ESTUDO DE CINZAS VOLANTES DE ALTA TEMPERATURA E DE LEITO FLUIDIZADO VISANDO A PRODUÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS A BASE DE CIMENTO

Carine de Souza Gonçalves [(1)]; Camila Aparecida Abelha Rocha [(2)]; Eduardo de Moraes Rego Fairbairn[(3)]

(1) UFRJ – carine.goncalves@coc.ufrj.br; (2) UFF – camilaabelha@id.uff.br; (3) UFRJ – eduardo@coc.ufrj.br

RESUMO

Na produção do concreto, a substituição do cimento por cinzas volantes é uma das formas de reduzir, simultaneamente, o custo de fabricação e as emissões de CO_2. Diferentes processos de combustão geram cinzas com características distintas. O objetivo deste trabalho foi verificar os efeitos da substituição parcial de cinzas volantes de alta temperatura (HTFA) pouco reativas, por cinzas volantes de leito fluidizado (FBCA), em matrizes a base de cimento. O desempenho dessas cinzas foi comparado em pastas e argamassas por meio de quatro proporções de material cimentício: referência, apenas com cimento Portland CPI; substituição em massa de 43% do cimento por HTFA; e substituição em massa de 9 e 13% da HTFA por FBCA. Pastas foram avaliadas quanto ao calor de hidratação, reologia e retração química, já argamassas, quanto à densidade de massa e resistência mecânica à compressão axial e tração na flexão, após 2, 7, 21 e 28 dias de cura. Ao comparar os resultados, foi possível observar que a retração aumentou e a trabalhabilidade diminuiu nas pastas com FBCA. Do mesmo modo, as maiores resistências foram apresentadas pelas argamassas com FBCA. Sendo assim, é promissora a substituição parcial da HTFA pela FBCA em matrizes a base de cimento.

Palavras-chave: cinza volante de alta temperatura, cinza volante de leito fluidizado, cimento

STUDY OF HIGH TEMPERATURE FLY ASHES AND FLUIDIZED BED ASHES FOR THE PRODUCTION OF SUSTAINABLE CEMENT BASE MATERIALS

ABSTRACT

In cement production, replacing cement with fly ash is one way of reducing manufacturing cost and CO2 emissions simultaneously. Different combustion processes generate ashes with different characteristics. The objective of this work was to verify the effects of the partial replacement of high temperature fly ash (HTFA) with low reactivity, by fluidized bed fly ash (FBCA) on cement-based matrices. The performance of these ashes was compared in pastes and mortars by means of four proportions of cementitious material: reference only with Portland cement CPI; bulk replacement of 43% of the cement by HTFA; and mass replacement of 9 and 13% of HTFA by FBCA. Pastes were evaluated for the heat of hydration, rheology and chemical retraction, and mortar, as for mass density and mechanical resistance to axial compression and flexural tensile strength after 2, 7, 21 and 28 days of cure. When comparing the results, it was possible to observe that the retraction increased, and the workability decreased in the folders with FBCA. Likewise, the greatest strengths were presented by mortars with FBCA. Thus, partial replacement of HTFA by FBCA in cement-based matrices is promising.

Key-words: high temperature fly ash, fluidized bed combustion ash, cement

1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland, além de ser o principal componente do concreto, é o mais oneroso e o que mais causa impactos ambientais negativos devido ao seu processo produtivo altamente carbono-intensivo. Desse modo, o uso de matérias-primas alternativas na produção do concreto, em substituição ao cimento, vem sendo uma das principais formas de se reduzir, simultaneamente, os custos da fabricação e os impactos ambientais. Nesse âmbito, as cinzas volantes de usinas termelétricas, resíduos do processo de combustão com características pozolânicas, vem sendo amplamente utilizadas com esse propósito.

De um modo geral, as cinzas volantes reduzem a demanda por água, melhoram a trabalhabilidade e aumentam a resistência a longo prazo [1]. Entretanto, o tipo cinza volante utilizado influencia o desempenho do concreto [2]. Isso ocorre porque, dependendo do material que for usado como combustível e do processo de combustão escolhido, a cinza volante pode apresentar características muito diferentes, que resultam em diferentes interações com o cimento e, consequentemente, concretos com propriedades distintas.

As cinzas volantes mais utilizadas pela indústria cimenteira são as de origem da combustão convencional em alta temperatura devido a sua ampla oferta. Contudo, o aumento da demanda por cimento, bem como a necessidade de torná-lo mais sustentável, fez com que as indústrias expandissem seus horizontes para resíduos de outros processos como os da combustão de leito fluidizado. Essa tecnologia tem como vantagem não só redução do teor de enxofre na cinza, sem perdas de eficiência térmica, mas também a capacidade de queimar resíduos e carvões de baixa qualidade, com baixo índice de emissões [3].

Enquanto as cinzas volantes tradicionais, em sua maioria, só apresentam atividade pozolânica, as cinzas fluidizadas, além de apresentarem reatividade maior, pois além da atividade pozolânica, também são capazes de endurecer por simples mistura com água sem quaisquer outros aditivos. No entanto, as cinzas fluidizadas possuem alto teor de cal livre e sulfato de cálcio, o que pode comprometer a durabilidade dos materiais a base de cimento [4]. Sendo assim, a substituição parcial da cinza tradicional pela cinza de leito fluidizado pode ser uma alternativa mais eficiente para adições no cimento. Isso porque, o processo de combustão a temperaturas mais baixas gera, não só cinzas mais reativas, como também requer menos combustível e libera menos CO_2 para o meio ambiente [5]. Desse modo, se forem combinadas em dosagens ótimas, essas cinzas podem se complementar gerando um produto com bom desempenho e mais sustentável.

