

Evaluation of coal fly ash in cementitious matrices

Avaliação de cinza volante de carvão mineral em matrizes cimentícias

D. ALTHEMAN ^a
dener.altheman@gmail.com

G. C. FERREIRA ^b
gisleiva@ft.unicamp.br

M. MONTINI ^c
marmontini@outlook.com

J. B. GALLO ^c
jorge.b.gallo@alcoa.com.br

A. I. B. C. ROCHA ^b
angela_brionnes@hotmail.com

Abstract

The addition of ash, initially classified as waste in cement matrices, is essential to achieve the requirements of National Policy of Solid Waste. However, technologies that enable such applications should be sought, especially when the material has adequate pozzolanic activity. The aim of this study was to verify the pozzolanic activity of fly ash from coal burning, from the aluminum manufacturing process, such as mineral admixture in mortars and conventional concrete. For that, physicochemical characterization of the ash sample and the mechanical behavior of mix dosage of mortar and commercially used concrete tests were carried out. Results showed the ash in evaluation has pozzolanicity as relevant standards employed and when inserted in the studied cementitious matrices, showed the expected performance for this type of addition (higher mechanical strength at older ages).

Keywords: fly ash, concrete, mortar, waste, aluminum.

Resumo

A adição de cinzas em matrizes cimentícias é essencial para se alcançar os requisitos da Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Entretanto, deve-se buscar tecnologias que viabilizem tais aplicações, principalmente quando o material apresenta adequada atividade pozolânica. O objetivo deste trabalho foi verificar a atividade pozolânica da cinza volante proveniente da queima de carvão mineral, proveniente do processo de fabricação de alumínio, como adição mineral em argamassas e concretos convencionais. Para isso foram realizados ensaios de caracterização físico-química da amostra de cinza e do comportamento mecânico de traços de argamassas e concretos comercialmente empregados. Os resultados demonstraram que a cinza em questão possui atividade pozolânica conforme normas ABNT empregadas e quando inserida nas matrizes cimentícias estudadas, apresentaram o desempenho esperado para este tipo de adição (maior resistência mecânica em idades mais avançadas).

Palavras-chave: cinza volante, concreto, argamassa, resíduo, alumínio.

^a Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara do Oeste, SP, Brasil;

^b Faculdade de Tecnologia, University of Campinas, Limeira, SP, Brazil;

^c Research, Development and Innovation Area of ALCOA, Poços de Caldas, MG, Brasil.

1. Introdução

Aumentar a eficiência mecânica e vida útil de concretos e argamassas sem aumentar seu impacto ambiental é uma incessante busca de pesquisadores de materiais da construção civil. E, sob esta ótica, o emprego de resíduos com atividade pozolânica tem sido a grande ferramenta neste segmento, considerando o potencial de substituição do clínquer [1][2]. Por outro lado, a maioria dos resíduos disponíveis, com características necessárias às pozolanas, necessita de processos físico-químicos para atingir a atividade pozolânica prescritas nas normas vigentes, os quais exigem alto consumo energético [3].

Em geral, as cinzas volantes já são utilizadas comercialmente como adição mineral em matrizes cimentícias devido às elevadas proporções de óxidos em suas composições químicas [4]. Entretanto, há tipos de cinzas que ainda não foram totalmente estudadas, por exemplo, as provenientes da queima de carvão mineral (CVCN), oriundas da fabricação de alumínio.

De acordo com as normas ABNT NBR 12653:2014 [5] e ASTM C618:2012 [6], o material pozolânico é definido como silicosos ou silico aluminosos que possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante. No entanto, quando finamente moídos e expostos à água e hidróxido de cálcio, reagem quimicamente com este último formando compostos ligantes. Sendo assim, a adição direta de pozolanas ao concreto ou argamassa, além de reduzir o consumo de cimento, pode elevar o desempenho mecânico, conferir maior eficiência do material cimentício (aglomerantes) e ainda prover maior durabilidade [7]. Quanto à produção de concretos com maior vida útil, os materiais pozolânicos ao reagirem com os hidróxidos presentes nas matrizes cimentícias, os quais são facilmente solúveis e reativos com agregados que disponham de alto teor de sílica, podem evitar a reação álcali-agregado [8].

PACHECO et al [9] afirmam que as matrizes cimentícias com as cinzas volantes apresentam reações químicas de hidratação mais lentas, contribuindo pouco para as resistências iniciais, mas é sem dúvida um dos materiais mais indicados na redução do consumo de clínquer, havendo substituições no cimento entre 40 e 50%.

No âmbito da sustentabilidade, o uso das cinzas volantes aliado à novas tecnologias de produção, contribui efetivamente para redução de emissão de CO₂, principal passivo ambiental da indústria do cimento. Neste cenário, o Brasil tem se colocado em destaque com o emprego das cinzas volantes na produção do cimento Por-

land, principalmente na região sul do país, onde há maior produção deste resíduo devido o alto consumo de carvão mineral pelas centrais termoelétricas lá instaladas.

