foram realizados ensaios de massa específica real e unitária, fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (FRX), granulometria e atividade pozolânica das cinzas. No concreto, a análise foi realizada com base em ensaios de consistência, índice de vazios, absorção, porosidade e resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

2. Materiais e programa experimental

Para este estudo foram feitos ensaios laboratoriais com o concreto na proporção (traço) de 1:2:3 (cimento:areia:brita), para uma relação de água/cimento de 0,53 com a adição, em relação à massa de cimento, de um por cento (1%) de aditivo superplastificante TecMult 400. É relevante destacar que se utilizou a referida proporção por se tratar de um traço muito utilizado na construção civil, pois é de simples execução e fornece um concreto com boa qualidade. O tipo de cimento utilizado na produção do concreto desta pesquisa foi o CP II 32 Z RS, proveniente de um único lote de fabricação. Adotou-se o cimento em questão, por se tratar de um tipo largamente utilizado nas obras de construção civil em geral. Em seguida, foram realizados os ensaios normalizados para o Cimento Portland, segundo a ABNT para analisar características físicas e químicas da argamassa padrão, tais como: ensaio de início de pega, expansibilidade, finura, resistência, massa específica real. Os agregados (areia e brita) foram submetidos a ensaios de mas-

sa específica real (NBR NM 52[13] e NBR NM 53[14]), massa unitária (NBR NM 45[15]) e composição granulométrica (NBR NM 248[16]). Foi utilizada na produção do concreto água potável, derivada da rede pública de distribuição da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN).

Os aditivos são substâncias adicionadas à mistura do concreto visando dois objetivos principais: aumentar as qualidades do concreto e/ou diminuir os seus pontos fracos. Foi utilizado o aditivo superplastificante TecMult 400, de cor castanha escura, pH 7,5 +/- 1,0 e massa específica $1,205 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, visando manter a trabalhabilidade adequada do concreto.

Foram utilizadas CBC das espécies SP911049, RB92579 e SP816949 provenientes do município de Pureza – Rio Grande do Norte (Coordenadas 217488,237 E, 9392890,759 N - ZONA 25, conforme o DATUM SIRGAS 2000). É importante frisar que as siglas, antes dos números de referência das variedades de CBC, se referem ao local de origem, no caso SP - "São Paulo" e RB - "República do Brasil".

Para fins de viabilidade de uso, neste trabalho optou-se pela utilização da CBC da forma mais natural, ou seja, com menos tratamento possível a fim de permitir o seu emprego em grande escala. As CBC foram coletadas de forma aleatória no local de despejo da caldeira, após queima a 900 °C do bagaço de cana e armazenadas separadamente em baldes plásticos. As características agroindustriais das variedades coletadas podem ser visualizadas na Tabela 1. As amostras passaram por uma observação superficial, para verificar a cor e a sua homogeneidade, no entanto, não

Tabela 1 - variedades de cana e suas características agroindustriais usadas no trabalho

Variedade	Parentais	Características agroindustriais
SP 911049	SP80-3328 X SP 701143	<ul style="list-style-type: none"> • Precocidade e alto teor de sacarose, sendo recomendada para colheita no início da safra; • Mais produtiva que a RB72454 nos ambientes de produção desfavoráveis; • Hábito semiereto com médio teor de fibra; • Floresce pouco, mas isoporiza; • Resistente às principais doenças e pragas, sendo considerada de suscetibilidade intermediária ao carvão e à cigarrinha.
RB92579	RB75126 X RB72199	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente produtividade agrícola, ótimo perfilhamento, bom fechamento da entrelinha, ótima brotação das socarias, garantindo longevidade dos canaviais; • Porte semiereto, com ótima colheiteabilidade; • Boa recuperação após períodos de seca; • Responsiva à irrigação e muito eficiente no uso da água; • Eficiência no uso dos principais nutrientes; • Ótimo teor de sacarose, maturação média, recomendada para colheita do meio para o final de safra; • Florescimento baixo; • Tolerante em relação ao ataque da broca comum, resistente à ferrugem marrom e escaldadura das folhas e moderadamente resistente ao carvão; • Ausência de amarelinho.
SP816949	-	<ul style="list-style-type: none"> • Boa brotação com maturação tardia; • Apresenta bom rendimento de transporta e colheita mecânica; • Boa brotação de soca, porém possui alguma restrição e susceptível a algumas doenças fúngicas sendo não exigente de solo.

Fonte: Associação dos Fornecedores de Cana Guariba (2012)

Tabela 2 – Formulação dos concretos

Concreto	Tipo de CBC	Traço do concreto	Traço do concreto aumentado (Kg)	Traço do concreto aumentado (L)	Fator a/c	Teor de aditivo (%)	Teor de CBC (%)
CP	-	1:2:3	8:16:24	2,71:6,15:8,9	0,53	1	0
CA10%	SP 911049	1:2:3	8:16:24	2,71:6,15:8,9	0,53	1	10
CA20%	SP 911049	1:2:3	8:16:24	2,71:6,15:8,9	0,53	1	20
CA30%	SP 911049	1:2:3	8:16:24	2,71:6,15:8,9	0,53	1	30
CB10%	RB 92579	1:2:3	8:16:24	2,71:6,15:8,9	0,53	1	10
CB20%	RB 92579	1:2:3	8:16:24	2,71:6,15:8,9	0,53	1	20
CB30%	RB 92579	1:2:3	8:16:24	2,71:6,15:8,9	0,53	1	30
CC10%	SP 816949	1:2:3	8:16:24	2,71:6,15:8,9	0,53	1	10
CC20%	SP 816949	1:2:3	8:16:24	2,71:6,15:8,9	0,53	1	20
CC30%	SP 816949	1:2:3	8:16:24	2,71:6,15:8,9	0,53	1	30