Uma vez que a cinza volante com baixo teor de cálcio geralmente possui atividade pozolânica baixa, combiná-la com uma cinza de leito fluidizado é uma forma de se melhorar a reatividade da adição mineral como um todo. Desse modo, o objetivo principal do estudo foi verificar da viabilidade de se substituir, parcialmente, a cinza volante de alta temperatura pela cinza volante de leito fluidizado em matrizes a base de cimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Caracterização dos materiais

O cimento utilizado nos experimentos foi o cimento Portland tipo I (CPI), isto é, sem adições, oriundo do município de Ladce que se localiza no noroeste da Eslováquia. Foram utilizados dois tipos de cinzas volantes: cinza volante de alta temperatura (High Temperature Fly Ash - HTFA) decorrente da combustão de carvão pulverizado na Usina Termoelétrica de Rybnik na Polônia; e cinza volante de leito fluidizado (Fluidized Bed Combustion Ash - FBCA) derivada da combustão do carvão em leito fluidizado na Usina Termoelétrica de Alpiq na República Tcheca. Além dos materiais cimentícios, também foram utilizados água deionizada e agregado miúdo fino (0,063mm a 2mm), ambos de origem Tcheca.

De acordo com a Tabela 1 é possível verificar que a pouca reatividade da HTFA é decorrente do baixo teor de cálcio presente em sua composição e que, em relação a essa cinza, a FBCA apresenta um teor mais alto de CaO e mais baixo de SiO_2. Além disso, a FBCA apresenta alto teor de sulfatos e CaO livre, que apesar de poderem causar expansão da matriz, tem esse risco minimizado pela substituição parcial, e não integral, da HTFA por essa cinza. Essas características da cinza de leito fluidizado são decorrentes principalmente da baixa temperatura de queima que contribui para grandes quantidades de anidrita e CaO livre, tornando essa cinza um material altamente reativo [4].

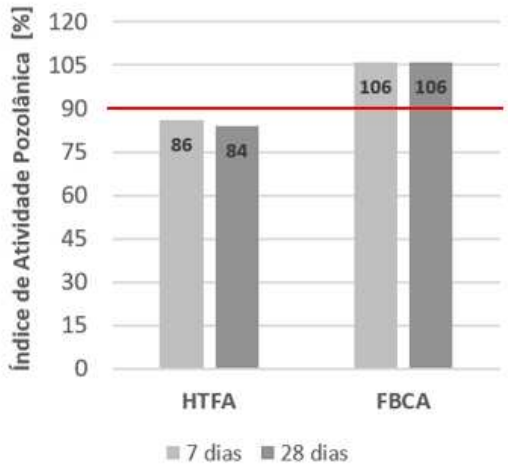
Assim, de acordo com os requisitos químicos da NBR 12.653/2014, a HTFA é caracterizada como uma pozolana classe C enquanto que a FBCA apresenta características da classe E. Entretanto, segundo os requisitos físicos dessa norma, a HTFA não pode ser considerada uma pozolana pois seu Índice de Atividade Pozolânica (IAP) é inferior a 90%. De acordo com a Figura 1, é possível verificar que a FBCA não só apresenta uma reatividade maior que a HTFA, como esperado, mas também atente aos critérios da norma em questão.

Tabela 1 – Composição química do cimento Portland, cinza volante de alta temperatura (HTFA) e cinza volante de leito fluidizado (FBCA)

Material	CaO [%]	SiO2 [%]	Al3O2 [%]	Fe_2O_3 [%]	MgO [%]	CaO livre	Sulfatos, tipo (SO_4^{2-})
CPI	61,68	20,41	4,42	2,50	1,4	nd	nd
HTFA	3,91	51,60	24,10	5,44	2,29	nd	nd
FBCA	25,40	34,00	20,10	4,44	0,933	11,1	9,92

nd: não determinado

Figura 1 - Índice de Atividade Pozolânica para amostras com HTFA e FBCA aos 7 e 28 dias determinado de acordo com à NBR 5752/14.



De acordo com a Figura 2 é possível perceber distribuição volumétrica das partículas é semelhante. Entretanto, o diâmetro mediano (D50) dos grãos das cinzas volantes é maior que o do cimento Portland. Além disso, nota-se que a HTFA possui um D50 maior que a FBCA.

Apesar da distribuição das partículas das cinzas ser bastante similar, sua morfologia é bastante distinta, como pode ser observado na Figura 3. Uma vez que a HTFA é obtida através de uma queima a altas temperaturas, a combustão é altamente eficiente, originando um resíduo com formato esférico bem definido e uma superfície com textura lisa Figura 3(a). Já a FBCA, por ter sido queimada a temperaturas mais baixas, é decorrente de uma combustão parcial, e por isso apresenta uma superfície irregular e com textura mais rugosa Figura 3(b). Ademais, também em função da eficiência da combustão, pode ser observado na Figura 3 que a FBCA apresenta tamanho de grãos um pouco maior que a HTFA. Essas características da superfície dos grãos de FBCA também podem ser relacionadas a maior reatividade dessa cinza se comparada com a HTFA.

Além disso, o baixo teor de cálcio da HTFA tende a deixar essa cinza mais cristalina e, consequentemente, menos reativa.

Figura 2: Gráfico de distribuição granulométrica de partículas de cimento e cinzas volantes.