Neste contexto, há a necessidade de estudos sobre outros tipos de cinzas, por exemplo, a proveniente do uso de carvão mineral no beneficiamento da bauxita para produção de alumínio primário. Dados atuais relatam que a cada 100t de carvão mineral empregado nas caldeiras, 10t de cinzas são geradas, onde 90% é cinza volante e 10% é denominada como cinza pesada, que fica depositada sobre leito da caldeira [10]. No Brasil, o uso de carvão energético é de aproximadamente oito milhões de toneladas por ano [11].

O processo de beneficiamento da bauxita utiliza caldeiras do tipo “combustão a seco com tiragem artificial” na geração de vapor para o processo BAYER [10]. Segundo RAMOS [12] o funcionamento dessa caldeira (reator) apresenta basicamente quatro etapas. A primeira é a ignição e a segunda é adição do material inerte (areias) que garante a fluidização e a recirculação de materiais. A terceira etapa é a adição do combustível – “carvão mineral” e a quarta etapa é a adição de uma mistura de calcário para minimizar os gases.

Portanto, as cinzas volantes geradas nesse processo são muito diferentes daquelas geradas pelas eletrotérmicas, cujo emprego na produção de cimentos pozolânicos já está consolidado. Sendo assim, há a necessidade de avaliar o potencial deste resíduo incorporado em concretos e argamassas. A ABNT NBR 12653:2014 [13] que apresenta os requisitos para identificar a atividade pozolânica de resíduos minerais, classifica as pozolanas em três grupos:

- classe N: origem vulcânica e artificial de origem de subprodutos industriais;
- classe C: cinzas volantes finamente moídas provenientes de termoelétricas;
- classe E: outras pozolanas (cinzas volantes, cinzas de resíduos vegetais).

Deve-se destacar que a norma internacional ASTM C618:2012 [6], especifica os mesmos limites dos compostos químicos que a norma brasileira [Tabela 1].

O alto volume do resíduo em questão e a potencial atividade pozolânica, comprovada por diversos pesquisadores em resíduos semelhantes [8, 9, 10, 12, 14,15], indicam a adequabilidade do uso da cinza volante de queima de carvão mineral em matrizes cimentícias. Menéndez et al. [14] avaliaram o comportamento mecânico de cinzas pesadas e cinzas volantes, provenientes da produção de alumínio, na substituição do cimento em argamassas nos teores de 10%, 25% e 35%. Os resultados obtidos indicaram o teor

Tabela 1

Compostos químicos que devem estar presentes em materiais com atividade pozolânica conforme normas vigentes

Composto (%)	ABNT NBR 12653:2014	ASTM C 618:2012
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70,0	≥ 70,0
SO ₃	≤ 5,0	≤ 5,0
Teor de umidade	≤ 3,0	≤ 3,0
Perda ao fogo	≤ 10,0	≤ 10,0
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5	≤ 1,5
Material retido na peneira 45 µm	≤ 20%	≤ 34%

Tabela 2

Traços de concretos produzidos e respectivos materiais

Materiais	Traços executados para abatimento de 130 mm (valores em kg/m ³)				
	Referência	FAMC			Metacaulim
		5%	10%	20%	10%
Cimento CP V ARI RS	300	300	300	300	300
Adição	0	15	30	60	30
Areia eólica (M F: 1,40)	819	804	789	759	789
Brita basalto (# 19 mm)	1130	1130	1130	1130	1130
Aditivo (base lignossulfonato)	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Relação água/aglomerantes	0,617	0,587	0,597	0,564	0,606

de 20% de cinza volante como ideal, considerando a resistência à compressão dos corpos de prova referência (sem substituição). Outros autores avaliaram concretos com substituição do cimento por cinza volante nos teores de 20%, 30% e 40%. Os resultados obtidos por estes autores atingiram 91%, 82% e 67% da resistência do traço referência, respectivamente aos teores indicados, considerando 28 dias de cura. Em idade mais avançada (112 dias), os concretos com adições alcançaram, na média, 87% da resistência do concreto de referência, evidenciando que, a taxa de crescimento de concretos com elevados teores de cinzas volantes é tardia quanto maior a taxa de adição [16]. Este trabalho evidencia a necessidade em avaliar o material pozzolânico inserido ao sistema cimentício que será aplicado, além dos ensaios que verificam o potencial pozzolânico.

Há propriedades, intrínsecas às argamassas e concretos, que impactam no desenvolvimento das reações pozzolânicas e desempenho mecânico resultante. Dentre elas pode-se citar a estrutura granular e os vazios, provocados pela incorporação de ar devido à combinação de aditivos químicos. Neste contexto, este trabalho avaliou o comportamento de uma amostra de cinza volante de carvão mineral oriunda da produção de alumínio (CVCM) incorporada

a concreto dosado em central e argamassas industrializadas.

2. Materiais e programa experimental

2.1 Atividade pozzolânica da cinza volante de carvão mineral da produção de alumínio

A atividade pozzolânica da amostra de CVCM foi determinada conforme metodologia da NBR 12653:1992 [5], na presença de cimento e cal, norma em vigor na ocasião que este estudo teve início. Determinou-se a trabalhabilidade conforme parâmetros definidos pelo método Flow Table [17], considerando um espalhamento de 225 ± 5 mm, cuja relação água/aglomerantes variou conforme o teor de CVCM.