Volume total aproximado do concreto produzido por traço 22,1 Litros

LEGENDA

- CP – Concreto Padrão com 0% de cinza
- CA10% – Concreto com 10% de cinza A
- CA20% – Concreto com 20% de cinza A
- CA30% – Concreto com 30% de cinza A
- CB10% – Concreto com 10% de cinza B
- CB20% – Concreto com 20% de cinza B
- CB30% – Concreto com 30% de cinza B
- CC10% – Concreto com 10% de cinza C
- CC20% – Concreto com 20% de cinza C
- CC30% – Concreto com 30% de cinza C

se observou diferenças substanciais com relação a essas características. Ainda, foi efetivado um peneiramento prévio, com a peneira de malha (#) 1,2 mm, para a obtenção de partículas uniformes e eliminação de possíveis impurezas. A seguir, foram depositadas em estufa por três dias, com temperatura de 105°C, com a finalidade de eliminar suas umidades. Posteriormente, foram realizados ensaios de granulometria (NBR NM 248 [16]), massa específica real (NBR NM 52 [13]), massa específica unitária (NBR NM 45 [15]) e pozolanicidade com cimento Portland (NBR 5752 [17]). É importante frisar que no ensaio da atividade pozolânica foi utilizado o cimento CP II E 32, visto que a norma não permite o uso de cimentos que contenham pozolana na sua constituição. Além disso, foram realizados ensaios de fluorescência de raio X (FRX) e difração de raio X (DRX).

Na produção do concreto foram adicionadas ao cimento Portland CBC em teores de 10, 20 e 30% em relação à massa do cimento para cada variedade. A proporção adotada foi baseada em ensaios prévios e nos estudos de alguns autores que pesquisaram a CBC (Paula et al., [3]; Martins e Machado [8]; Cordeiro et al., [9]). Os quantitativos dos traços usados na produção do concreto encontram-se expostos na Tabela 2. A mistura foi realizada por meio de uma betoneira, de eixo inclinado com capacidade nominal de 120 litros e a sequência de introdução dos materiais na betoneira obedeceu a seguinte ordem:

- a) Com a betoneira ligada, colocou-se a metade da água de amassamento misturada previamente com o aditivo;
- b) Colocou-se toda a quantidade de brita;
- c) Adicionou-se o cimento (Na produção dos concretos contendo as CBC, estas foram previamente misturadas com o cimento);
- d) Colocou-se a areia;
- e) O restante da água foi acrescentado;
- f) Após todos os materiais serem colocados na betoneira, esta permaneceu em movimento por 5 minutos;
- g) O concreto fresco foi descarregado diretamente no carrinho de

mão, previamente lubrificado com água, para que não absorvesse a água de amassamento;

No concreto fresco foi realizado apenas o ensaio do abatimento do tronco de cone segundo a NBR NM 67 [18].

Para atender os ensaios, foram confeccionados ao todo 13 corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura para cada adição de CBC e para o concreto padrão, totalizando 130 amostras. Sendo 6 para ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias, 3 para ensaios de absorção por imersão, índice de vazios, porosidade total e massa específica real. Os 4 corpos de prova remanescentes foram considerados extras.

Após 24 horas em repouso as amostras foram desmoldadas e

Figura 2 – Curva granulométrica da areia

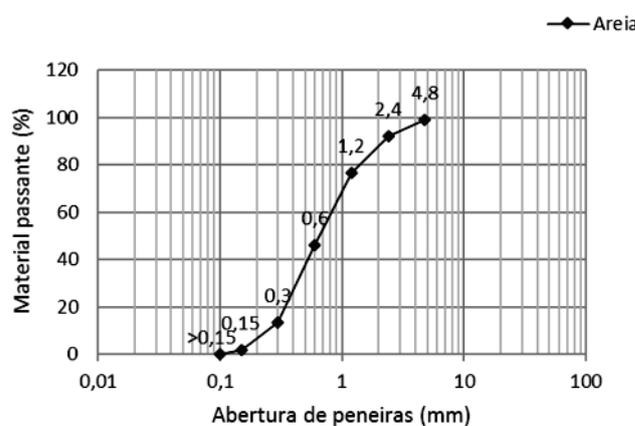
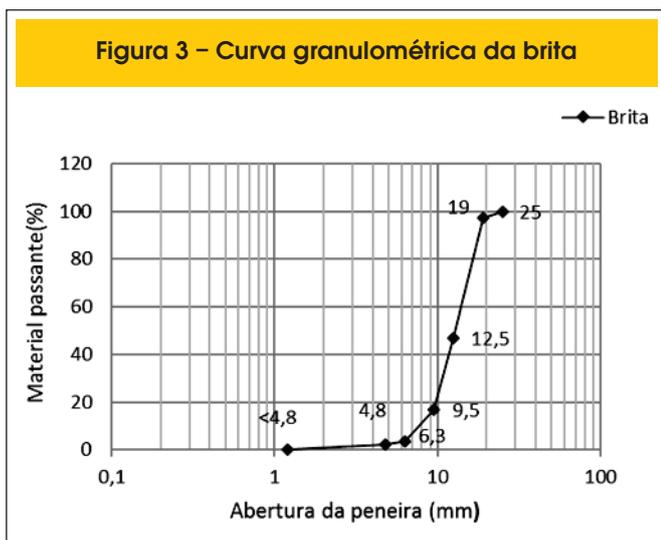


Figura 3 – Curva granulométrica da brita



submetidas ao processo de cura por imersão (NBR 5738 [19]) de 7 a 28 dias, em consequência do tipo de ensaio. Aos 28 dias de cura úmida, foram realizados ensaios de absorção por imersão, índice de vazios, porosidade total e massa específica real segundo a NBR 9778 [20] para cada traço fabricado.