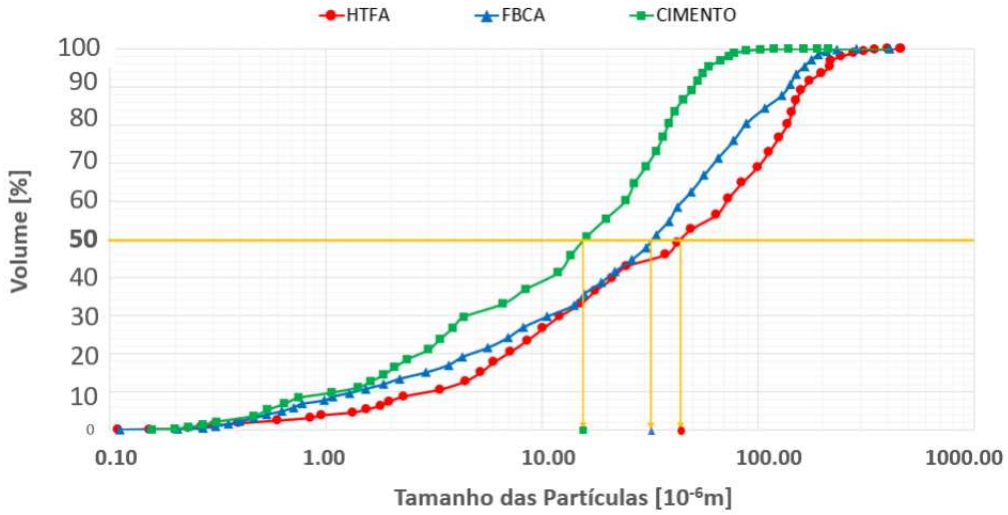
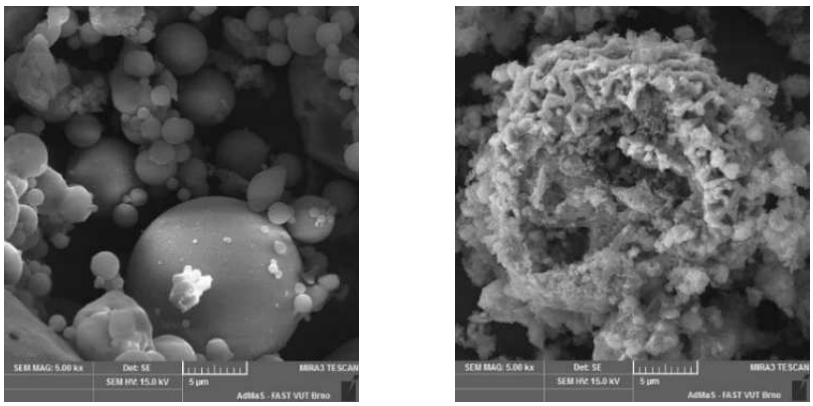


Figura 3 - Morfologia das cinzas volante estudadas (ampliação de 5000x).



(a) HTFA **(b) FBCA**

2.2. Metodologia dos ensaios em pastas

Quatro pastas de cimento foram confeccionadas com 750g de material cimentante em composições distintas. Duas dessas pastas podem ser consideradas como referência, uma composta apenas por cimento Portland (C) e a outra com substituição em massa de 43% de cimento por HTFA (C+ 43H). A escolha dessa porcentagem se deu por ser um valor típico utilizado na República Tcheca. As outras duas pastas contam com a substituição de 9% (C+(34H +9F)) e 13% (C+(30H+13F)) da HTFA por FBCA, mantendo os 43% de substituição do cimento. Os baixos teores de FBCA utilizados tem como justificativa a expansão da amostra quando a adição dessa cinza supera os 30%, devido ao alto teor de sulfatos e cal livre da presentes. Para evitar essa variação dimensional

e, consequentemente, possíveis fissuras, é recomendável que a porcentagem de FBCA na pasta seja inferior a 20% [6].

Uma vez que os diferentes tipos de material cimentante demandam dosagens de água distintas, a relação água/material cimentício (a/mc) foi variada de modo a obter pastas com a mesma trabalhabilidade. A Tabela 2 mostra a relação a/mc adotada para cada amostras em cada ensaio.

Tabela 2 – Relação a/mc das amostras para cada ensaio com pasta de cimento

Amostra	Calor de Hidratação	Reologia (1º ensaio)	Reologia (2º ensaio)	Retração Química
C	0,32	0,42	0,35	0,35
C+(43H)	0,34	0,42	0,36	0,36
C+(34H+9F)	0,37	0,42	0,40	0,40
C+(30H+13F)	0,39	0,42	0,42	0,42

Para medir o calor de hidratação das amostras foi utilizado um calorímetro de isolamento parcial, isto é, semi-adiabático, de acordo com a norma europeia EM 196-9 [7]. Os parâmetros de ensaio foram: umidade de 50%, duração de 48 horas e temperatura do ambiente constante de 20ºC.

A variação da viscosidade das amostras em função dos teores de cinzas e água foi determinada em um viscosímetro *Viskomat NT*. Durante o ensaio, a rotação foi mantida constante em 100 rpm, o volume da amostra também permaneceu constante e o recipiente foi mantido a uma temperatura de 20ºC enquanto a temperatura da pasta foi monitorada.

Para medir a contração de le Chatelier associadas as amostras foi utilizado o *Shrinkage Cone,* que mede a retração de materiais cimentícios fluidos com um feixe de laser, não havendo assim, acoplamento mecânico entre o fluido e o sensor. A mudança de comprimento da amostra foi registrada com uma resolução de 1/10 mícron [8].

A análise da morfologia dos materiais e das pastas foi feita por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura com emissão de campo *Tescan Mira 3*. Desse modo, foram geradas imagens com uma ampliação de 5000x para as argamassas C(34H+9F) e C+(30H13F) após 28 dias de cura.