O material em análise neste trabalho foi obtido na captação dos filtros subsequentes as caldeiras onde o carvão mineral é queimado. O material coletado foi ensaiado de forma in natura, sem nenhum beneficiamento para seu emprego.

Para analisar a eficiência da cinza volante proveniente da queima de carvão mineral (CVCM) aplicada em concretos e argamassas, produziu-se traços tendo como referência as proporções aplicadas

Tabela 3

Traço das argamassas de assentamento estrutural produzidas

Materiais	Traços da argamassa de assentamento (kg/tonelada)			
	Referência	CVCM 5%	CVCM 10%	CVCM 20%
Cimento CP V ARI RS	155	155	155	155
Adição cinza	0	8	16	31
Cal CH III	37	37	37	37
Filito	37	37	37	37
Areia fina	431	423	415	400
Areia média	340	340	340	340
Retentor de água 15.000 m.Pa.s	0,090	0,090	0,090	0,090
Água (% sobre massa da mistura)	15%	15%	15%	15%
Relação água/aglomerantes	0,968	0,922	0,880	0,806

Tabela 4

Traços das argamassas de revestimento produzidas

Materiais	Traços da argamassa de revestimento (kg/tonelada)			
	Referência	CVCM 5%	CVCM 10%	CVCM 20%
Cimento CP V ARI RS	125	125	125	125
Adição cinza	0	6	13	25
Cal CH III	44	44	44	44
Filito	60	60	60	60
Areia fina	771	765	758	746
Incorporador de ar	0,030	0,030	0,030	0,030
Retentor de água (15.000 m.Pa.s)	0,027	0,027	0,027	0,027
Água (% sobre massa da mistura)	15	15	15	15
Relação água/aglomerantes	1,200	1,143	1,091	1,000

Tabela 5

Propriedades físico-químicas da cinza (ABNT NBR 12653)

SiO ₂	52,8%	72,4%
Al ₂ O ₃	15,6%	
Fe ₂ O ₃	4,0%	
Resíduo na peneira 45 µm		9,4%
Massa específica (g/cm ³)		2,46
Área específica (cm ² /g)		8,630
Perda ao fogo		13,7%

por DAMINELLI et al [18], que determinaram o indicador de desempenho técnico de aglomerantes por m³ de concreto.

2.2 Concreto

Para os traços de concreto com incorporação do resíduo CVCM utilizou-se um consumo de cimento de 300 kg/m³ e teores de subs-

tituição de 5%, 10% e 20%, definidos a partir da literatura consultada [14, 16]. Todos os traços também tiveram a adição de 10% de Metacaulim HP (Metacaulim do Brasil) e a relação água/cimento variou conforme o teor de CVCM e abatimento fixado em 130±20 mm, seguindo os procedimentos normativos ABNT [19] e levantamento de dados sobre as características dos concretos produzidos por centrais dosadoras na região de Campinas, São Paulo. As composições dos traços de concreto estão expostas na Tabela 2. Foram moldados dois corpos de prova de 100 x 200 mm para a avaliação da resistência à compressão axial em cada idade, tomando-se o maior valor do par conforme indicado pela ABNT NBR 12655 [20].

2.3 Argamassa

Para a análise do resíduo CVCM em argamassas, produziu-se dois tipos de argamassa: para assentamento de alvenaria estrutural e de revestimento (Tabelas 3 e 4). Os quantitativos das dosagens estão expressos em relação à tonelada (t), unidade adotada para as argamassas secas industrializadas. Determinou-se as propriedades no estado fresco e endurecido conforme requisitos dispostos na ABNT NBR 13281:2005 [21]. Os teores de adições da CVCM seguiram as

Tabela 6

Resultados do ensaio de atividade pozolânica com cimento – ABNT NBR 5752:1992

Amostras	Resistência à compressão (MPa)	Índice de pozolanicidade	Teor de água requerida
100% cimento CP II F 32 (A)	28,2	-	-
65% CP II F + 35% cinza volante (B)	24,8	87,9%	108,4%

Tabela 7

Resultados do ensaio de atividade pozolânica com cal – ABNT NBR 5751/92

Corpo de prova 1	Corpo de prova 2	Corpo de prova 3	Média	Desvio máximo relativo
7,2	7,1	7,3	7,2	1,4%

* Valores em MPa

Tabela 8

Resultados obtidos com os concretos produzidos

Adição (kg/m ³)	Relação água/ ag real	Cimento (kg/m ³)	Adição (kg/m ³)	Água (L/m ³)	Slump mm	Resistências à compressão axial (MPa)*			
						3 dias	7 dias	28 dias	ECM**
-	0,617	300	0	185	130	31,2	37,3	44,5	6,7
Cinza (15,0)	0,587	300	15	185	130	33,1	38,3	46,1	6,8
Cinza (30,0)	0,597	300	30	197	130	32,5	37,9	46,4	7,1
Cinza (60,0)	0,564	300	60	203	130	31,7	37,7	47,2	7,6
Metacaulim (30,0)	0,606	300	30	200	130	32,5	40,1	45,5	7,3

