

Setting process on mortars containing sugarcane bagasse ash

Pega em argamassas com cinzas do bagaço da cana-de-açúcar

E. CÂMARA^a
everlei@unipar.br

R. C. A. PINTO^b
r.pinto@ufsc.br

J. C. ROCHA^b
janaide.rocha@ufsc.br

Abstract

This paper presents an experimental study of the effect of partially replace of fine aggregate by sugarcane bagasse ash (CBA) in mortar mixtures in cement reactivity at early ages. The setting times and the initial development of the ultrasonic velocity for mortars produced at various water/cement ratios were evaluated. The objective of this study was to characterize the effects of the partial replacement of fine aggregate by sugarcane bagasse ash in the initial process of cement hydration. Therefore, the CBA used in this study went through different beneficiation processes, by grinding, reburning and sieving, with the objective of improve its features. The results suggest the viability of CBA use to accelerate cement hydration at early ages, with also an observed higher compressive strength.

Keywords: sugarcane bagasse ash, mortar, ultrasound, sustainability.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo experimental do efeito da utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em substituição parcial do agregado miúdo em misturas de argamassa na reatividade do cimento em idades iniciais, avaliando-se os tempos de pega de misturas de argamassa com variadas relações água/cimento, assim como o desenvolvimento inicial da velocidade dos pulsos ultrassônicos. O objetivo deste trabalho é a caracterização dos efeitos da substituição parcial de agregados miúdos por cinzas do bagaço da cana-de-açúcar no processo inicial da hidratação do cimento. Para tanto, a CBC utilizada neste estudo passou por diferentes processos de beneficiamento, através de moagem, requeima e peneiramento, com o objetivo de melhorar suas características. Os resultados do estudo sugerem a viabilidade do uso de CBC em misturas cimentícias, para aceleração da hidratação nas primeiras idades e maiores resistências à compressão ao longo do tempo.

Palavras-chave: cinza do bagaço da cana-de-açúcar, argamassa, ultrassom, sustentabilidade.

^a Departamento de Engenharia Civil, Universidade Paranaense, Umuarama, PR, Brasil;

^b Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

1. Introdução

A produção de cana-de-açúcar é uma das principais atividades agrícolas no mundo. Um dos subprodutos da indústria da cana-de-açúcar é o bagaço da cana. O bagaço é queimado para gerar energia elétrica, tornando a indústria sucroalcooleira autossustentável energeticamente. Esta queima gera cinzas de bagaço da cana-de-açúcar (CBC), um material rico em sílica, com potencial de atividade pozolânica e de efeito de preenchimento em misturas de concreto e argamassa. A quantidade destas cinzas produzidas tem aumentado significativamente nos últimos anos e deverá seguir esta tendência devido à expansão da produção de álcool combustível. O seu uso como substituição parcial do cimento, ou do agregado miúdo em misturas de concreto, reduz o impacto ambiental causado pela mineração de rochas, ou pela extração de areia em suas jazidas e leitos de rios, diminui as emissões de CO₂ e despejos de resíduos, assim como, reduz o impacto ambiental devido ao descarte incorreto das cinzas nas lavouras ou locais inapropriados. É comum a prática de eliminação de CBC nas plantações de cana-de-açúcar como fertilizante, sendo que os produtores afirmam que este processo é capaz de dar destino a todos os resíduos dentro da própria cadeia de produção. Embora tratada como uma iniciativa ambientalmente correta, esta prática ignora o uso de agrotóxicos nas plantações e permanência destes produtos no solo [1].

Vários trabalhos sobre utilização de CBC em misturas de concreto estão voltados para a substituição parcial do cimento nas misturas [2 - 5]. A CBC é beneficiada através de processos de requeima e moagem, para eliminação de material orgânico e aumento da quantidade de finos, com o intuito de melhorar a atividade pozolânica. Entretanto, alguns pesquisadores [6 - 8] relatam que a CBC é um material de baixa atividade pozolânica, com índices de pozolanicidade inferiores aos valores mínimos exigidos por normas, com quantidade elevada de matéria orgânica, queimada em condições não controladas e a temperaturas muito elevadas, indicando que o seu uso pode ser mais adequado como material substituto da areia em misturas de concreto. Cordeiro et al. [9] produziram cinzas ultrafinas para substituição de parte do cimento em misturas de concreto de alto desempenho, conseguindo melhores propriedades reológicas e baixa penetração de íons cloreto, sem redução da resistência. Tantawy et al. [10] queimaram CBC por 3 horas em forno mufla a 700°C, e sua utilização em misturas de argamassa proporcionou redução do tempo de pega e menor porosidade devido ao efeito pozolânico da cinza. Frías et al. [11] avaliaram a queima do bagaço em dois patamares de temperatura controlada, sendo o primeiro a uma temperatura de 400°C por 20 minutos, e um segundo patamar de 800°C por 60 minutos. Também com dois patamares de temperatura, Cordeiro et al. [12] identificaram que as temperaturas que apresentaram melhores resultados de pozolanicidade foi a queima por três horas a 350°C seguida por outras três horas a 600°C.

Figura 1 – Restos de bagaço retidos na peneira de 2,0 mm



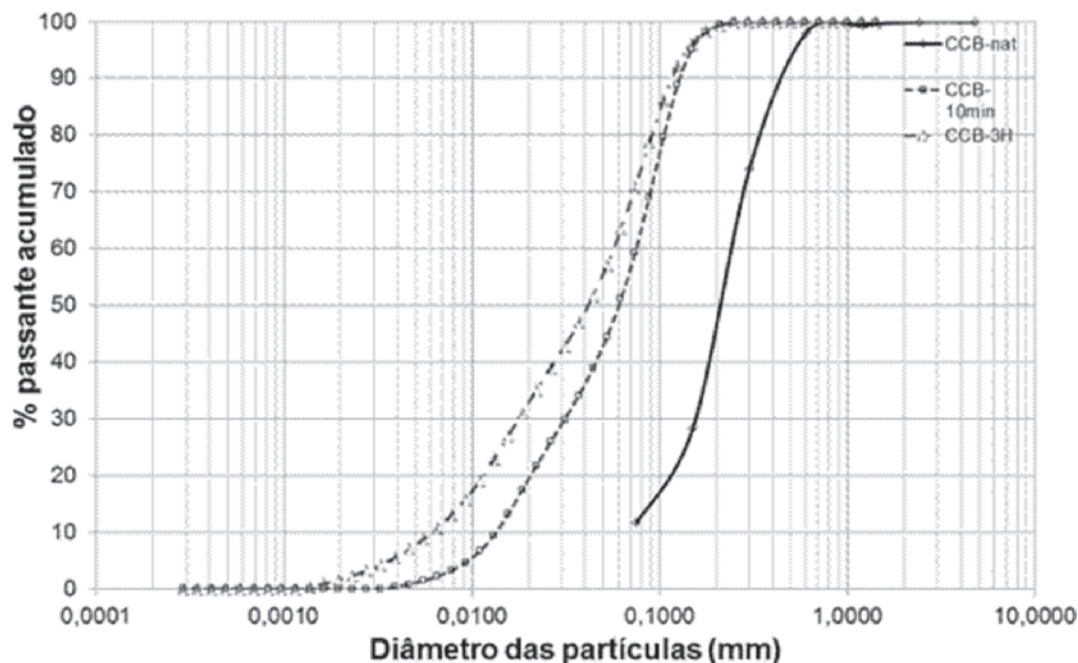
Independente do processo de beneficiamento, devido a sua granulometria final, a CBC pode alterar a taxa de hidratação do cimento nas idades iniciais, devido ao efeito físico de compactidade influenciando no empacotamento da mistura, preenchendo os vazios entre as partículas de cimento [13], o que interfere no processo de endurecimento da mistura de concreto nas primeiras idades. Este processo de endurecimento é um parâmetro importante para definição dos tempos de transporte, execução da vibração da mistura, da remoção de formas e escoramentos, da execução de acabamentos superficiais, entre outras atividades construtivas. Um possível efeito acelerador poderá trazer benefícios para obras da construção civil, principalmente ao que se refere a prazos e cronogramas apertados.