2.3. Metodologia dos ensaios em argamassas

Foram elaboradas quatro argamassas com a mesma composição de material cimentante das pastas. O traço em massa foi de 1:3 (material cimentício: areia), e a relação água cimento, assim como nas pastas, foi variada (C = 0,40; C+(43H) = 0,41; C+(34H+9F) = 0,45 e C+(30H+13F) = 0,47)

para que as argamassas obtivessem a mesma trabalhabilidade. Vale ressaltar que não foram usados aditivos químicos porque, além de serem mais uma variável nas análises, alguns aditivos poderiam influenciar os resultados do ensaio de calorimetria. Por outro lado, a utilização de aditivos redutores de água compatíveis com as cinzas permitiria uma análise mais precisa dos efeitos nas propriedades mecânicas. Para cada dosagem foram produzidos dois corpos de prova (40 x 40 x 160 mm) por idade avaliada (2, 7, 14 e 28 dias), totalizando 8 amostras. O procedimento de produção e cura das argamassas foi similar ao descrito pela norma brasileira NBR7215/1996.

A densidade de massa foi calculada através da razão entre a massa e o volume das amostras produzidas. Desse modo, todas as amostras foram pesadas em balanças digitais de precisão e tiveram suas dimensões aferidas. A média de cada par de amostra gerou os resultados referentes à cada composição nas idades de 2, 7, 14 e 28 dias.

Para o ensaio de resistência à tração na flexão em 3 pontos foi utilizada uma máquina de teste da *RATIO TEC Prüfsysteme GmbH* com célula de carga de 350 N. Foram ensaiados dois corpos de prova para cada uma das composições para cada idade de cura, logo após a determinação da densidade de massa. A amostra foi posicionada horizontalmente sobre dois apoios distantes 300mm e ensaiada a uma velocidade de 0,06kN/s.

Para o ensaio de resistência à compressão foi utilizada uma máquina de teste de compressão da RATIO TEC Prüfsysteme GmbH com célula de carga de 100kN. Esse ensaio foi realizado logo após ao teste de resistência a tração na flexão em 3 pontos, uma vez que após a ruptura a amostra se apresenta como duas metades com formato próximo ao de um cubo. Desse modo, cada metade foi ensaiada à compressão, totalizando 4 corpos de prova de cada composição, a uma velocidade de 2,4kN/s.

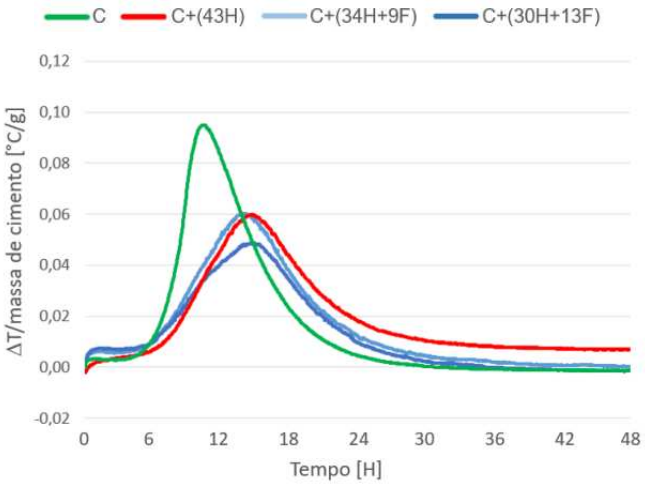
Como foi adotada uma relação a/mc variável, para se analisar a influência das cinzas volantes na resistência das amostras foi necessário realizar uma normalização das resistências à compressão. Para isso foi utilizado o ábaco *British Standard Method mix design* [9]. Com isso foi possível estimar a resistência à compressão da amostra de referência para cada uma das relações a/mc das argamassas e posteriormente comparar com as resistências das argamassas com cinza volante. Essa comparação foi realizada apenas para 28 dias de cura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.2. Ensaios em pastas de cimento

Os resultados fornecidos pelo calorímetro semi-adiabático foram processados e a Figura 4 apresenta variação da temperatura (em relação a temperatura inicial) pela massa de cimento de cada amostra até 48 horas de ensaio.

Figura 4 – Variação de temperatura por massa de cimento ao longo do tempo das pastas de cimento estudadas



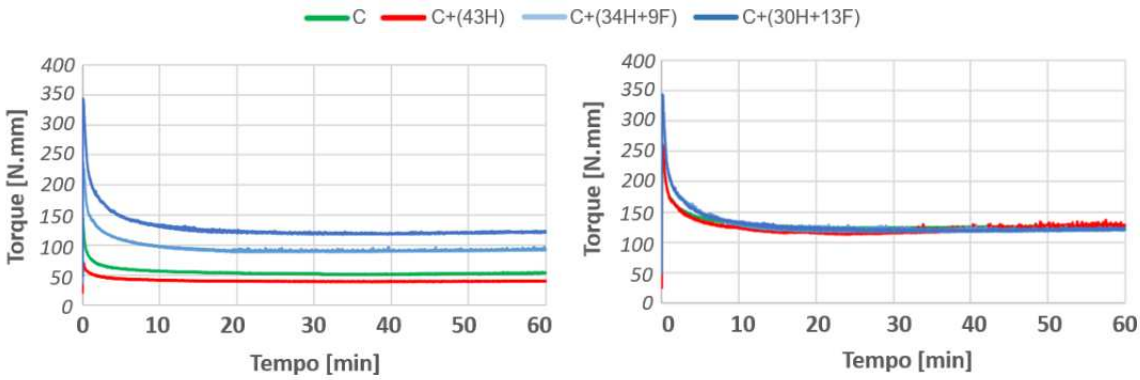
Apesar da reatividade da FBCA ser maior que a da HTFA, não foi possível observar grandes variações no pico principal para as pastas confeccionadas com essas cinzas. Isso ocorreu porque apenas uma pequena porção da HTFA foi substituída pela por FBCA. Entretanto, foi possível verificar que o pico exotérmico principal, para as amostras com cinzas não só foi retardado em cerca de 4 horas, como também foi, aproximadamente, 58% menor do que o pico da pasta apenas com cimento. Essa redução de calor liberado está associada ao fato de que reação de hidratação do cimento é termoativada, isto é, o calor gerado pela reação é utilizado para potencializar a sua cinética. Uma vez que a termoativação acelera as reações de hidratação, a maior inclinação da curva de calorimetria da pasta de referência, entre 6 e 10 horas, é justificada por esse fenômeno.