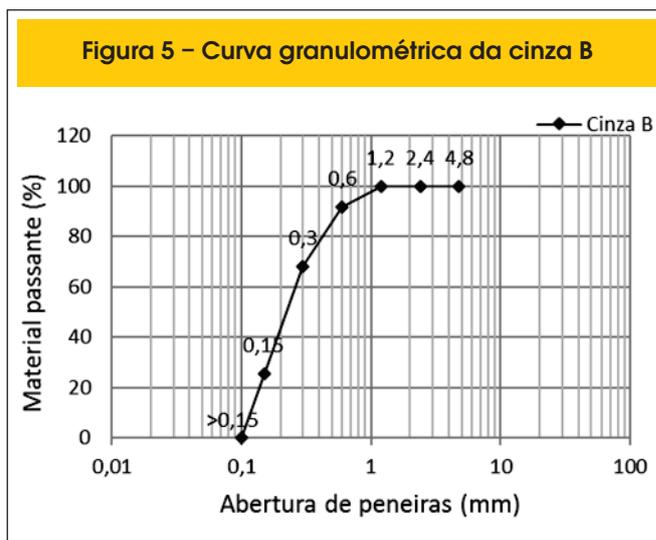
O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 7 e 28 dias, segundo a prescrição da norma NBR 5739 [21]. Os corpos de prova passaram previamente por um processo de capeamento com enxofre, com o objetivo de regularizar a superfície de carregamento das amostras e assegurar uma maior confiabilidade nos resultados do ensaio.

3. Resultados e discussões

3.1 Cimento

A finura do cimento encontrada foi de 2,6% e com um fator água cimento de 0,338 obteve-se uma pasta de consistência normal, dentro dos parâmetros estipulados pela norma. O início de pega

Figura 5 – Curva granulométrica da cinza B



se deu após duas horas do começo do ensaio, a expansibilidade foi de 1 mm e a resistência aos 28 dias foi de 33 MPa. Os valores obtidos na caracterização do cimento atenderam as especificações das normas para o cimento Portland do tipo CP II 32 Z RS.

3.2 Agregados

De acordo com a composição granulométrica apresentada na Figura 2 obteve-se um módulo de finura de 2,71 e um diâmetro máximo de 4,8 mm, classificando esta como sendo areia de granulometria média. A massa específica real e unitária encontrada foi de 2,61 kg/dm³ e 1,46 kg/dm³ respectivamente.

Com a composição granulométrica da Figura 3, foi possível classificar a brita como sendo 19 mm com um módulo de finura de 6,73. A massa específica foi 2,71kg/dm³ e a Unitária 1,55 kg/dm³.

É importante destacar que os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados atenderam perfeitamente às normas e são considerados satisfatórios para a produção de concretos de boa qualidade.

Figura 4 – Curva granulométrica da cinza A

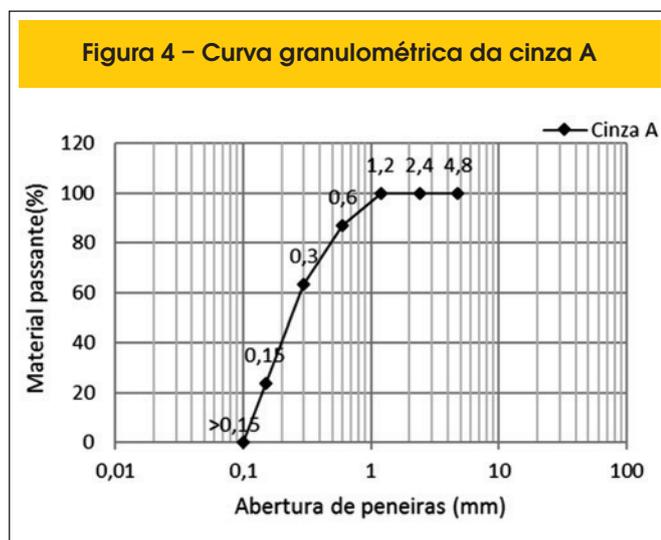


Figura 6 – Curva granulométrica da cinza C

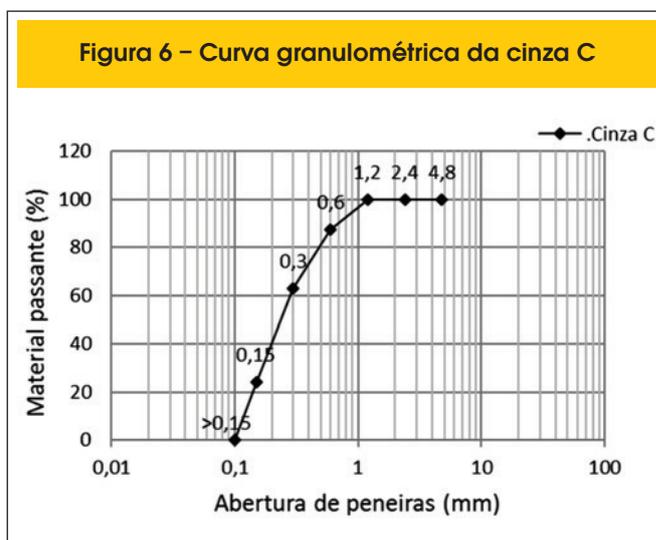


Tabela 3 - Características granulométricas e massas específicas das variedades de cinzas

	Cinza A	Cinza B	Cinza C
Diâmetro máximo (mm)	1,2	1,2	1,2
Módulo de finura	1,25	1,15	1,26
Massa unitária (g/cm ³)	0,75	0,85	0,66
Massa específica real (g/cm ³)	2,30	2,42	2,33

Tabela 4 - Fluorescência de raio-X das CBC

Óxidos	Porcentagens (%)		
	Cinza A	Cinza B	Cinza C
SiO ₂	48,174	47,566	50,013
K ₂ O	20,626	20,345	14,831
Al ₂ O ₃	7,848	9,741	8,301
CaO	7,105	5,811	5,919
MgO	7,039	6,731	5,548
P ₂ O ₅	4,101	4,455	2,463
SO ₃	3,399	3,118	5,522
Fe ₂ O ₃	1,462	1,476	1,961
MnO	0,107	0,125	0,233
TiO ₂	-	0,488	0,581
ZrO ₂	0,067	0,069	0,036
ZnO	0,029	0,022	0,047

3.3 Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBC)

As composições granulométricas das cinzas mostraram-se bem semelhantes entre si, como foi mostrado mediante as Figuras 4, 5 e 6. No entanto, a cinza B apresentou módulo de finura 8% menor em comparação com as outras variedades. Todas elas apresentaram como diâmetro máximo 1,2 mm, como foi mostrado na Tabela 3.