Os processos de hidratação e de formação da microestrutura influenciam diretamente as características físicas, mecânicas e funcionais de concretos e argamassas [14]. Pode-se avaliar a taxa de hidratação de forma indireta utilizando-se os tempos de pega da mistura. Entende-se como início e final de pega os tempos decorridos para a passagem do material do estado fluido para o estado sólido, e começo do ganho de resistência, respectivamente [15]. O método utilizado para a definição destes tempos, como descrito pela norma ASTM C403 [16], consiste na medição da resistência à penetração ao longo do tempo em misturas de argamassa ou argamassa de concreto peneirado. De acordo com Liu et al. [17] este método não é adequado para aplicação em campo. Uma alternativa

Tabela 1 – Nomenclatura adotada para os diferentes tratamentos das cinzas

CBC - 10m	CBC - 3h	CBC - R
Cinzas moídas em moinho de bolas durante 10 minutos	Cinzas moídas em moinho de bolas durante 3 horas	Cinzas Requeimadas por 3 horas a 300 °C + 3 horas a 600 °C

Figura 2 – Granulometrias da CBC *in natura*, CBC-10m e CBC-3h



de monitoramento contínuo nas primeiras idades é a aplicação de ondas ultrassônicas, como explorado em diversos estudos [15, 18 - 20]. O desenvolvimento da velocidade do pulso ultrassônico, VPU, em um material está diretamente relacionado ao desenvolvimento da microestrutura. Ondas mecânicas, como a de ultrassom, trafegam mais rapidamente em materiais mais rígidos.

Sendo assim, este trabalho avalia as características apresentadas por argamassas nas idades iniciais, produzidas com substituição parcial de agregados miúdos por CBC. Para tanto, três misturas de argamassa com relações água/cimento de 0,44, 0,48 e 0,52 foram testadas com a utilização de três diferentes tratamentos realizados com a CBC: moagem em moinho de bolas por 03 horas; moagem em moinho de bolas por 10 minutos; e requeima por três horas a 300°C seguida de outras três horas a 600°C. Os tempos de pega e o desenvolvimento da velocidade ultrassônica nas primeiras 24 horas destas misturas foram comparados com os de argamassas de referência, produzidas sem CBC. A CBC utilizada era proveniente da maior usina sucroalcooleira do estado do Paraná, com capacidade de produção de 4.000.000 de toneladas de cana por safra para produção de álcool e açúcar, estando localizada na região Noroeste do Paraná.

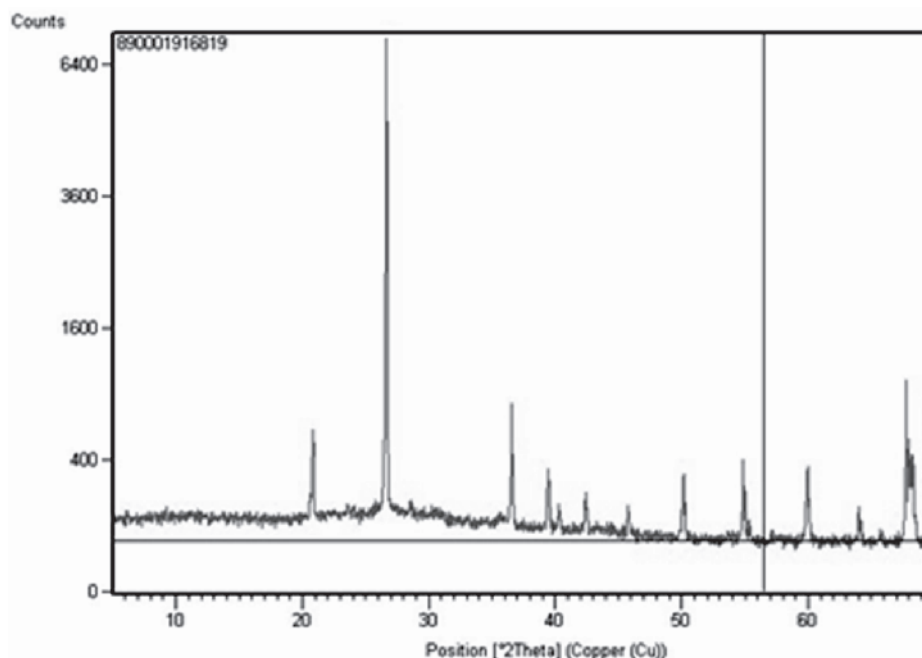
2. Materiais e métodos

2.1 Cinza de bagaço de cana

Inicialmente, a CBC coletada foi seca em estufa a temperatura de aproximadamente 100°C e passou por processo de peneiramento, em peneira com abertura de 2mm, para separação de

Tabela 2 – Composição química da cinza do bagaço da cana-de-açúcar *in natura*

Amostra Concentração	CBC %
Na ₂ O	0,09
MgO	1,63
Al ₂ O ₃	2,53
SiO ₂	76,55
P ₂ O ₅	0,69
SO ₃	0,40
K ₂ O	1,32
CaO	1,20
TiO ₂	0,53
MnO	0,008
Fe ₂ O ₃	2,59
Co ₃ O ₄	0,115
SrO	0,005
ZrO ₂	0,015
Cl	0,027
PF	12,31
Soma	100,00

Figura 3 – Difratoograma de raio-X da CBC *in natura*

restos de bagaço de cana que não sofreram combustão completa (Figura 01).

Em seguida, utilizou-se dois tempos de moagem diferentes em moinho de bolas: 10 minutos e três horas. A moagem curta, por 10 minutos, foi somente para homogeneizar a CBC, enquanto que a moagem longa, por 03 horas, foi utilizada para cominuir o material, tornando-o mais fino. Um terceiro tratamento foi adicionado, onde a CBC passou por processo de requeima, baseado no estudo de Cordeiro et al. [12], sendo queimada por três horas em forno mufla em temperatura de 300°C seguida de outras três horas em temperatura de 600°C. A Tabela 1 apresenta a nomenclatura adotada neste trabalho para os diferentes tratamentos de CBC.

A Figura 2 apresenta a granulometria da CBC antes da execução dos tratamentos de moagem e requeima, em seu estado natural somente peneirada em peneira com abertura de 2mm para separação de restos de bagaço, junto com a granulometria da CBC após a moagem em moinho de bolas por 10 minutos e 3 horas.

A composição química da cinza do bagaço da cana-de-açúcar *in natura*, conforme coletada na usina, está apresentada na Tabela 2,

sendo determinada em análise semiquantitativa por espectrometria de fluorescência de raios-X. Paralelamente foi realizado o ensaio de perda ao fogo (PF) para determinar a porcentagem de outras substâncias não minerais.

De acordo com o resultado apresentado na Tabela 2, 76,55% da cinza do bagaço da cana-de-açúcar coletada é composta por sílica (SiO₂). Quanto à perda ao fogo, o valor encontrado de 12,31% se situa bem acima daquele limitado pela ASTM C 618 [21] (6%) para ser classificada como material pozolânico.

A composição mineralógica dos sólidos presentes na CBC *in natura*, foi determinada pelo ensaio de difração de Raios-X, com os resultados apresentados na Figura 3 e Tabela 3.