* Ensaio conforme ABNT NBR 5739. Indicando maior valor do par moldado para cada idade conforme ABNT NBR 12655
** EMC: Eficiência do Material Cimentício, corresponde a $[\text{alglomerantes}/\text{fc28}]$ conforme [18]

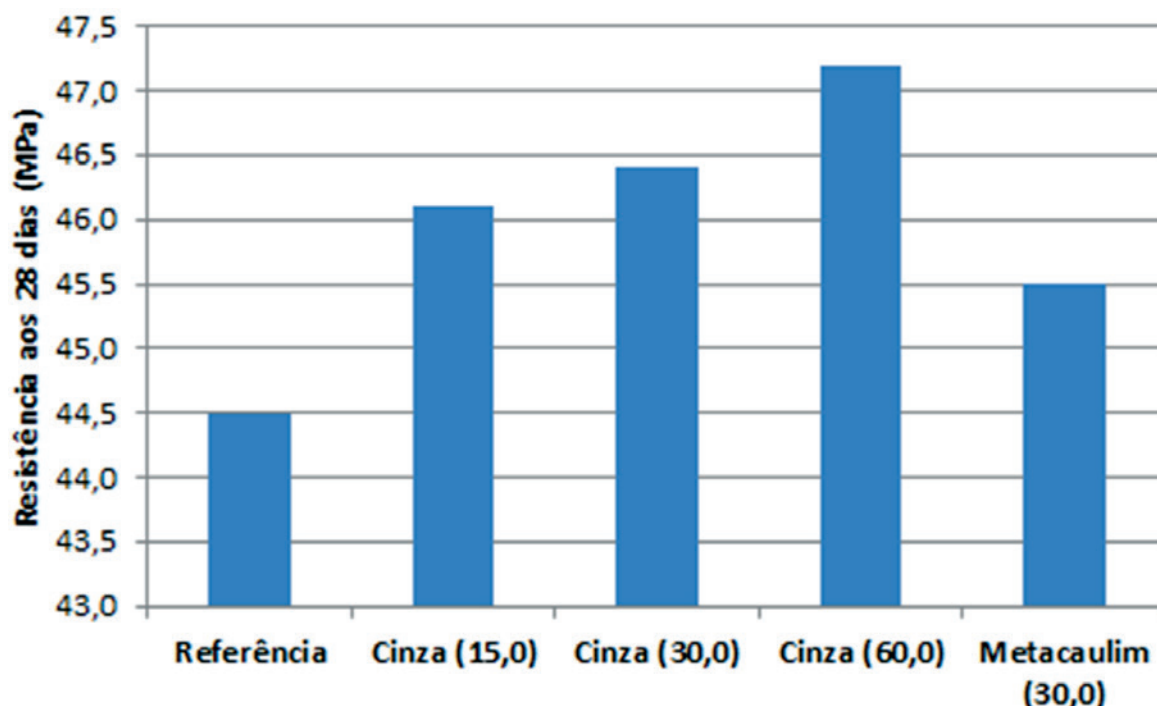
premissas indicadas para a produção do concreto para avaliação par de seu desempenho. Foram moldados três corpos de prova de 40 x 40 x 160 mm para cada idade de ensaio, sendo então ensaiados à flexão com posterior ensaio à compressão nas seis partes dos corpos de prova iniciais conforme ABNT NBR 13279 [22].

3. Resultados e discussões

3.1 Caracterização da atividade pozolânica da cinza

Os resultados obtidos para a amostra de CVCM [Tabela 5] confirmam sua atividade pozolânica conforme normas vigentes [Tabela 1] e a

versão da norma pela qual o ensaio foi realizado [5]. Tais normas prescrevem que a somatória dos óxidos deve ser $\geq 75\%$, o que foi alcançado para o resíduo estudado (73%). Em relação ao material retido na peneira de 45 μm também foi obedecido conforme todas as normas consultadas. Apenas a perda ao fogo (13,7%) foi maior do que o limite imposto pelas normas (10%). Os valores também estão coerentes com cinzas volantes utilizadas comercialmente e por outros pesquisadores [23], evidenciando que as temperaturas empregadas nos fornos tipo BAYER podem impactar nesta propriedade. Ao relacionarmos os resultados conforme a NBR 12653:1992 [5], que estava vigente no período dos ensaios deste trabalho, verifica-se os dados expostos nas Tabelas 6 e 7 atenderam os

**Figura 1**

Resultados de resistência dos concretos aos 28 dias conforme o tipo e teor de adição em kg/m³