Na curva granulométrica notou-se certa descontinuidade para todas as variedades de cinza, tal fato pode ter sido resultado da combustão incompleta do bagaço. No entanto, foi possível observar que de uma forma abrangente as cinzas, utilizadas neste trabalho, apresentaram granulometrias finas muito semelhantes.

3.4 Massa específica real e massa unitária das CBC

Os resultados apresentados na Tabela 3 mostram que, embora a cinza B tenha apresentado uma massa específica real um pouco maior que a cinza C, a massa unitária desta última foi menor em relação aos demais, portanto, mais leve. A cinza B apresentou uma massa específica real cerca de 5% maior que a cinza A e C e uma massa unitária 13% maior que a C e 29% maior que a cinza A.

Valores semelhantes da tabela foram encontrados por Lima et al., [22] nos seus estudos com a CBC.

3.5 Fluorescência de raios X das CBC

De acordo com a Tabela 4 nota-se que o SiO₂ é o composto predominante das cinzas, com teores de mais ou menos 50% da massa das amostras, seguido de K₂O com teores na faixa de 20%. Os óxidos Al₂O₃, CaO, MgO, P₂O₅, SO₃ e Fe₂O₃ representam cerca de 30% da cinza. Ainda foram constatadas impurezas na forma de ZnO, MnO e ZrO₂ com teores inferiores a 1%. Vale salientar que a composição química da cinza do bagaço pode variar

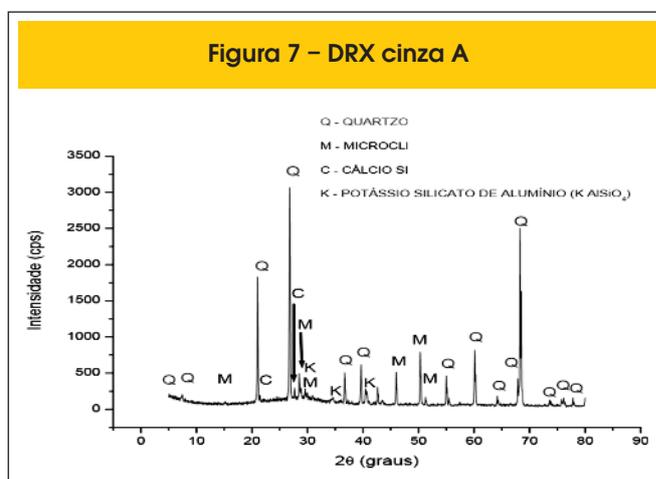
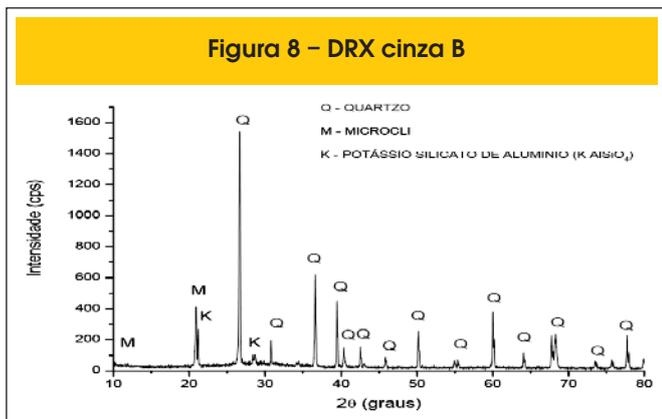
Figura 7 - DRX cinza A


Figura 8 – DRX cinza B



em função do tipo de cana-de-açúcar cultivada, dos fertilizantes e herbicidas, além de fatores naturais, tais como clima, solo e água (CORDEIRO [5]).

O percentual da sílica, obtido no ensaio em questão, foi bem abaixo dos encontrados na literatura (BORJA, et al. [6]). Tal fato pode ser justificado pelo método da colheita da cana-de-açúcar. A empresa responsável pelas CBC afirma que é utilizado o método manual, o que diminui em cerca de 20% a quantidade da areia (SiO₂) misturada à cana. Foram constatados teores acima da média do óxido de potássio em todas as variedades, tal fato pode ter sido ocasionado pelo uso de fertilizantes à base de potássio. Os outros principais óxidos Al₂O₃ e CaO se mostraram dentro da faixa encontrada nas literaturas (MARTINS, C. H.; MACHADO, P H. T. [8]; CORDEIRO, ET AL. [9]; NUNES, I.H.S. ET AL. [10]).

3.6 Difratometria de Raios X das CBC

Os resultados do ensaio de DRX das três variedades de cana estão apresentados nas Figuras 7, 8 e 9.

Os resultados da análise química por DRX apresentados nessas Figuras mostraram vários picos de sílica na forma de quartzo e na forma de cristobalita. Também foi observada a sílica aluminato de potássio, na forma de microclino, para todas as variedades de cinza, o que corrobora com os resultados obtidos no FRX.