Além disso, vale ressaltar que, na primeira hora do ensaio, as amostras com adição de FBCA apresentaram um pico exotérmico inicial maior que o da pasta com HTFA, chegando a se aproximar com a curva do cimento puro. Essa maior liberação de calor no início da reação se deu, provavelmente, devido à formação de mais etringita pela maior quantidade de sulfatos na FBCA.

Quanto as propriedades reológicas, no primeiro ensaio, onde a relação água/material cimentício foi mantida em 0,42, foi possível observar que a substituição parcial do cimento Portland por HTFA levou a uma leve redução do valor do torque em relação ao cimento puro, caracterizando uma

menor viscosidade dessa amostra, como pode ser observado na Figura 5(a). Entretanto, verificou-se que ao substituir parte da HTFA por FBCA os torques associados a essas amostras foram superiores ao da amostra de cimento puro, caracterizando pastas mais viscosas, ou seja, com menor trabalhabilidade. Além disso, foi possível constatar que, quanto maior a proporção de HTFA na pasta, maior é o torque, e, consequentemente, maior é a viscosidade.

Figura 5 – Torque em função do tempo para as diferentes pastas estudadas



(a) relação a/mc 0,42 **(b) relação a/mc variável para torque contante**

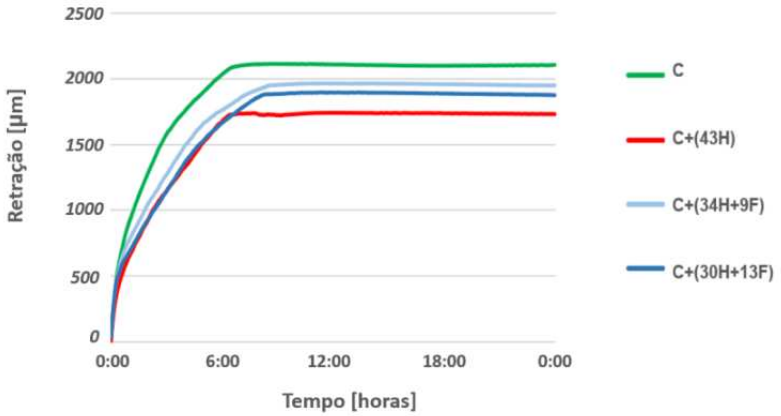
Essas variações no aspecto reológico da pasta de cimento estão diretamente relacionadas com os fenômenos de superfície, pois quanto maior a superfície de contato e o imbricamento dos grãos maior é a viscosidade e a coesão associadas. Uma vez que a FBCA apresenta um formato irregular e é mais porosa que a HTFA, a sua superfície específica tende a ser maior, contribuindo assim para valores de viscosidade e coesão maiores. Vale destacar que a pasta com HTFA apresentou viscosidade menor que a pasta contendo apenas cimento, devido a morfologia esférica dessa cinza que favorece a dissipação viscosa do fluido.

No segundo ensaio (Figura 5(b)), ao invés de manter a relação a/mc constante, manteve como referência o torque da pasta que apresentou maior viscosidade no ensaio anterior, a amostra C+(30H+13F). Sendo assim, para aumentar a viscosidade das amostras, as relações a/mc tiveram que ser reduzidas. A redução foi mais significativa para as amostras de cimento puro e a C+(43H) equivalendo 17% e 14%, respectivamente. Já para a C+(34H+9F) essa variação foi de menos 5%. Uma vez que a redução na relação a/mc, para uma mesma proporção de material cimentante, implica em uma redução do volume de água adicionado na mistura, nota-se que, como esperado, foram necessárias maiores reduções de água nas pastas apenas com cimento e na pasta C+(43H), sendo intermediária a pasta com utilização de 9% de FBCA.

O ensaio da contração de Le Chatelier foi realizado desde instantes após do contato da água com o

cimento até a consolidação do patamar de percolação. Quando o patamar de percolação é formado a contração de Le Chatelier é máxima e a pasta começa a adquirir propriedades de um sólido. Essa transição pode ser visualizada na Figura 6 quando as curvas de retração deixam de crescer e se tornam constantes no tempo. A partir desse momento, a retração é decorrente da sucção de água para a hidratação (retração autógena) e não é detectada pelo instrumento de medida utilizado.