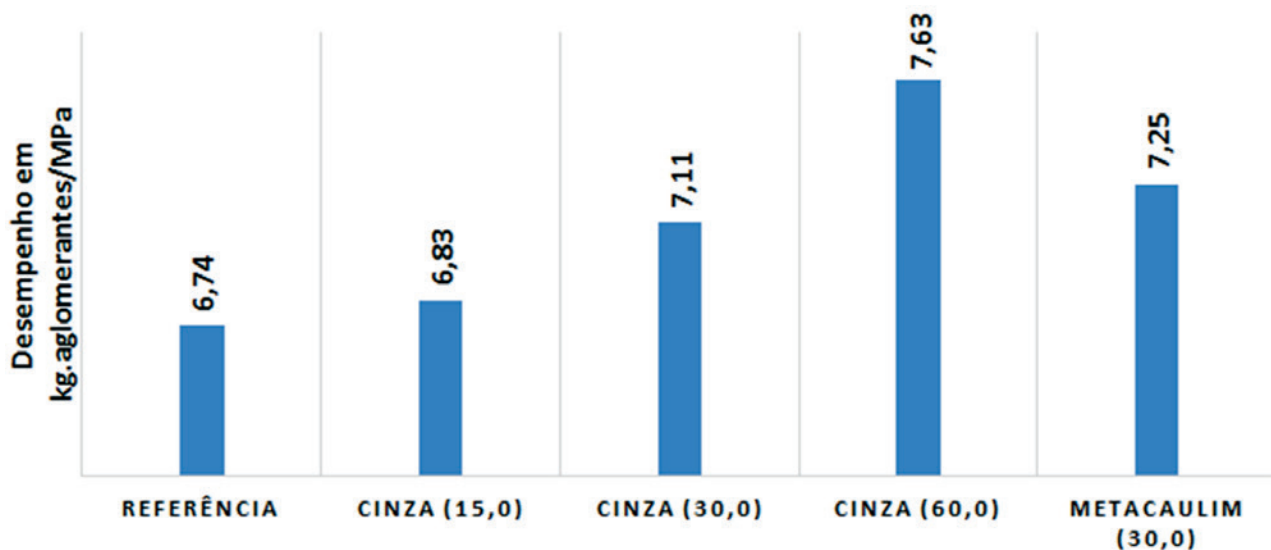


Figura 2 Resultados da Eficiência do Material Cimentício (EMC) conforme o teor de adição em kg/m³

requisitos, respeitando os valores mínimos de 75% nos ensaios com cimento (substituição) e 6,0 MPa para a resistência à compressão com a cal. Os resultados também são semelhantes aos obtidos na literatura consultada [24, 25].

MEDEIROS et al. [24] estudaram a reatividade de alguns materiais conforme a reação com o hidróxido de cálcio e interação com análises por difratogramas de Raios X. Estes autores comentaram que o método indireto, de avaliar a resistência desenvolvida na argamassa com cal, apresenta influência na composição da matriz, uma vez que a esfericidade e a granulometria dos materiais podem afetar a trabalhabilidade requerida, sendo necessário variar o teor de água da composição. Ainda citam que a metodologia não

distingue os efeitos físicos e químicos das adições, mas expressa a influência conjunta destes.

Ainda, a contraposição do ensaio com a cal perfaz semelhante desempenho na análise da reatividade com cimento Portland. Ao obter 87,9% de atividade pozolânica na substituição de 35% da massa de cimento, o material CVCM se enquadra como material pozolânico, mas não apresenta alta reatividade frente à outras pozolanas artificiais comercializadas [24][25].

3.2 Resultados obtidos com os concretos

Com a adição da cinza ao concreto, variando o teor de água

Tabela 9 Resultados obtidos com as argamassas produzidas

	Adição de cinza	Flow-table (mm)	Densidade (g/cm ³)	Retenção de água (%)	Resistências à compressão		Resistências à tração na flexão	
					7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
Argamassa de revestimento	0%	249	1640	88	3,8	5,0	1,1	1,4
	5%	254	1650	90	4,3	5,2	1,1	1,5
	10%	261	1660	86	4,0	5,4	1,3	1,6
	20%	2156	1590	87	4,4	6,0	1,4	1,6
Argamassa de assentamento	0%	258	2020	90	13,1	14,6	2,7	3,3
	5%	256	2080	88	15,4	17,0	2,9	3,3
	10%	251	2085	90	14,7	17,6	2,8	4,1
	20%	262	2090	91	14,5	17,6	3,0	3,7