A CBC revelou a presença de uma fase altamente cristalina na forma de quartzo (SiO₂), como a presença de uma banda de material amorfo na fase 2 θ de 21 a 32°.

Adicionalmente, foi determinado para a CBC *in natura* o índice

Tabela 3 – Grau de amorficidade da cinza do bagaço da cana-de-açúcar *in natura*

Fases	Fórmula química	(%)
Quartz	SiO ₂	75,1
Grau de amorficidade (%)		24,9

Tabela 4 – Índice de atividade pozolânica da cinza

Resultados	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar
IAP (MPa)	4,3
#325 (%)	1,4
Massa específica (g/cm ³)	2,45
Água de amassamento (g)	215

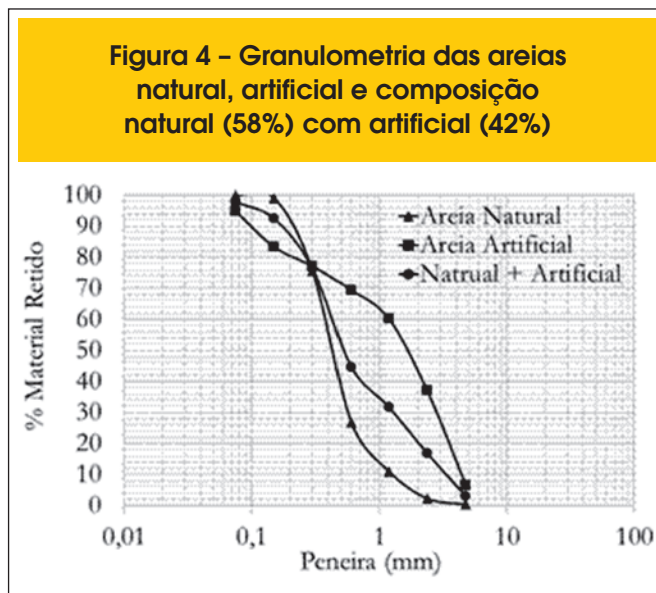
de atividade pozolânica (IAP) de acordo com NBR 12653 [22]. Os resultados apresentados na Tabela 4 indicam que a amostra de cinza ensaiada atingiu um valor de IAP de 4,3 MPa, inferior ao valor de 6,0 MPa indicado pela NBR 12653 [22] para ser considerada como material pozolânico. Já o beneficiamento da CBC apresenta um potencial para desenvolvimento da pozolanicidade, sendo alcançado o desempenho ao cimento de 89,4%, 87,5% e 102,3% para as cinzas CBC-10m, CBC-3h e amostra CBC-R, respectivamente.

2.2 Produção das argamassas

Os agregados finos utilizados, areia natural e artificial, foram preparados de forma que o módulo de finura (MF) fosse classificado na zona ótima de utilização, com MF igual a 2,65, apresentando configuração final de 58% de areia natural e 42% de areia artificial do total de agregados miúdos. A dimensão máxima característica (DMC) ficou em 4,75mm. A Figura 4 apresenta as curvas granulométricas da areia natural, areia artificial e a composição final utilizada (58% natural e 42% artificial).

Inicialmente, três misturas de argamassa de referência (sem adição de CBC) foram produzidas na proporção, em massa, de 1:3 (1 parte de cimento para 3 partes de agregados finos), com relação água cimento de 0,44, 0,48 e 0,52. Na Tabela 5 são apresentados os traços para a produção das diferentes misturas das argamassas de referência. O cimento utilizado foi o CP V ARI e adicionou-se aditivo polifuncional.

Para as argamassas com CBC, de forma a manter as características granulométricas das misturas, somente a proporção fina dos agregados miúdos foi substituída por CBC, já que a CBC possui uma grande quantidade de finos em sua composição. Assim, as areias natural e artificial foram peneiradas com peneira de abertu-



ra de 150µm, sendo utilizado o material retido e descartado o material passante. Os finos das areias, passantes pela abertura de 150µm, totalizou aproximadamente 7,5% da massa, sendo este valor adotado como padrão para a adição das cinzas. A tabela 6 apresenta os traços das misturas de argamassas com CBC.

No total foram confeccionadas 12 diferentes misturas de argamassa, sendo três de referência, e as nove restantes devido a combinação de três relações água cimento (a/c = 0,44; 0,48 e 0,52) dos três diferentes tipos de tratamento da CBC. Cada mistura foi repetida para a execução dos ensaios de pega e de

Tabela 5 - Misturas de argamassas de referência (em massa)

Material	Ref (0,44)	Ref (0,48)	Ref (0,52)
Areia natural	1,74	1,74	1,74
Areia artificial	1,26	1,26	1,26
Cimento	1	1	1
Aditivo polifuncional	0,01	0,01	0,01
Água	0,44	0,48	0,52

Tabela 6 - Misturas de argamassas com CBC (em massa)

Material	CBC (0,44)	CBC (0,48)	CBC (0,52)
Areia natural	1,610	1,610	1,610
Areia artificial	1,166	1,166	1,166
CBC	0,225	0,225	0,225
Cimento	1	1	1
Aditivo polifuncional	0,01	0,01	0,01
Água	0,44	0,48	0,52

Figura 5 – Dispositivo para monitorar velocidades de ondas ultrassônicas de acordo com Irrigaray (20)

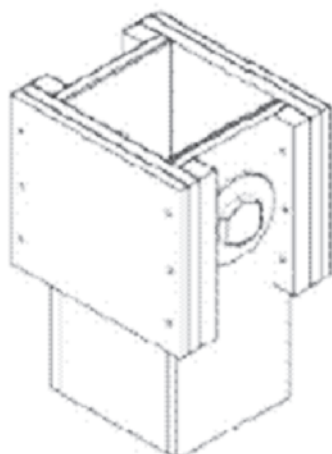
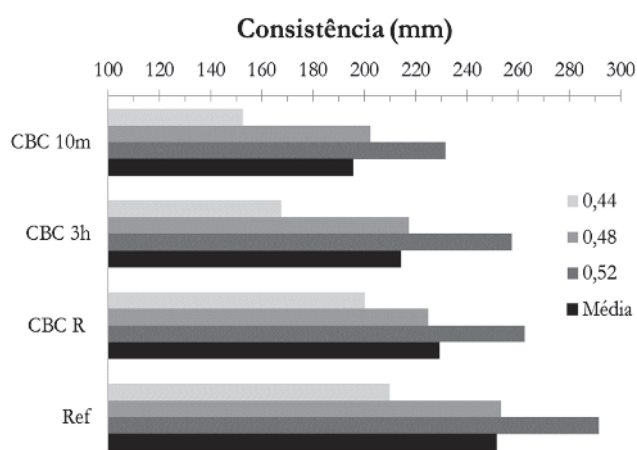


Figura 6 – Índices de consistência para as diferentes misturas de argamassas conforme ASTM C230 (23)



velocidade de pulso ultrassônico totalizando vinte e quatro misturas de argamassa.

2.3 Ensaios experimentais

Inicialmente, logo após a confecção das misturas de argamassa, os índices de consistência das argamassas frescas foram determinados na mesa de consistência, de acordo com a ASTM C230 [23]. Após, foram confeccionados corpos-de-prova cilíndricos de 15x30 cm para ensaio de pega, de 5x10 cm para ensaios a compressão e corpos-de-prova cúbicos de 20 cm de arestas para ensaios de velocidade de pulso ultrassônico. Nos corpos-de-prova para ensaio de pega e de VPU, termopares foram inseridos para o monitoramento das temperaturas iniciais.

O início e fim de pega foram determinados por meio da resistência à penetração, de acordo com a ASTM C403 [16]. Os tempos de início e fim de pega correspondem a valores de resistência à penetração de 3,5 MPa e 27,6 MPa, respectivamente.