O halo entre 2 = 6° e 18° caracteriza a fase amorfa das CBC. Contudo, os gráficos obtidos através deste ensaio demonstraram que as CBC possuíam uma reatividade baixa devido à grande

Figura 9 – DRX cinza C

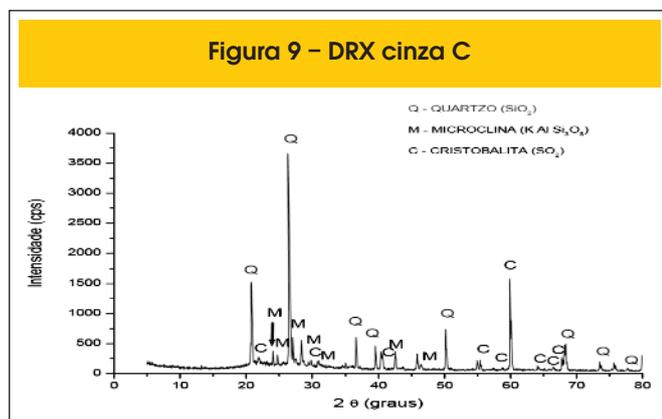
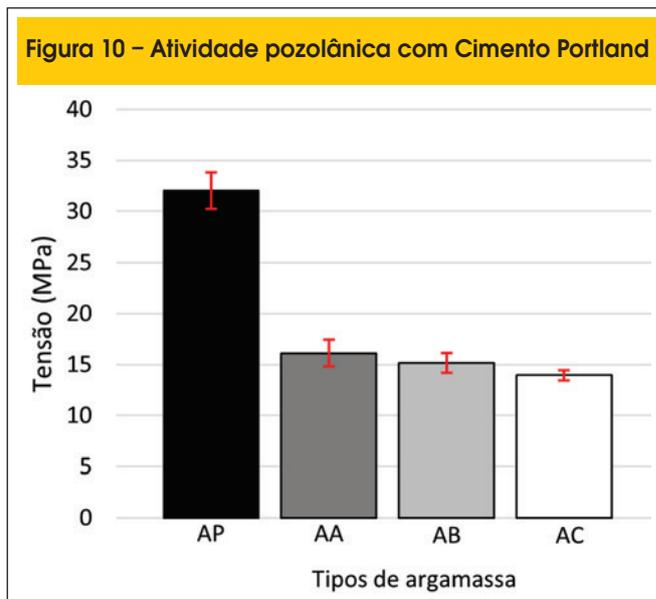


Figura 10 – Atividade pozolânica com Cimento Portland



quantidade de picos de cristalinidade encontrados nos gráficos. Entretanto, é possível observar que a cinza B apresentou picos de cristalinidade de intensidades menores se comparado com as outras amostras. Baseado nos resultados do DRX e na temperatura de queima das cinzas, pode-se afirmar que a queima foi ineficiente resultando em um material bastante cristalino, ou seja, pouco reativo. Esse fato sugere que a influência da adição de CBC no concreto nas diferentes idades, pode estar relacionada à sua menor finura em relação à areia.

3.7 Pozolanicidade das CBC

A norma NBR 5752 [17] estipula que, para que um material seja considerado pozolânico, a resistência à compressão das

Figura 11 – Abatimento do tronco do cone dos concretos

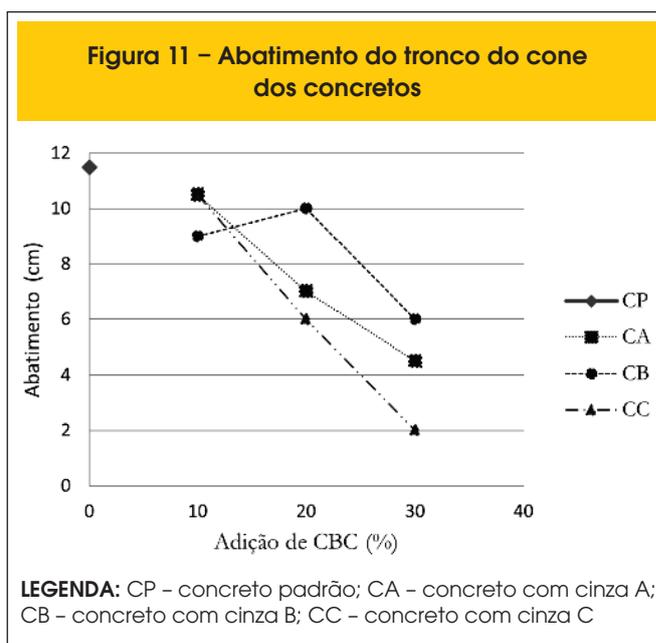
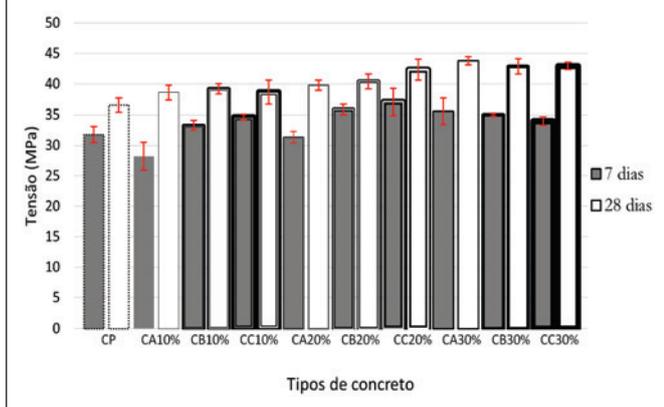


Figura 12 – Resistência à compressão aos 7 e 28 dias do concreto com teores variados de CBC



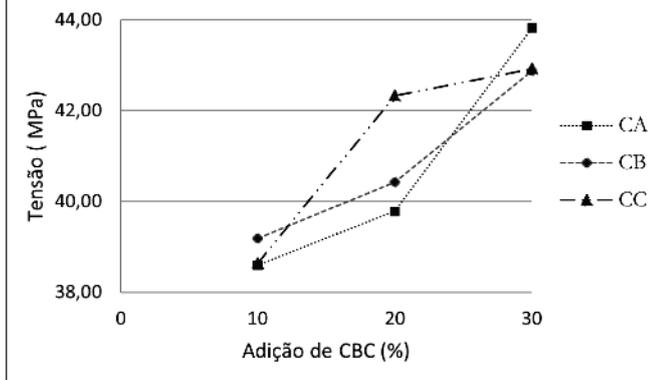
argamassas feitas com o material em substituição parcial ao cimento Portland (isento de Pozolana) deverá ser de no mínimo 75% da resistência da Argamassa Padrão. De acordo com os resultados obtidos na Figura 10, concluiu-se que as cinzas analisadas neste estudo não atendem as exigências da norma de pozolanicidade, já que os valores obtidos não atingiram o limite mínimo que seria de 24,03 MPa. A reduzida atividade pozolânica das cinzas pode ser atribuída à combustão incompleta do bagaço da cana, resultando numa grande quantidade de teor de carbono. Os resultados de DRX demonstraram uma grande quantidade de sílica (SiO₂) cristalina na forma de quartzo, fato esse que tem uma ação direta nos baixos índices de atividade pozolânica encontrados no ensaio previamente citado.