Figura 6 – Contração de Le Chatelier das diferentes pastas estudadas em função do tempo

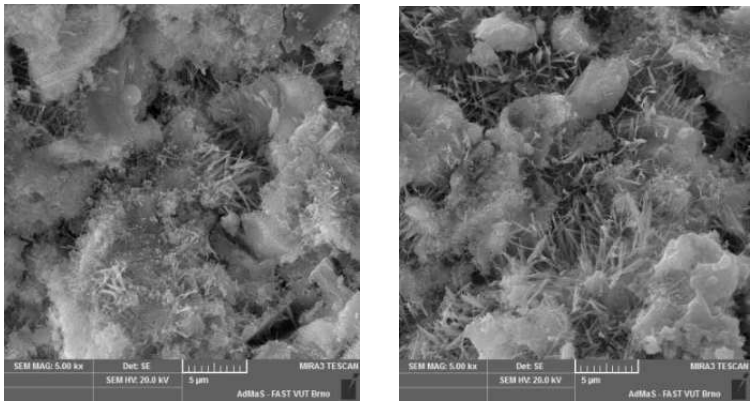


Foi possível observar pela Figura 6 que, enquanto a maior retração química ocorreu para a pasta de cimento sem adições devido a sua maior atividade química, a menor retração foi da amostra com a cinza com menor reatividade, (HTFA). As amostras com teores de FBCA apresentaram valores intermediários de retração, isto porque, parte da HTFA foi substituída por FBCA (cinza com atividade pozolanica) aumentando, assim, a retração dessas amostras. Entretanto, ao contrário do que se esperava para essas amostras, a pasta com menor concentração de FBCA apresentou uma contração maior do que a pasta com mais FBCA. Esse resultado pode estar relacionado a teores mais altos de CaO livre e gesso na amostra com mais FBCA. A presença desses componentes na pasta faz com que haja maior expansão da amostra, reduzindo a contração. Assim, uma possível justificativa para o resultado encontrado é que ao reduzir os teores de HTFA e, consequentemente, aumentar os de FBCA, ocorre uma certa compensação entre a expansão e a retração da pasta.

Além disso, os resultados do ensaio de retração química mostraram que as amostras com cinzas volantes do tipo FBCA demoraram mais para se solidificar e iniciar a retração autógena. Esse atraso, em relação as outras amostras, retarda o tempo de pega das pastas com esses aditivos. Sendo o tempo para atingir o patamar de percolação diretamente proporcional ao teor de gesso na amostra, pode-se dizer que a FBCA possui maior teor de gesso em sua composição, aumentando assim, o tempo de trabalhabilidade das pastas com essa cinza.

A microestrutura da pasta, obtida por meio de microscopia eletrônica de varredura em amostras fraturadas, na idade de 28 dias de cura, foi realizada apenas para as amostras com FBCA com o intuito de identificar as alterações na microestrutura para diferentes teores dessa cinza. Comparando-se as Figuras 7(a) e 7b) foi possível verificar que um maior teor de FBCA na pasta leva a uma maior produção de etringita, visualizada como as pequenas agulhas presentes nas imagens. Isso ocorre devido ao aumento de $CaSO_4$ disponível na pasta que ao reagir com a água e os aluminatos presentes no cimento forma esse componente.

Figura 7 – Microestrutura da pasta de cimento com FBCA após 28 dias de cura (ampliação de 5000x).



(a) C+(34H+9F) **(b) C+(30H+13F)**

3.3. Ensaios em argamassas

A substituição do cimento Portland por cinzas volantes, sejam elas HTFA ou FBCA, não proporcionou grandes variações na densidade de massa das argamassas de cimento ao longo do tempo (Figura 8). Entretanto, foi possível observar que houve uma ligeira redução na densidade de massa com a substituição do cimento por cinzas volantes. Essa variação na densidade mássica das amostras pode estar associada tanto ao aumento da relação a/mc quanto à menor massa específica das cinzas em relação ao cimento. Enquanto a massa específica do cimento Portland CPI é cerca de 3,11 g/cm³ e da HTFA varia entre 1,90 e 2,20 g/cm3 [10] e a massa específica da FBCA fica entorno de 2,28 g/cm³ [11]. Apesar da FBCA ser mais densa que a HTFA, elas podem apresentar valores muito próximos em determinadas situações. Entretanto, em qualquer circunstância, ambas as cinzas apresentam uma massa específica consideravelmente mais baixa que a do cimento.

Quando as resistências experimentais das argamassas são comparadas (Figura 9), é possível perceber que a adição de cinzas volantes reduziu consideravelmente as propriedades mecânicas das amostras, chegando a uma perda de aproximadamente 45% no pior dos casos, não entanto não houve grandes variações entre as amostras com cinzas.

Figura 8 – Densidade de Massa Aparente das Argamassas aos 2, 7, 14 e 28 dias.

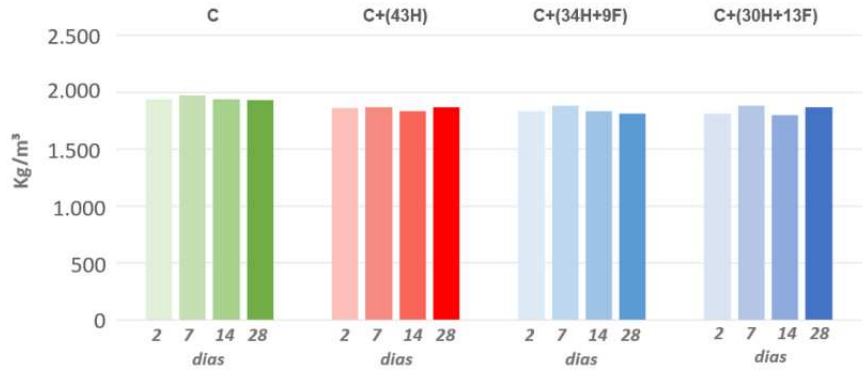
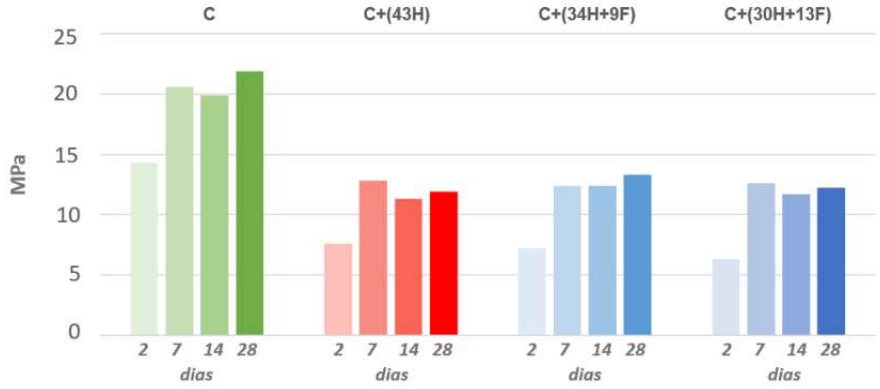