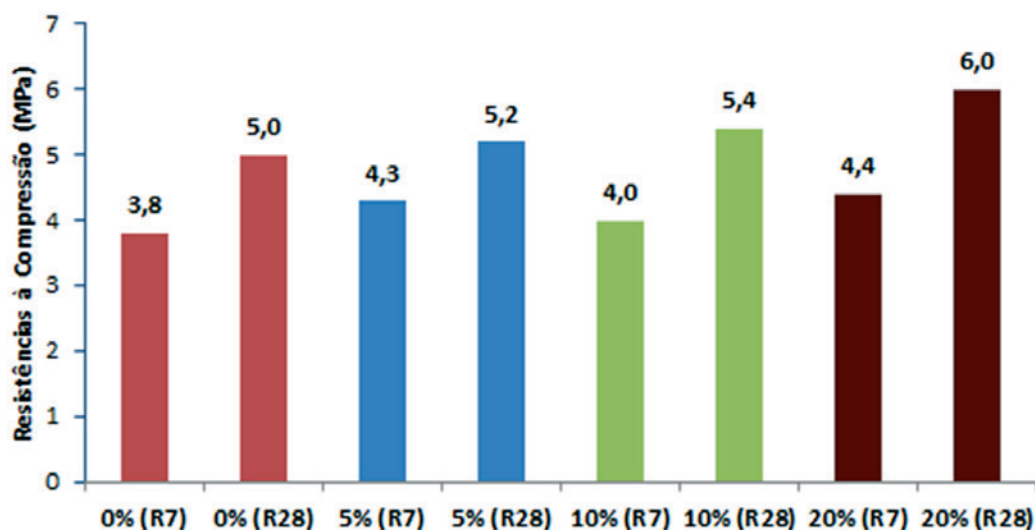


Figure 3

Resultados de compressão das argamassas de revestimento conforme percentual de adição ao cimento e idade de ensaio

necessário para manter o mesmo abatimento (slump), foi possível identificar a demanda de água proporcional ao aumento do teor de finos [Tabela 8]. Com menor consumo de água, o produto de referência (Metacaulim) apresentou maior resistência mecânica, comparado ao mesmo teor de cinza volante [Figura 1]. Com isso, identifica-se uma correlação linear entre a resistência e o fator água/aglomerantes, o que demonstram uma eficiência da amostra de CVCM até o teor de 10%. Deve-se ressaltar que a obtenção de maiores resistências nas idades iniciais para o material de referência (Metacaulim) é esperado, uma vez que a sua finura em relação a CVCM estudada é maior, além da sua composição química apresentar maior teor de aluminatos, os quais são responsáveis pelo aumento da resistência nas primeiras idades [24][25].

Para quantificar a eficiência da amostra de CVCM em questão, aplicou-se o método identificado como EMC (Eficiência do Material Cimentício), que consiste na razão da soma dos aglomera-

rantes (cimento + adição mineral) pela resistência obtida aos 28 dias (Figura 2), definido por DAMINELLI et al [18]. Estes autores demonstraram que há plena viabilidade na produção, em escala industrial, de concreto com indicador EMC da ordem de 3,0 a 4,0 kg/MPa. Outros pesquisadores [26] identificaram que os concretos produzidos com cimentos comerciais apresentam desempenho, em relação ao consumo de aglomerante (kg/MPa), na faixa de 7 a 9 kg de materiais cimentícios/MPa, valores estes próximos aos obtidos neste trabalho (6,7 a 7,6 kg de materiais cimentícios/MPa). A análise dos resultados demonstra que a incorporação de CVCM aumentou a resistência à compressão em 6,0%, para o teor de 20%. Entretanto, sob a análise do indicador EMC, o incremento de resistência é menor do que para os teores abaixo de 20%. Ao utilizar este tipo de adição mineral podem ocorrer alterações na microestrutura do concreto e, conseqüentemente, comprometer a sua durabilidade [25]. Isto pode ocorrer devido a redução do

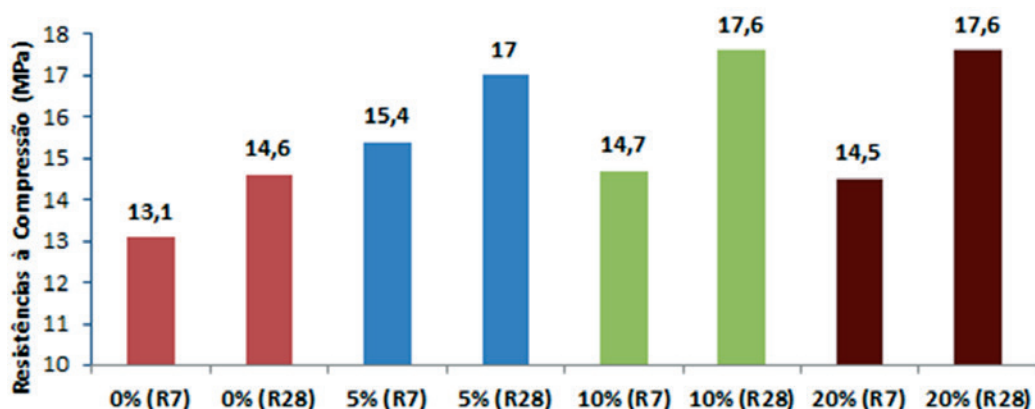


Figura 4

Resultados de compressão das argamassas de assentamento conforme percentual de adição ao cimento e idade de ensaio

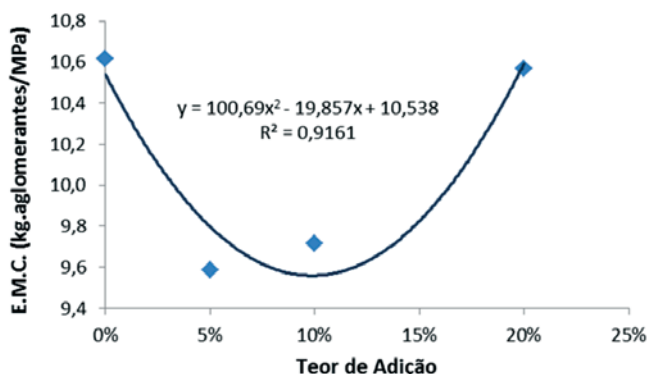


Figura 5

Resultados da eficiência do material cimentício (EMC) das amostras de argamassas para assentamento aos 28 dias de idade

índice de abatimento com o incremento de material fino, por haver maior área de exposição e interação reológica, um dos pontos que deve-se ter muita atenção quando da adoção desses materiais na produção de concretos.