4. Concreto

4.1 Consistência

As alterações no comportamento plástico do concreto estão apre-

Figura 13 – Variação da eficiência do aumento da resistência à compressão aos 28 dias com o aumento dos teores de CBC



sentadas na Figura 11, na qual permite concluir que houve uma queda na trabalhabilidade dos concretos com o aumento dos teores de CBC.

A trabalhabilidade do concreto CA apresentou um comportamento anormal com a adição de 20% de CBC, no qual se observou um ligeiro aumento. No entanto, a trabalhabilidade voltou a diminuir com o aumento do teor de CBC chegando a ser 55,5% menor que o apresentado pelo concreto de padrão (CP). Tanto o concreto CB como o CC mostraram uma redução de quase 10% de trabalhabilidade em relação ao concreto padrão com a adição de 10% de CBC. Contudo, com o aumento dos teores de CBC o concreto CC perdeu mais trabalhabilidade e aos 30% de incorporação foi 475% menor do que o CP, enquanto que o CB foi 155% menor.

A queda brusca na trabalhabilidade é justificável pelo fato de que a CBC, por ser um resíduo com uma granulometria muito fina, absorve bastante água necessária para a manutenção da consistência do concreto, deixando este mais seco e por consequência menos trabalhável. Apesar disso, os valores obtidos ainda se enquadram dentro da faixa aceitável pela norma NBR 6118 [23].

4.2 Resistência à compressão

Os corpos-de-prova referentes ao ensaio de resistência à compressão foram rompidos aos 7 e 28 dias e os resultados estão apresentados na Figura 12. Os valores mostrados na Figura são evidentes, o concreto CA30%, embora não tenha mostrado um grande aumento de resistência aos 7 dias, apresentou aos 28 dias um melhor desempenho em relação aos demais, atingindo uma resistência à compressão de 43,82 MPa, cerca de 20% maior que o CP.

O concreto CC20% mostrou-se bastante eficiente no aumento da resistência na idade de 7 dias atingindo uma resistência de 37,07 MPa, o que corresponde a quase 17% a mais do que CP com 31,76 MPa.

Os resultados ainda mostraram que quase todos os concretos com adição de CBC ultrapassaram a resistência do CP aos 7 dias,

Figura 14 – Massa específica real dos concretos com teores variados de CBC aos 28 dias

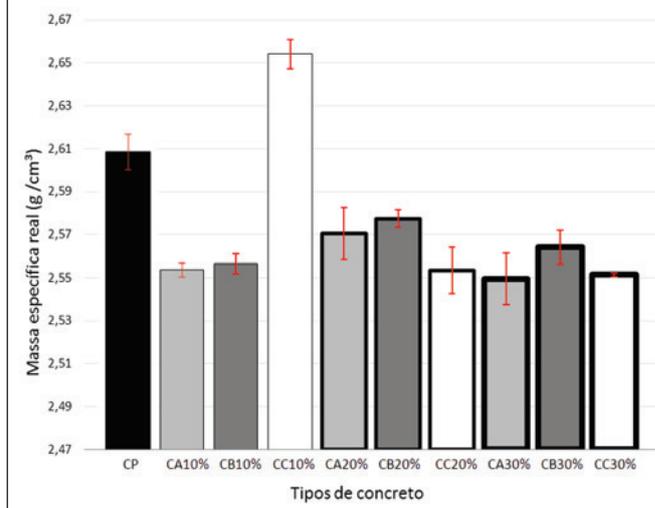
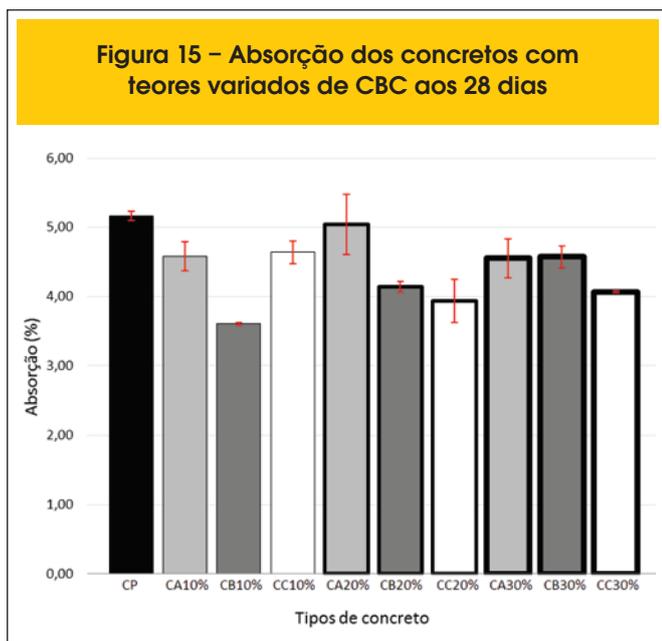


Figura 15 – Absorção dos concretos com teores variados de CBC aos 28 dias



com exceção do CA10% e CA20%, os quais apresentaram uma resistência um pouco abaixo do CP. Essas resistências podem ter sido reflexo de uma hidratação lenta dos constituintes da CBC com o cimento Portland.

Entretanto, observou-se uma melhoria nessas resistências aos 28 dias, ultrapassando assim os valores obtidos do CP (36,56 MPa) com mais de 5% (38,6 MPa e 39,79 respectivamente).

Aos 28 dias, observou-se que todos os concretos com CBC mostraram-se bem mais eficientes, em termos de resistência, se comparado com CP com uma vantagem no mínimo de 5%, chegando a atingir um valor máximo de 20%.