Figura 9 – Resistência à Compressão Axial aos 2, 7, 14 e 28 dias.

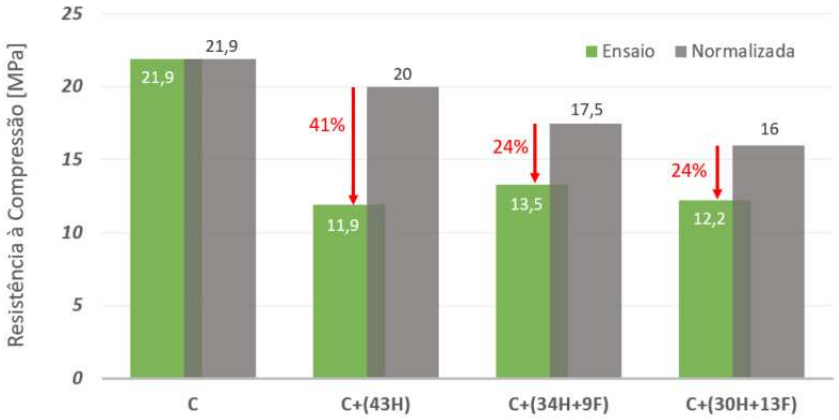


Contudo, como explicitado anteriormente, esses resultados são decorrentes da combinação dos efeitos de substituição do cimento por cinzas volantes e da variação da relação a/mc e, portanto, não representam uma base comparativa adequada para se avaliar a influência das cinzas nas amostras. Sendo assim, a comparação das resistências experimentais com suas respectivas resistências normalizadas, estimadas para mesmas relações a/mc, são apresentadas na Figura 10.

Foi possível observar que mesmo em relação as amostras normalizadas, em todos os casos, houve uma perda de resistência à compressão ao se adicionar cinzas na mistura. É interessante notar que, para o caso da amostra C+(43H) a resistência foi reduzida em 41%, porcentagem essa quase equivalente ao teor de substituição de cimento por essa cinza (43%). Tal fato pode ser justificado pela HTFA não ser uma pozolana. Uma vez que a FBCA apresenta, tanto uma maior atividade pozolânica, como também um teor de cálcio mais elevado, a substituição parcial da HTFA por FBCA proporcionou uma menor perda de resistência das argamassas. Desse modo, a adição de FBCA à mistura melhorou a resistência das argamassas em relação à C+(43H). Além disso, foi possível verificar que mesmo como teores distintos de FBCA, as amostras com adição dessa cinza apresentaram 24% de perda de resistência em relação às amostras normalizadas. Sendo assim, a

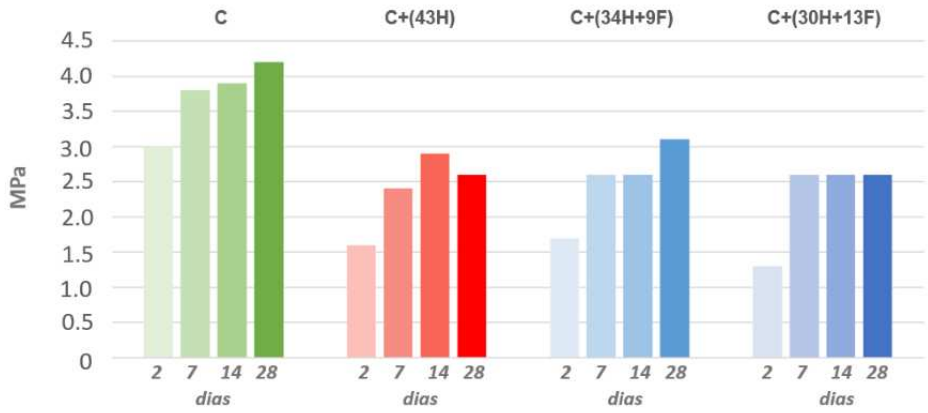
argamassa com 13% de substituição de HTFA por FBCA foi a que apresentou melhor desempenho, isso porque, mesmo com maior teor de FBCA sua resistência a compressão quase não sofreu alterações em relação à da amostra com menor porcentagem dessa cinza.

Figura 10 – Comparação entre a resistência à compressão das argamassas com cinzas volantes e a argamassa de referência com a relação a/c normalizada.



O ensaio de resistência à tração na flexão mostrou que, assim como o ensaio de resistência à compressão, a substituição parcial de cimento Portland por cinzas volantes promoveu uma significativa redução da resistência mecânica da argamassa. Contudo, ao observar a Figura 11, é possível verificar uma leve variação da resistência aos 28 dias, entre as amostras com cinza. Dentre essas amostras, a argamassa com menor substituição parcial de HTFA por FBCA foi a que apresentou melhores resultados.