Portanto, além de considerar a classificação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP), a partir das normas em vigor, há a necessidade de avaliar o desempenho dos resíduos nos sistemas finais de aplicação (argamassas e concretos). Se por um lado o material de referência (Metacaulim) apresenta maior IAP do que a amostra de CVCM [25], por outro lado os dois tipos de adições minerais apresentam o mesmo desempenho ao se considerar o índice EMC.

3.3 Resultados obtidos com as argamassas

Os resultados das argamassas, desenvolvidas para as diferentes aplicações e, portanto, tendo estruturas granulométricas e matrizes diferentes, estão apresentados na Tabela 9. O comportamento das argamassas no estado fresco foi semelhante entre as amostras de adições minerais. Para verificar os requisitos no estado fresco descritos na NBR 13281:2005 [19], foram realizados ensaios de trabalhabilidade (flow table) e de retenção de água, os quais apresentaram ensaios praticamente iguais entre os traços com CVCM e metacaulim. Embora estudos mostrarem impacto negativo no estado fresco das argamassas com cinzas de carvão mineral [28], entende-se que o emprego de aditivos (incorporadores de ar e retentores de água) podem contribuir para a redução deste impacto, diferentemente dos resultados do concreto. Os aditivos retentores de água, comumente aplicados em argamassas, são produtos químicos que modificam a viscosidade, atuando na lubrificação granular, aliados ao maior teor de ar na matriz cimentícia, provocado pelos aditivos incorporadores de ar. Esta incorporação de ar, que ocorre pela ação física dos aditivos químicos, mitiga assim o impacto do aumento do teor de finos encontrado na análise em concreto.

O comportamento mecânico foi melhorado com o aumento da incorporação da CVCM (figuras 3 e 4). Mas, dada a estrutura da matriz cimentícia das argamassas de revestimento terem

significativa incorporação de ar (25%), justifica-se o seu desempenho mecânico ser inferior ao apresentado pelas argamassas para assentamento estrutural. Assim, entende-se que a densificação da matriz cimentícia devido a formação do silicato de cálcio secundário (atividade pozolânica) proporciona menor efeito nas matrizes de argamassas de revestimento, dada assim a necessidade da maior incorporação de vazios necessários para conferir maior deformação elasto-plástica.

Ao empregar o índice EMC para os resultados obtidos aos 28 dias com os dois tipos de argamassas, verificou-se que tal método de avaliação de desempenho confere adequada aplicabilidade apenas para as argamassas de assentamento. Os valores para argamassas de revestimento foram de 25,0; 25,2; 25,5 e 25,0 para as adições de 0%; 5%; 10% e 20% de CVCM, respectivamente, em função da estrutura vesicular elevada, não conseguindo assim a formação de novos compostos densificar a matriz para conferir tal efeito melhor. Já para a linha de argamassas de assentamento estrutural os valores de EMC foram compatíveis com a literatura [18][26][29]. Estes valores corroboram o incremento da resistência mecânica devido a interação entre os aditivos e a estrutura de materiais compostos por materiais cimentícios [30]. Estes autores estudaram o mecanismo das reações químicas e da velocidade destas em amostras com metacaulim, os quais concluíram que conforme o aumento da taxa de substituição do cimento por aditivo mineral, a relação entre o hidróxido de cálcio (CH) e quantidade de cimento disponível diminui, sendo o teor de 10% de substituição o ponto ótimo para a presença de CH. Este teor também foi observado para esta amostra de CVCM, evidenciando mais uma vez o mesmo desempenho pozolânico, comparado a pozolanas comerciais e índice EMC (figura 5).

4. Conclusões

- 1) Sob o ponto de classificação de material pozolânico, a amostra de cinza volante de carvão mineral (CVCM) cumpriu os quesitos normativos vigentes, exceto no teor de material na perda ao fogo, que deve ser acompanhado em novas amostras e indicadas ações para adequação durante o processo industrial.
- 2) A adição de 5% da CVCM em traço de concreto e argamassas secas industrializadas apresenta incremento na resistência à compressão de 16% em relação aos traços referências. Para os traços estudados, houve uma redução no consumo de aglomerantes, com a adição de 1,0 kg/m³ de CVCM.
- 3) Quanto à análise da eficiência do material cimentício (EMC), o desempenho do concreto, com manutenção do índice de kg.aglomerantes/MPa, se manteve até o teor de 10% de CVCM.
- 4) O resíduo analisado apresentou melhor desempenho que a amostra de pozolana comercial (Metacaulim HP), fato que reforça a necessidade de avaliar a pozolana no sistema cimentício (em razão de sua estrutura) e não só a partir do índice de atividade pozolânica, dado pelas normas ABNT.