Pela Figura 13 é possível averiguar que a resistência dos con-

cretos contendo CBC foi aumentando assim que os teores das adições foram crescendo. O concreto com cinza "A" (CA) embora se tenha mostrado pouco eficiente com 10% de adição (CA10%), como já antes havia sido mencionado, foi ganhando resistência com o incremento dos teores de adição chegando a ultrapassar todos os outros com 30% de adição (CA30%). Ainda pode-se notar na Figura que a CB e CC tiveram quase a mesma resistência com 10% de adição e com 30% de adição (CB10% e CC30%), porém, houve uma diferença significativa entre eles com 20% de adição (CB20% e CC20%).

O aumento da resistência com adição das CBC pode ser explicado pelo "efeito filler", como várias bibliografias têm demonstrado (BORJA, ETAL.; CORDEIRO, G. C. [5]) e os resultados obtidos no ensaio de granulometria das cinzas corroboram essa afirmação, visto que se observou um grande volume de partículas finas.

4.3 Ensaio da massa específica real

De acordo com a Figura 14, a adição das CBC provocou uma variação quase insignificante em termos de massa específica real do concreto.

4.4 Absorção, índice de vazios e porosidade total

Os gráficos expostos nas Figuras 15, 16 e 17 demonstraram uma redução no índice de vazios, na absorção e na porosidade total em relação ao CP para todos os teores de adição da CBC.

O concreto CA10% apresentou uma diminuição de aproximadamente 13% do índice de vazios em relação ao CP. Mas, com o aumento da adição, houve um ligeiro acréscimo no CA20%. Já no CA30% o índice de vazios voltou a diminuir, aproximando-se do valor do CA10%. O concreto CB10% teve uma redução maior na absorção, chegando a ser 43% menor do que o CP. Contudo, essa diferença foi reduzindo com o aumento dos teores de CBC fechando com 13% de diferença no CB30%. O valor da porosidade do concreto

Figura 16 – Índice de vazios dos concretos com teores variados de CBC aos 28 dias

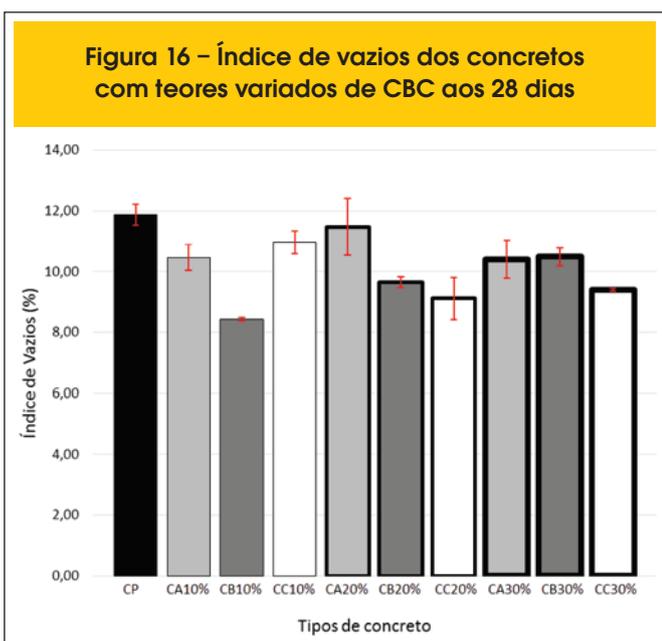


Figura 17 – Porosidade do concreto com teores variados de CBC aos 28 dias

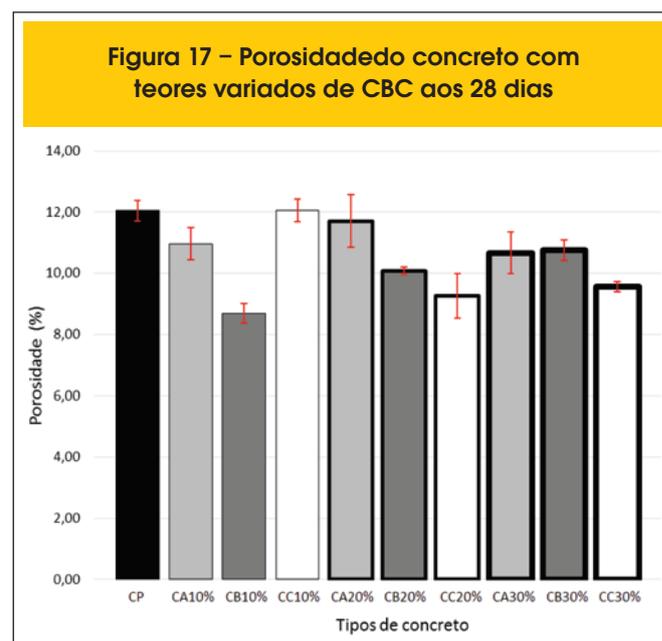


Tabela 5 – Resistência à compressão das argamassas com as cinzas

Amostra	Tensão (MPa)	Coefficiente de variação (%)	Porcentagem em relação a A.P (%)
AP	32,04	5,56	–
AA	16,13	8,26	5,34
AB	15,15	6,33	47,28
AC	13,96	3,58	43,57

LEGENDA: AP – argamassa padrão; AA – argamassa com cinza A; AB – argamassa com cinza B; AC – argamassa com cinza C

CC10% foi 11% menor que o CP e essa diferença foi aumentando com o aumento dos teores de CBC chegando a ser 26% menor que o CP no concreto CC30%.

A grande redução da porosidade, absorção e índice de vazios, resultando num aumento de compactidade para todos os concretos contendo CBC, pode ser também explicada pelo efeito filler. Tal fato, já era esperado, devido ao grande aumento na resistência à compressão previamente apresentados. A Tabela 6 mostra todos os resultados das principais propriedades que influenciam no comportamento plástico e mecânico dos concretos com adição de CBC obtidos neste trabalho.