Figura 11 –Resistência à Tração das argamassas estudadas aos 2, 7, 14 e 28 dias.



Tendo em vista que, em estado endurecido, as argamassas se tornam extremamente rígidas e frágeis, a resistência à tração dessas amostras é significativamente menor que à resistência a compressão. Assim, ao se se fazer a relação resistência à tração na flexão e resistência à

compressão, foi possível observar que para todas as idades a essa relação foi de cerca de 20%, estando de acordo com a literatura [12].

Mesmo sendo possível dizer que a FBCA, quando utilizada em conjunto com a HTFA, pode atuar na melhoria das propriedades mecânicas da argamassa com aditivos minerais, ainda é necessário avaliar os aspectos de durabilidade. Isto porque, a presença de íons sulfato nas cinzas volantes do tipo FBCA promovem a formação de etringita, elemento morfológico que altera as propriedades mecânicas dos materiais cimentícios [13]. Além disso, a presença de cal livre pode causar expansão excessiva do material, o que pode comprometer a sua durabilidade.

4. CONCLUSÃO

A substituição parcial de HTFA por FBCA apresentou resultados muito promissores no que diz respeito a melhorar a reatividade do aditivo mineral para aplicação em materiais a base de cimento:

- Além de possuir atividade pozolânica, a FBCA também apresentou maior teor de CaO e sulfatos e uma superfície mais irregular e rugosa, quando comparada à HTFA.
- As pastas com adição de FBCA apresentaram maior viscosidade, maior retração química e também maior tempo para atingir o patamar de percolação.
- Apesar da substituição parcial da HTFA por FBCA não ter gerado grandes alterações na resistência à tração das amostras, a adição de FBCA melhorou consideravelmente o desempenho das argamassas no que diz respeito à resistência à compressão.

Assim, apesar da adição de FBCA ter demonstrado potencial como substituta parcial da HTFA, são necessários ensaios adicionais para avaliação da durabilidade da matriz cimentícia assim obtida.

5. AGRADECIMENTOS

Ao INCBAC, Instituto Tcheco-Brasileiro de Cooperação Acadêmica, que possibilitou o estreitamento das relações de pesquisa entre a Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ e a Universidade Tecnológica de Brno – VUT. Ao AdMAS Center, Centro de Pesquisa em Materiais e Estruturas Avançadas por disponibilizar os equipamentos necessários para as análises. À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de pós-graduação, concedida à primeira autora e pelo apoio à pesquisa Código de Financiamento 001.

6. REFERÊNCIAS

1. WORLD BUSINESS COUNCIL ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT, **Concrete Recycling - A Contribution to Sustainability**, Draft version, 2008
2. KHALEEL, O.; RAZAK H. **The effect of powder type on the setting time and self compactability of mortar**. Constr Build Mater; 36:20–6. 2012
3. ANEEL. Atlas de Energia Elétrica 2ª Edição. Capítulo 8: **Carvão mineral**. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao(2).pdf Acesso: 20/09/2018.
4. ŠILER, P.; BAYER, P.; SEHNAL, T.; KOLARˇOVA, I.; OPRAVIL, T.; ŠOUKAL, F. **Effects of high-temperature fly ash and fluidized bed combustion ash on the hydration of Portland cement.** Construction and Building Materials 78, p.181–p.188. 2015
5. GONÇALVES, C. S. **Estudo de cinzas volantes de alta temperatura e de leito fluidizado visando a produção de materiais sustentáveis a base de cimento.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
6. WU, T.; CHI, M.; HUANG, R. **Characteristics of CFBC fly ash and properties of cement-based composites with CFBC fly ash and coal-fired fly ash.** Construction and Building Materials 66, p.172–p.180, 2014.
7. NORMA EUROPEIA. **EN 196-9** - Métodos de ensaio de cimentos Parte 9: Calor de hidratação Método semi-adiabático. 2010.
8. SCHLEIBINGER, **Schleibinger Testing System: Shrinkage-Cone**. Disponível em: http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Shrinkage:Shrinkage-Cone. Acesso em: 28/06/2018
9. ELTAF, MOHAMMAD. **Concrete Mixed Design Method (BS Method) Concrete Mix Design procedure.** Disponível em: https://www.academia.edu/28425556/Concrete_Mixed_Design_Method_BS_Method_Concrete_Mix_Design_procedure. Acesso em: 23/09/2018
10. SILVA, N. I. Warpechowski da et al. **Characterization of fly ash for ceramic use.** Cerâmica [online]. 1999, vol.45, n.296, pp.184-187. ISSN 0366-6913.
11. NOGUEIRA, L. P. P., **Tecnologias de Baixo Carbono Aplicáveis aos Setores Chave do Brasil** – Setor Industrial. Disponível em: http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/opcoes_mitigacao/paginas/tecnologias_bc.html. Acesso em: 02/02/2018
12. FARIAS, L. A.; LOPES, A. N. M.; STIVAL, M. L.; ANDRADE, M. A. S.; BITTENCOURT, R. M. **Ensaios de Tração Direta em Corpos de Prova de Concreto**. Disponível em: http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081127104112-209.pdf. Acesso: 23/09/2018.
13. HANISKOVÁ, D.; BARTONÍKOVÁ, E.; KOPLÍK, J.; OPRAVIL, T. **The ash from fluidized bed combustion as a donor of sulfates to the Portland clinker**. Procedia Engineering 151 p.394 – p.401. International Conference on Ecology and new Building materials and products, ICEBMP 2016.