Para o monitoramento do desenvolvimento das velocidades de pulso ultrassônico, seguiu-se o procedimento utilizado por Irrigaray [20]. Um dispositivo com estrutura externa em madeira compensada de 20 mm, com 20 cm x 20 cm x 20 cm conforme apresentado na Figura 5 foi utilizado. As faces onde foram posicionados os transdutores de ultrassom são revestidas

Tabela 7 – Tempos de início de pega (I.P.) e fim de pega (F.P.)

Mistura	Mistura (0,44)		Mistura (0,48)		Mistura (0,52)	
	I. P. (h)	F. P. (h)	I. P. (h)	F. P. (h)	I. P. (h)	F. P. (h)
Ref 1	11,2	12,7	9,9	11,6	11,4	13,9
Ref 2	12,0	13,8	12,4	16,0	12,5	15,5
CBC 1 – 10m	7,7	10,5	8,5	11,9	7,5	9,2
CBC 2 – 10m	9,1	11,8	9,4	11,2	9,6	11,9
CBC 1 – 3h	7,8	11,1	9,2	11,7	9,8	11,8
CBC 2 – 3h	8,7	10,7	13,3	16,2	12,5	16,0
CBC 1 – R	8,5	10,3	8,8	10,8	8,9	10,4
CBC 2 – R	9,5	11,5	9,4	11,4	10,0	12,1

Figura 7 - Velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo nas misturas com $a/c = 0,44$

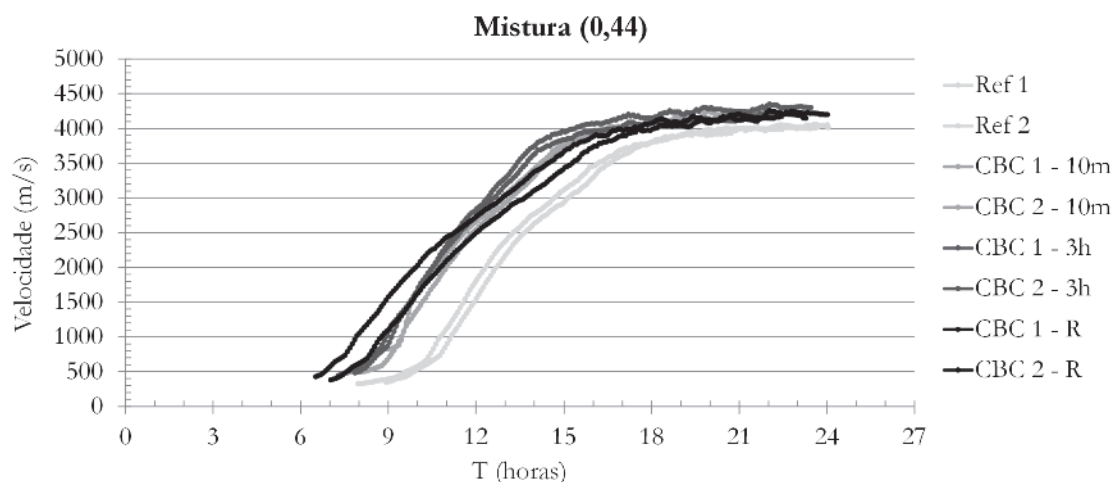


Figura 8 - Velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo nas misturas com $a/c = 0,48$

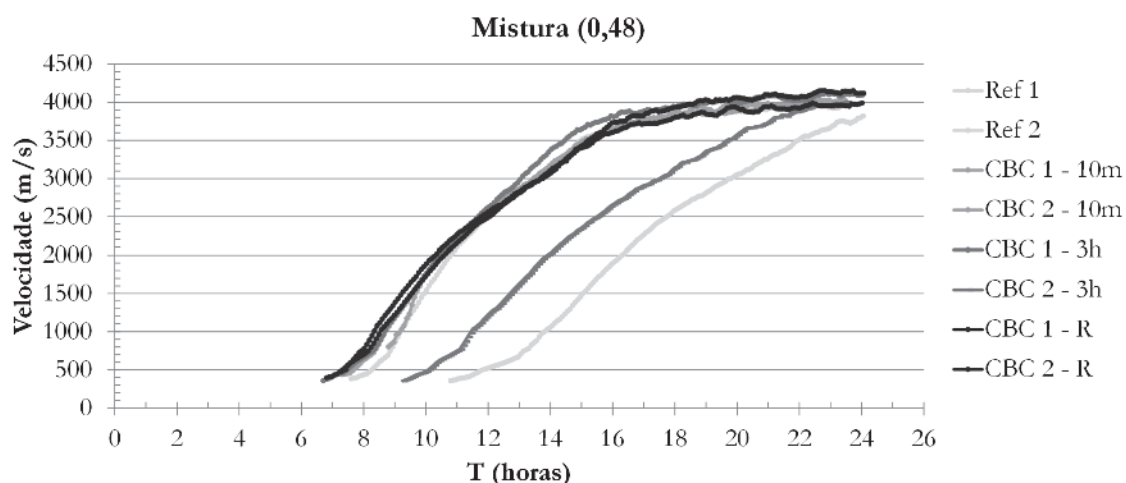


Figura 9 - Velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo nas misturas com $a/c = 0,52$