De um modo geral, pode-se afirmar que a granulometria fina das CBC aumentou a absorção de água no concreto. A combustão ineficiente da queima à temperatura de 900 °C teve como consequência uma diminuição da reatividade das cinzas, mostradas nos ensaios de pozolanicidade e DRX. O diâmetro reduzido da CBC resultou em um preenchimento dos poros da matriz cimentícia pelos grãos da CBC. Com o aumento dos teores de incorporação e com a ajuda do efeito filler, obteve-se uma melhor compactidade do produto final, tornando o concreto mais resistente.

5. Conclusões

As análises realizadas neste estudo demonstraram que a incorporação da CBC no concreto diminui a plasticidade. Esta redução é mais significativa com o aumento dos teores de incorporação

devido a maior quantidade de finos, que resultam num maior consumo de água.

A incorporação da CBC no concreto aumenta a resistência à compressão pelo efeito filler e o incremento dessa resistência é maior com o aumento dos teores de adição da CBC. Os concretos apresentaram uma redução de no mínimo 10% nas propriedades relacionadas à permeabilidade, e observou-se que mantendo os teores de incorporação em até 30% pode-se aumentar a durabilidade, pois diminui a porosidade total, a absorção, o índice de vazios e aumenta a resistência.

As variedades da CBC influenciaram a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas dos concretos. Observou-se uma alteração na consistência e nos valores de resistência, porosidade, índice de vazios e absorção com a variação dos tipos de CBC. O uso da CBC em adição ao concreto se mostrou uma opção bastante viável na melhoria das propriedades mecânicas do concreto. Podendo ser utilizado em pré-moldados, pisos e obras de construção civil em geral, além de possibilitar uma destinação adequada ao subproduto agro-industrial.

6. Agradecimentos

Principais agradecimentos às seguintes instituições e pessoas, sem as quais o presente trabalho teria sido impossível.

Ao Programa de Pós graduação em Engenharia Civil (PEC-UFRN) pela receptividade, apoio técnico e administrativo;

Tabela 6 – Resultados das principais propriedades que influenciam no comportamento mecânico dos concretos com adição das variedades de CBC

Tipo de concreto	Abatimento (mm)	Absorção (%)	C.V (%)	Índice de vazios (%)	C.V (%)	Porosidade total (%)	C.V (%)	Massa específica real (g/cm ³)	C.V (%)	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	C.V (%)
CP	11,5	5,16	1,28	11,87	2,91	12,05	2,77	2,60	0,32	36,56	1,13
CA10%	10,5	4,58	4,49	10,47	4,14	10,96	4,85	2,55	0,13	38,60	1,23
CA20%	7	5,04	8,66	11,47	8,09	11,70	7,35	2,57	0,47	39,79	0,85
CA30%	4,5	4,55	6,22	10,40	6,00	10,67	6,38	2,55	0,47	43,82	1,95
CB10%	9	3,60	0,62	8,44	0,73	8,68	3,84	2,56	0,18	39,19	0,10
CB20%	10	4,14	1,85	9,64	1,81	10,08	1,25	2,58	0,16	40,42	1,20
CC30%	6	4,57	3,46	10,49	2,82	10,75	3,06	2,56	0,31	42,89	1,69
CC10%	10,5	4,64	3,58	10,96	3,42	10,90	2,99	2,65	0,26	38,64	0,67
CC20%	6	3,93	7,95	9,12	7,6	9,26	7,83	2,55	0,42	42,34	1,22
CC30%	2	4,07	9,38	9,40	0,42	9,55	1,79	2,55	0,03	42,93	0,58

Ao Programa de Pós Graduação em Ciencia dos Materiais (PPG-CEM/CCET) pela disponibilidade de equipamentos;

Aos Técnicos Francisco de A. Braz e Sandro R. S. Andrade pela incessante colaboração.

7. Referências bibliográficas

- [01] NEVILLE, A. (1997) Propriedades do concreto. São Paulo: PINI. 1997.
- [02] PRUDÊNCIO Jr., et al. (2003). Cinza da casca de arroz. In: Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, coleção Habitare, v.4, Porto Alegre: ANTAC
- [03] PAULA, M. O. de; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N. S.; SOUZA, C. F. (2009). Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. Available in: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v13n3/v13n03a19.pdf>>. Accessed on 23 Oct. 2012.
- [04] FIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. Available in: <<<http://www.wwww.fiesp.com.br/>>> Accessed on 26 Aug. 2011.
- [05] CORDEIRO, G. C. Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- [06] BORJA, Edilberto Vitorino de. (2011) Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis. Tese de Doutorado, 2011. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [07] 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. chap.6, p.145-190.
- [08] MARTINS, C. H.; MACHADO, P. H. T. Estudo da utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em argamassas e concretos. In: ECMEC2010- Encontro Nacional de Materiais e Estruturas compósitas, 2010, Porto. Anais do ECMEC 2010. Porto: Editora da Universidade do Porto.
- [09] CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Use of Ultra-Fine Sugar Cane Bagasse Ash as Mineral Admixture for Concrete. ACI Materials Journal, v. 105, n. 5, p. 487-493, 2008.
- [10] NUNES, I.H.S.; VANDERLEI, R.D.; SECCHI, M.; ABE, M.A.P. Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção. Revista Tecnológica, v. 17, p. 39-48, 2008.
- [11] SANTOS, S. Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006, 267p.
- [12] MAPA. Available in: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>Accessed on 08 Aug. 2012.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752:2012: Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 2012.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009
- [22] LIMA, S. A.; SALES, A.; MORETTI, J. P.; ALMEIDA, F. C. R.; SANTOS, T. J. (2010). Caracterização de concretos confeccionados com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Tema Caracterização de Materiais. CINPAR 2010 – VI Congresso Internacional sobre patologia e reabilitação de estruturas. Córdoba, Argentina: 2, 3 e 4 de Jun. de 2010.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.
- [24] AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA: Available in:<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_42_1110200717570.html> Accessed on 08 Aug. 2012.