5. Agradecimentos

Agradecimento a ALCOA e ao Grupo GNT pela disposição do material e ensaios de caracterização.

6. Referências bibliográficas

- [1] SCHNEIDER, M. et al. Sustainable cement production—present and future. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 7, p. 642-650, 2011.
- [2] DAMINELI, B. L. et al. CIB 2013 World Congress Mitigating CO2 emissions from the cement industry: potential of feasibility versus the market challenge. Brisbane, Australia, 2013.
- [3] TANG, P.; FLOREA, M. V. A.; SPIEZ, P.; BROUWERS, H.J.H. The application of the treated bottom ash in mortar as cement replacement. *Waste Management Symposium Eurasia 2014*. Pág. 1077 a 1082. Istambul. Turquia, 2014.
- [4] SIQUEIRA, J. S.; SOUZA, C.A.G.; SOUZA, J.A.S. Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formulação de argamassas. *Revista Cerâmica* 58, pág. 275 a 279. 2012.
- [5] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12653 – Materiais pozolânicos – requisitos. Rio de Janeiro, 1992.
- [6] ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C618-05: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Philadelphia, USA, 2012.
- [7] ZERBINO, R.; GIACCIO, G.; ISAIA, C. R. Concrete incorporating Rice-husk ash without processing. *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 371-378, 2011.
- [8] RABELO, N. M.; GARCIA, C. R. Comportamento do Concreto mediante a Adição de Pozzolana Artificial. *e-Xacta*, v. 6, n. 1, 2013.
- [9] PACHECO-TORGAL, F.; SHASAVANDI, A.; JALALI, Saíd. Eco-Efficient Concrete Using Industrial Wastes A Review- In *Materials Science Forum*. 2013 p 581-586. Portugal.
- [10] MONTINI, M. Aplicação do Resíduo de Bauxita e Cinza Pesada da Indústria do Alumínio na Fabricação do Cimento Portland. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. 2009.
- [11] DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral 2014. Brasil, 2014. Disponível em: https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=9556, acessado em 18/12/2014.
- [12] RAMOS, J. Reciclando Cinzas: Estudo de Viabilidade para Produção de Blocos para Construção Civil a partir da Cinza Volante Residual de um Reator de Leito Fluidizado. Dissertação de Mestrado. Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. 2011.
- [13] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12653 – Materiais pozolânicos – requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- [14] MENÉNDEZ, E., ÁLVARO, A. M., HERNÁNDEZ, M. T., & PARRA, J. L. (2014). New methodology for assessing the environmental burden of cement mortars with partial replacement of coal bottom ash and fly ash. *Journal of environmental management*, 133, 275-283.
- [15] SOW, M.; HOT, J.; TRIBOUT, C.; MARTIN, C. Characterization of Spreader Stoker Coal Fly Ashes (SSCFA) for their use in cement-based applications. *Fuel*, v. 162, p. 224-233, 2015.
- [16] KARA, P. A.; KORJAKINS, A.; STOKMANIS-BLAUS, V. Evaluation of properties of concrete incorporating ash as mineral admixtures. *Construction Science*, v. 13, p. 17-25, 2012.
- [17] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13276 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto – determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- [18] DAMINELI, B. L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, n. 8, p. 555-562, 2010.
- [19] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12821 - Preparação de concreto em laboratório – Procedimento. Rio de Janeiro, 2009.
- [20] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12655 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- [21] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13281 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
- [22] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13279 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- [23] ASSI, L. N., DEEVER, E., EIBATANOUNY, M., ZIEHL, P. Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 807-815. 2016.
- [24] MEDEIROS, M. H. F. de, HOPPE FILHO, J., GOBBI, A., PEREIRA, E. Pozolanas de elevada reatividade: uma avaliação crítica do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal usando Difração de Raios X. *Ambiente Construído*, 15(3), 19-29. 2015.
- [25] GOBBI, A. Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares. Universidade Federal do Paraná - Dissertação de Mestrado. Curitiba, 2014.
- [26] OLIVEIRA, V. C. H. C.; DAMINELI, B. L.; AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Estratégias para a minimização da emissão de CO2 de concretos. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 167-181, ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. out./dez. 2014.
- [27] PAIVA, H.; VELOSA, A.; CACHIM, P.; FERREIRA, V. M. Effect of pozzolans with different physical and chemical characteristics on concrete properties. *Materiales de Construcción*, v. 66, n. 322, p. 1-12, 2016.
- [28] BILIR, Turhan; GENCEL, Osman; TOPCU, Ilker Bekir. Properties of mortars with fly ash as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 93, p. 782-789, 2015.
- [29] IBRAHIM, Ali Huddin et al. Effects of Coal Bottom Ash on the Compressive Strength of Portland Cement Mortar. In: *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications, 2015. p. 149-154.
- [30] SHA, W.; PEREIRA, G. B. Differential scanning calorimetry study of ordinary Portland cement paste containing metakaolin and theoretical approach of metakaolin activity. *Cement and Concrete Composites*, v. 23, n. 6, p. 455-461, 2001.