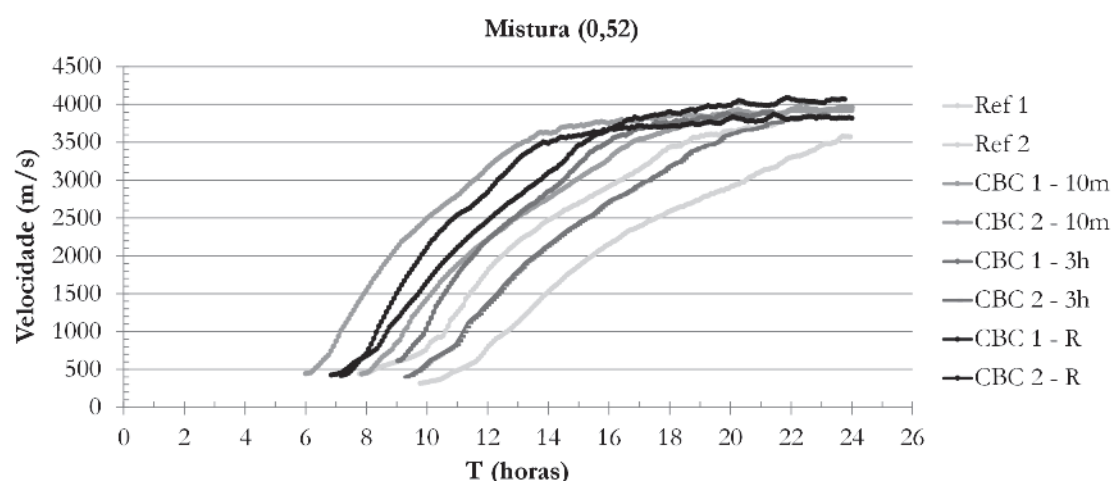


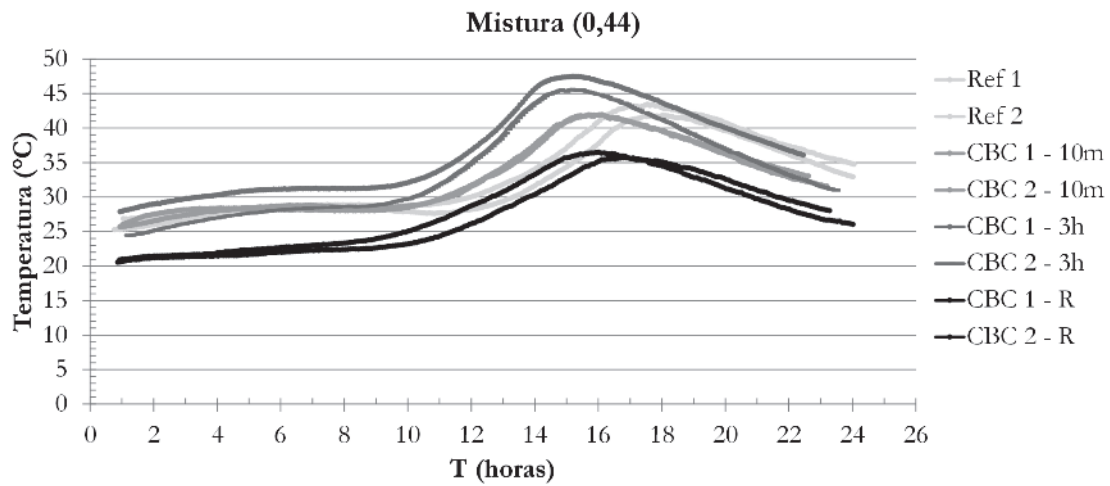
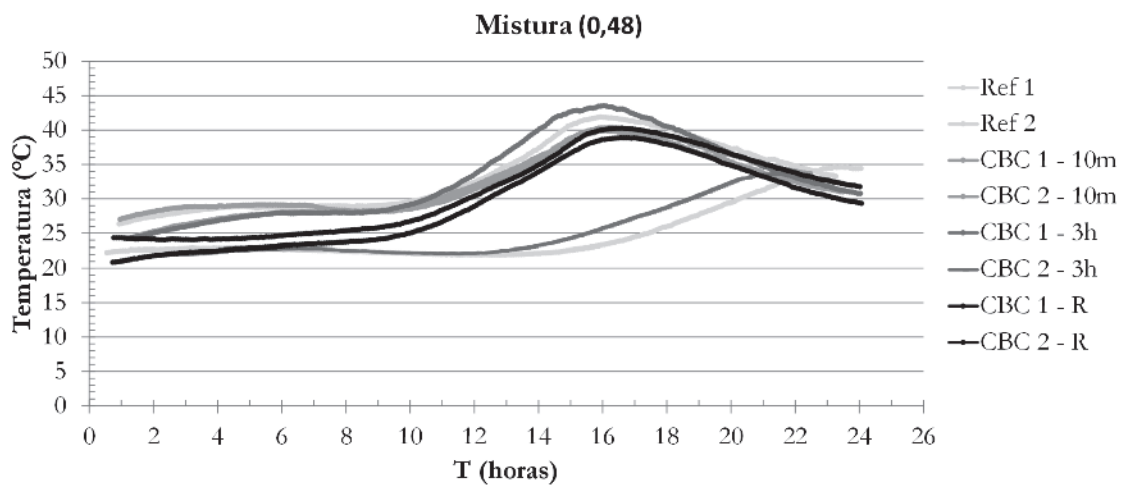
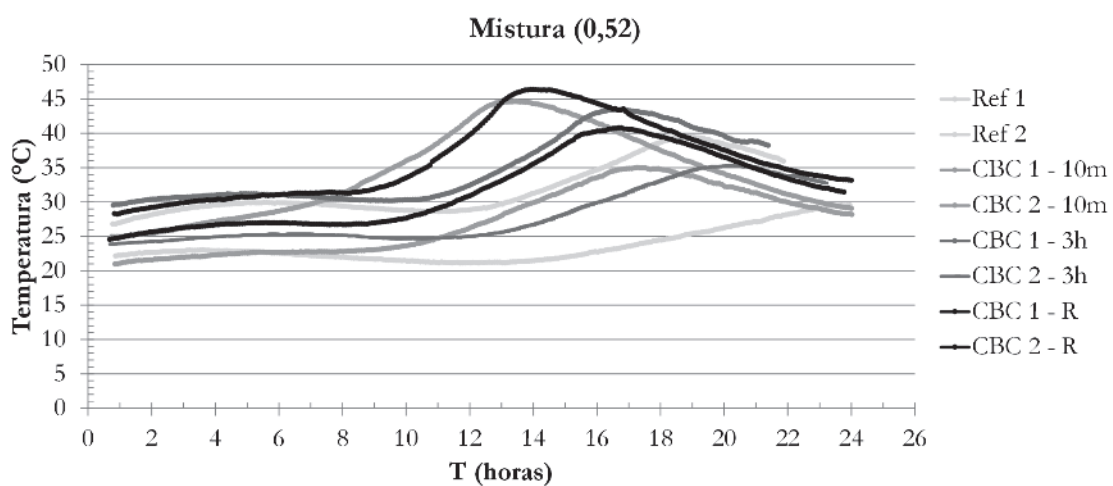
Figura 10 - Temperaturas ao longo do tempo nas misturas de argamassas com $a/c = 0,44$ Figura 11 - Temperaturas ao longo do tempo nas misturas de argamassas com $a/c = 0,48$ Figura 12 - Temperaturas ao longo do tempo nas misturas de argamassas com $a/c = 0,52$ 

Tabela 8 – Resistência à compressão média aos 28 dias das misturas de argamassa

Mistura	Fc 28 dias (MPa)		
	0,44	0,48	0,52
Ref	45,2	43,7	42,2
CBC – 10m	52,1	46,7	43,1
CBC – 3h	53,8	48,4	46,1
CBC – R	54,1	48,8	46,4

internamente por vidro de 6,0 mm de forma a garantir uma perfeita planicidade da superfície. Furos circulares de 50 mm de diâmetro na madeira compensada, a uma distância de 10 cm da base são necessários para o acoplamento dos transdutores utilizados. Transdutores circulares de diâmetro 50 mm e frequência de 54 kHz foram utilizados. Tão logo a argamassa era confeccionada, preenchia-se o dispositivo, acoplavam-se os transdutores e iniciava-se a medição contínua de velocidade de pulso ultrassônico. Os transdutores emitiam pulsos ultrassônicos a intervalos regulares de 5 minutos, os tempos de propagação foram armazenados de forma contínua até a idade aproximada de 24 horas após a confecção da mistura de argamassa.

3. Resultados

Os índices de consistência das argamassas frescas aumentaram com o aumento da relação água/cimento, conforme esperado, tanto para as misturas com CBC como as de referência. A Figura 6 apresenta os resultados obtidos.

A Tabela 7 apresenta os tempos de início e fim de pega (em horas), para as diferentes misturas de argamassas.

Os resultados de velocidade das ondas ultrassônicas ao longo do tempo, obtidos nas diferentes misturas de argamassas, estão apresentadas nas Figuras 7, 8 e 9.

As temperaturas de cada mistura durante as primeiras 24 horas estão apresentadas nas Figuras 10, 11 e 12. A Tabela 8 apresenta os resultados médios de resistência à compressão aos 28 dias das duas misturas para cada tipo de argamassa testada.

4. Análise dos resultados

Os dados de consistência apresentados na Figura 6 indicam que as misturas com substituição parcial do agregado miúdo por CBC com diferentes tratamentos apresentaram índices de consistências menores que as misturas de referência. Entre os tipos de tratamento, indiferente da relação a/c, o processo de requeima, CBC – R, melhor se aproximou da consistência das misturas de referência. Em contrapartida, as misturas com moagem de apenas 10 minutos apresentaram os menores índices de consistência.

Os menores índices de consistência apresentados pelas argamassas com CBC indicam que a cinza possui menor granulometria em relação aos finos presentes nos agregados miúdos. Entretanto, as misturas com CBC – 3h não apresentaram menores índices de consistência do que as com CBC – 10m. A presença de material incombusto confere menor trabalhabilidade das partículas, demandando maior quantidade de água nas misturas. No caso da CBC – 10m, pode-se postular que a moagem não foi o suficiente para cominuir as partículas orgânicas, ocasionando maior atrito entre as partículas e diminuindo a trabalhabilidade da massa. Esta possível ocorrência também explicaria os maiores índices de consistência observados para as misturas CBC – R em relação às outras misturas com cinza. A requeima possibilitaria uma menor quantidade de material orgânico.

Com relação aos ensaios de pega e de velocidade de ultrassom, percebe-se que as misturas não possuíam um mesmo regime de temperatura. Como foram produzidas vinte e quatro misturas de argamassa ao longo de um ano, conforme dados apresentados nas Figuras 10 a 12, a temperatura inicial da mistura variou entre 20°C e 30°C, enquanto a temperatura máxima registrada também sofreu variação de 10°C entre misturas e até mesmo entre uma mesma mistura, como por exemplo as misturas CBC-1 e CBC-2 para a/c de 0,52.

Sabe-se que o endurecimento de misturas cimentícias ocorre em função do tempo e do histórico de temperaturas no qual forem submetidas. Em idades precoces, a temperatura tem grande influência no desenvolvimento da resistência [24]. Sendo assim, de forma a compensar o efeito de temperatura para uma análise mais precisa do efeito das cinzas, funções de maturidade foram utilizadas para transformar idade real em idades equivalentes (te). Para tanto, utilizou-se a função de maturidade proposta por Freisleben-

Tabela 9 – Tempos de início e fim de pega (te à 20°C)

Mistura	Mistura 0,44 (h)				Mistura 0,48 (h)				Mistura 0,52 (h)			
	I. P.	Média	F. P.	Média	I. P.	Média	F. P.	Média	I. P.	Média	F. P.	Média
Ref 1	15,3	15,7	17,6	18,1	13,5	15,7	13,6	16,9	16,1	14,8	19,8	18,3
Ref 2	16,1	15,7	18,7	18,1	13,7	15,7	13,6	16,9	13,5	14,8	16,8	18,3
CBC 1-10m	10,3	11,2	14,1	15,1	11,6	11,2	11,9	15,7	9,7	10,1	12,6	13,0
CBC 2-10m	12,1	11,2	16,1	15,1	12,2	11,2	11,9	15,7	10,5	10,1	13,3	13,0
CBC 1-3h	11,4	11,4	15,0	14,7	11,9	11,4	13,2	16,8	14,0	14,5	17,8	18,8
CBC 2-3h	11,3	11,4	14,4	14,7	14,6	11,4	13,2	16,8	15,0	14,5	19,9	18,8
CBC 1-R	9,2	9,7	11,5	12,0	10,4	9,7	10,5	13,1	13,2	13,0	15,6	15,7
CBC 2-R	10,2	9,7	12,5	12,0	10,6	9,7	10,5	13,1	12,8	13,0	15,9	15,7

-Hansen e Pedersen, como preconizado pela ASTM C 1074 [25] e reproduzida na Equação 1. No uso desta função, há necessidade de se conhecer a dependência da mistura a temperatura dado pela energia de ativação (E_a). Neste trabalho optou-se pelo valor de 30 kJ/mol, valor intermediário aos apresentados em um estudo amplo com diversas misturas [26]. Neste estudo para o cimento americano tipo I sem adições, os valores relatados se situam entre 22 kJ/mol a 37,9 kJ/mol.

$$t_e = \sum e^{-\frac{E_a}{R} \left(\left(\frac{1}{t} \right) - \left(\frac{1}{t_r} \right) \right)} \Delta t \quad (1)$$

onde:

t_e – idade equivalente à da temperatura de referência;

E_a – energia de ativação (J/mol);

R – constante universal dos gases = 8,314 J/mol-K

t – temperatura média da mistura no intervalo Δt ;

t_r – temperatura de referência (20°C);

Δt – intervalo de tempo.

Sendo assim, os tempos de pega apresentados na Tabela 7 foram recalculados a partir do histórico de temperatura de cada mistura, utilizando-se a Equação 1 com energia de ativação de 30 kJ/mol. A tabela 9 apresenta os resultados de início e fim de pega.

Percebe-se que, diferentemente dos dados da Tabela 7, são poucas as variações entre os tempos de início e fim de pega para uma

Figura 13 – Velocidades das ondas ultrassônicas para T_e à 20°C nas misturas com $a/c = 0,44$

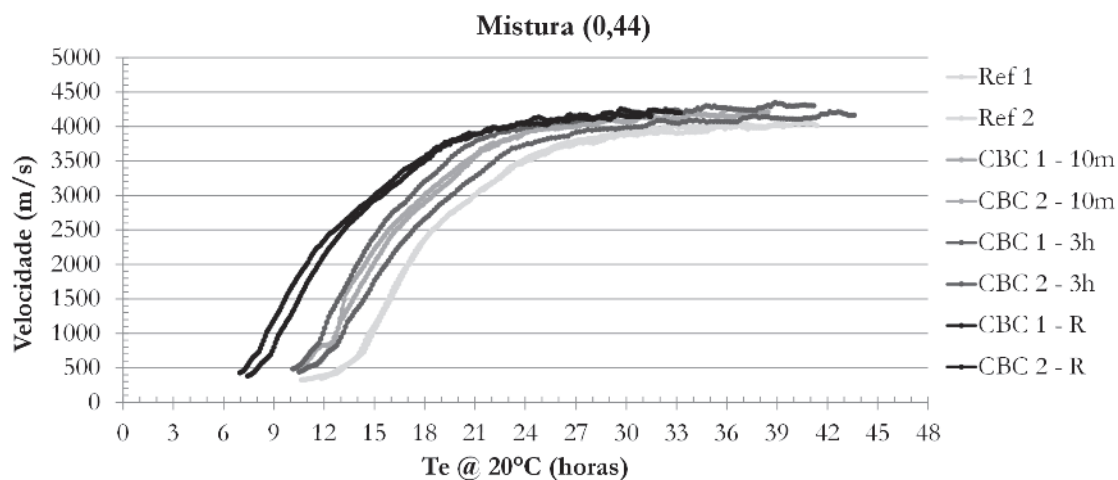


Figura 14 – Velocidades das ondas ultrassônicas para T_e à 20°C nas misturas com $a/c = 0,48$

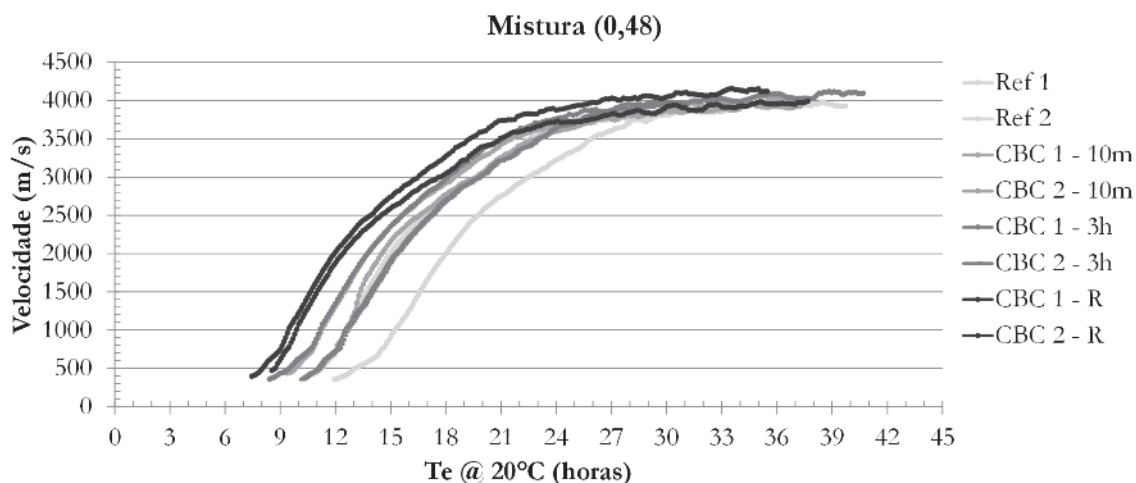
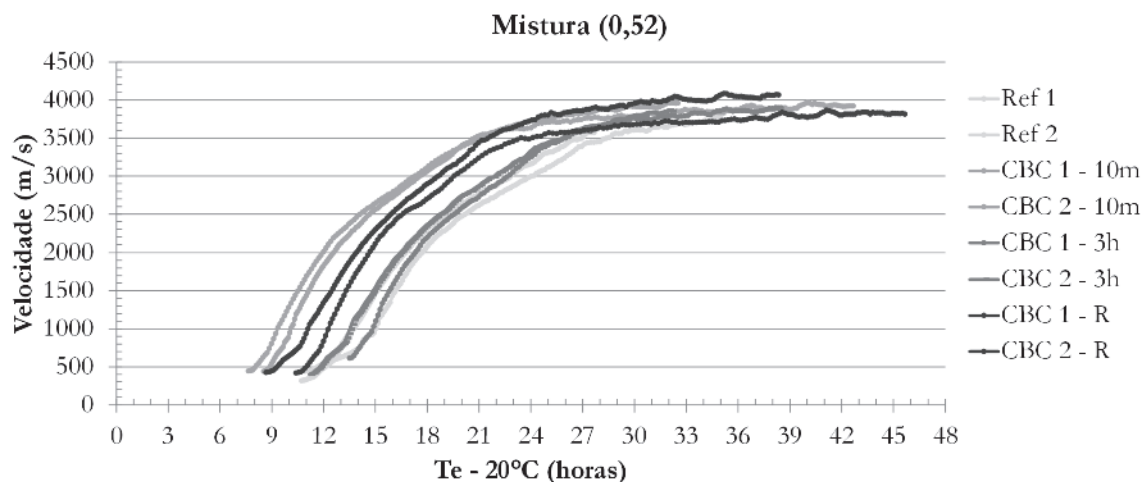


Figura 15 - Velocidades das ondas ultrassônicas para Te à 20°C nas misturas com a/c = 0,52



mesma mistura. Sem a consideração do efeito de temperatura, as misturas com relação água cimento de 0,52 e cinza moída por 10 minutos (CBC-10m, a/c=0,52) apresentaram tempos de início de pega de 7,5 e 9,6 horas, conforme dados da Tabela 7. Por outro lado, considerando o efeito da temperatura estes valores se situaram entre 9,7 e 10,5 horas a 20°C.

Os dados da Tabela 9 indicam que as misturas com cinzas aceleraram a pega já que os tempos de início e fim de pega foram menores que os das misturas de referência, com exceção da mistura CBC - 3h e a/c de 0,48 e 0,52 onde os dados foram similares. Estes resultados demonstram que as cinzas adicionadas nas misturas, independente do tratamento utilizado, tendem a acelerar o endurecimento das argamassas. A requeima da cinza foi o tratamento que resultou em uma maior aceleração. Quanto a relação a/c, de acordo com os resultados apresentados, a tendência é de aumentar o tempo de pega quanto maior a relação utilizada.

De forma similar aos tempos de pega, as leituras de velocidades das ondas ultrassônicas ao longo do tempo, foram transformadas

em idades equivalentes a temperatura constante de 20°C. As figuras 13 a 15 apresentam os resultados obtidos.

Como já descrito, para cada tipo de argamassa foram realizados os experimentos duas vezes, implicando em temperaturas diferentes para cada um. Após a determinação das idades equivalentes, as curvas de desenvolvimento da VPU para cada tipo de argamassa ficaram próximas, tornando fácil a identificação do comportamento de cada tipo de mistura durante o processo de endurecimento nas idades iniciais, deixando clara a influência da CBC e seus diferentes tratamentos no processo de hidratação das argamassas estudadas.

Os dados observados de velocidades das ondas ultrassônicas estão em concordância com os resultados do ensaio de penetração, visto que para as misturas com cinzas, percebe-se uma aceleração no desenvolvimento das velocidades ultrassônicas e, portanto, no processo de endurecimento das argamassas em relação as misturas de referência (sem cinza). Quanto aos tratamentos realizados nas cinzas, para as relações a/c de 0,44 e 0,48, a

Tabela 10 - Tempos de fim de pega para velocidade de onda ultrassônica de 1500m/s para Te à 20°C

Mistura	Te à 20°C (1500m/s)					
	0,44 (h)	Média (h)	0,48 (h)	Média (h)	0,52 (h)	Média (h)
Ref 1	15,9	16,0	13,8	15,2	16,2	15,7
Ref 2	16,1	16,0	16,7	15,2	15,1	15,7
CBC 1-10m	13,2	13,5	13,4	13,0	10,6	10,9
CBC 2-10m	13,8	13,5	12,6	13,0	11,2	10,9
CBC 1-3h	14,5	13,7	12,4	13,1	15,8	15,4
CBC 2-3h	12,9	13,7	13,8	13,1	14,9	15,4
CBC 1-R	9,6	10,1	11,1	10,9	13,5	13,0
CBC 2-R	10,5	10,1	10,7	10,9	12,5	13,0

requeima foi novamente o tratamento que resultou em uma maior aceleração no processo. Já para a relação a/c de 0,52, a moagem por 10 min resultou uma maior aceleração do que a requeima. Ultimamente, além do uso do penetrômetro, alguns estudos comparam a velocidade de ondas ultrassônicas com o tempo de fim de pega de concretos e argamassas. Reinhardt e Grosse [27] e Belie et al. [28] estudaram o endurecimento de argamassas e concretos através do monitoramento contínuo de velocidades de ondas ultrassônicas, concluindo que o final de pega ocorre próximo a velocidade de 1500 m/s. Sendo assim, baseado nestes estudos, a Tabela 10 abaixo apresenta os tempos de fim de pega associados a velocidade das ondas ultrassônicas de 1500 m/s, relativos a idade equivalente para temperatura constante de 20°C, para todas as misturas de argamassas.

Novamente, percebe-se o efeito de aceleração nos tempos de fim de pega para as misturas com a presença de cinzas.

Com relação à resistência a compressão, os resultados apresentados na Tabela 8 sugerem que a presença de cinzas nas misturas influenciou diretamente esta propriedade. Foram verificadas resistências superiores nas misturas com cinzas, chegando a acréscimo superior a 15% para as misturas com menor relação água/cimento, indicando a possibilidade de um efeito pozolânico nestas misturas.

5. Discussão dos resultados

A adição de CBC nas misturas de argamassas em substituição dos 7,5% dos finos do agregado miúdo resultou em uma maior resistência à compressão aos 28 dias e um efeito acelerador no processo de hidratação do cimento em argamassas nas primeiras idades. Independente do beneficiamento da cinza ou da relação a/c, essa aceleração no endurecimento pode trazer benefícios para diferentes aplicações em obras, principalmente para aquelas que requerem menor tempo de execução por necessidades estruturais ou cronogramas apertados.

Estes resultados indicam que a CBC utilizada neste estudo pela constituição sílico-aluminosa tem tendência a solubilizar quanto mais importante for a presença da fase amorfa. A presença de compostos orgânicos pode ter contribuído para o retardo na formação dos compostos hidratados. Em curto período poucas técnicas são capazes de distinguir este efeito e testes comparativos auxiliam na identificação do fenômeno.

Quanto aos diferentes tratamentos aqui estudados para a CBC, a requeima, embora demandando maior energia para sua produção, justifica-se, tendo em vista que benefícios proporcionados estão associados ao efeito acelerador e maior ganho de resistência a compressão com a idade. Caso contrário, a sua utilização seria inviável e as cinzas moídas poderiam atender, de acordo com a necessidade.

Ao comparar o desempenho das cinzas moídas, a CBC – 3h, que demanda um maior consumo de energia elétrica e de tempo para sua produção, não se justifica já que seu comportamento em misturas de argamassa no estado fresco foi similar àquelas com cinzas com moagem por 10 minutos e, portanto, com um consumo bem menor de energia.

A incorporação destes resíduos substituindo parte dos agregados miúdos em misturas de concretos e argamassas, que são materiais amplamente utilizados nas construções, independentemente do tipo de tratamento, podem trazer vários benefícios além dos já

citados, dentre eles, uma produção sustentável voltada à preservação ambiental, valorização dos resíduos, aumento da qualidade dos produtos e viabilidade econômica de produção.

6. Conclusões

No presente estudo, cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) com diferentes tratamentos foram utilizadas em misturas de argamassas cimentícias em substituição da parcela fina (inferior à dimensão de 150µm) do agregado miúdo. Os efeitos na pega destas misturas com diferentes relações água/cimento (a/c) foram monitorados através de leituras de resistência à penetração e velocidades das ondas ultrassônicas nas primeiras idades.

Para o monitoramento da pega, o controle de temperatura tem extrema importância, já que o endurecimento de misturas cimentícias e o processo de solidificação são afetados pela temperatura. Para diferentes temperaturas durante o endurecimento, a determinação de idade equivalente (te) através de funções de maturidade é necessária.

Todas as argamassas com incorporação de cinzas apresentaram maior resistência à compressão característica aos 28 dias, em comparação com as misturas de referência (sem cinza). Para a fase de hidratação nas primeiras idades das misturas com cinza, os experimentos de resistência à penetração e leituras de velocidades das ondas ultrassônicas mostraram uma aceleração no processo de hidratação.

As misturas com incorporação de CBC requeimada por 06 horas (03 horas a 300°C + 03 horas a 600°C), no geral, apresentaram os melhores resultados. Já as misturas com CBC moída por 03 horas apresentaram resultados muito próximos aos das misturas com CBC moída por 10 minutos (somente para homogeneização). Como conclusão, é viável a utilização da CBC – 10m, pois apresenta melhores resultados em comparação as misturas de referência pois, apesar de ter apresentado resultados menos significativos em relação às outras cinzas, o processo de tratamento é simples, demandando pouca energia e tempo de preparo.

A CBC – R somente é viável para obras específicas, onde a necessidade de aceleração da hidratação é crucial, assim como uma maior resistência à compressão aos 28 dias. O inconveniente da CBC -10m é sua trabalhabilidade, por possuir material carbonático mais grosseiro.

Os resultados positivos alcançados neste estudo com o uso das cinzas, provavelmente são devidos ao efeito físico de preenchimento e/ou a atividade pozolânica das cinzas utilizadas, ficando como sugestão para trabalhos futuros uma investigação complementar das características físicas e químicas das cinzas utilizadas. Com os resultados alcançados, conclui-se que a incorporação de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar é viável em misturas de materiais cimentícios, podendo trazer como benefício uma produção sustentável voltada à preservação ambiental, evitando o descarte deste resíduo na natureza.

7. Referências bibliográficas

- [1] SALES, A.; LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. *Waste management* (New York, N.Y.), v. 30, n. 6, p. 1114–22, jun. 2010.

- [2] DE PAULA, M. O. et al. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 031, p. 353–357, 2009.
- [3] CORDEIRO, G. C. et al. Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultra-fine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes. *Construction and Building Materials*, v. 29, p. 641–646, abr. 2012.
- [4] RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. *Materials & Design*, v. 34, p. 45–50, fev. 2012.
- [5] BAHURUDEEN, A. et al. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 59, p. 77–88, 2015.
- [6] MACEDO, P. C. et al. Revisão bibliográfica sobre o uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na construção civil. *Anais do 51o Congresso Brasileiro do Concreto*, p. 1–14, 2009.
- [7] BESSA, S. A. L. UTILIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR COMO AGREGADO MIÚDO EM CONCRETOS PARA ARTEFATOS DE INFRAESTRUTURA URBANA. Tese de Doutorado. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2011.
- [8] MODANI, P. O.; VYAWAHARE, M. R. Utilization of bagasse ash as a partial replacement of fine aggregate in concrete. *Procedia Engineering*, v. 51, n. NUICONE 2012, p. 25–29, 2013.
- [9] CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Ultrafine sugar cane bagasse ash : high potential pozzolanic material for tropical countries. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 3, n. 1, p. 50– 67, 2010.
- [10] TANTAWY, M. A.; EL-ROUDI, A. M.; SALEM, A. A. Immobilization of Cr(VI) in bagasse ash blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, v. 30, p. 218–223, maio 2012.
- [11] FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO, H. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, p. 490–496, 2011.
- [12] CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 10, p. 3301–3303, out. 2009.
- [13] SOUZA, L. M. S. DE. ESTUDO DE HIDRATAÇÃO E NA-NOINDENTAÇÃO DE PASTAS DE CINZA DA CASCA DE ARROZ E CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COM HIDRÓXIDO DE CÁLCIO. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [14] SHE, W. et al. In-situ monitoring the setting behavior of foamed concrete using ultrasonic pulse velocity method. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, v. 28, n. 6, p. 1146–1154, 2013.
- [15] MIKULIC, D. et al. APPLICATION OF ULTRASONIC METHODS FOR EARLY AGE CONCRETE CHARACTERISATION 2005.
- [16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance - ASTM C403/C403M – 08, 2008.
- [17] LIU, S. et al. Monitoring setting and hardening process of mortar and concrete using ultrasonic shear waves. *Construction and Building Materials*, v. 72, p. 248–255, 2014.
- [18] YE, G. et al. Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement. *Cement and Concrete Composites*, v. 26, n. 5, p. 491–497, jul. 2004.
- [19] CHEN, W.; SHUI, Z.; LI, Y. Early age hydration of cement paste monitored with ultrasonic velocity and numerical simulation. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, v. 25, n. 4, p. 704–707, 19 ago. 2010.
- [20] IRRIGARAY, M. A. P. ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO À COMPRESSÃO POR MEIO DA VELOCIDADE DE PULSOS ULTRASSÔNICOS NA PASTA DO CONCRETO. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
- [21] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. ASTM C 618-12a, 2012.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653 - Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro - RJ, 2012.
- [23] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement - ASTM C 230. ASTM, p. 6, 2014.
- [24] MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. [s.l.] CRC Press, 2004. v. 992
- [25] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method - ASTM C 1074, 2011.
- [26] PINTO, R. C. A.; SCHINDLER, A. K. Unified modeling of setting and strength development. *Cement and Concrete Research*, v. 40, n. 1, p. 58–65, 2010.
- [27] REINHARDT, H. W.; GROSSE, C. U. Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, v. 18, n. 3, p. 145–154, 2004.
- [28] BELIE, N. DE; GROSSE, C.; BAERT, G. Ultrasonic Transmission to Monitor Setting and Hardening of Fly Ash Concrete. *ACI MATERIALS JOURNAL*, v. 105, p. 221–226, 2008.