

Cinzas volantes álcali-ativadas com solução combinada de NaOH e Ca(OH)₂

Vargas, A.S.^I; Dal Molin, D.C.C.^{II}; Vilela, A.C.F.^{III}; Jalali, S.^{IV}; Gomes, J.C.^V

^ICentro Universitário Feevale, Novo Hamburgo (RS)- Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental
e-mail: alexandrev@feevale.br

^{II}Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
e-mail: dmolin@ufrgs.br

^{III}Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
e-mail: vilela@ufrgs.br

^{IV}Universidade do Minho/Portugal –Departamento de Engenharia Civil
e-mail: said@civil.uminho.pt

^VUniversidade da Beira Interior/Portugal - Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
e-mail: castro.gomes@ubi.pt

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento da resistência à compressão, ao longo do tempo, em amostras de argamassas à base de cinzas volantes álcali-ativadas. Como ativador alcalino foi utilizada uma solução combinada de NaOH e Ca(OH)₂. A cura das amostras foi realizada de duas formas distintas. Na primeira, as amostras foram mantidas em estufa à 70°C/12 h e à temperatura constante de 22°C em sala climatizada até a idade de ensaio. Apesar de serem obtidas resistências da ordem de 20 MPa nas primeiras 24 h, houve decréscimo da resistência a partir da idade de 7 dias. Verificado esse comportamento, um segundo método de cura foi adotado. Para isso, o traço utilizado para o preparo de novas argamassas foi o mesmo adotado no método anterior. Porém, foram submetidas à temperatura constante de 70°C até a idade de ensaio. Nesse caso, as amostras apresentaram decréscimo mais acentuado da resistência em menor espaço de tempo, quando comparado às amostras curadas no primeiro método. Como estudos complementares foram realizadas análises microestruturais da CV antes e depois da álcali-ativação, utilizando o MEV/EDS. Nas imagens microestruturais foi possível identificar três morfologias distintas nas pastas álcali-ativadas: uma composta de regiões com aspecto denso; outra apresentando partículas de cinzas volantes parcialmente solubilizadas; e outra mostrando a formação de produtos em forma de cristais aciculares. Porém, apenas o uso do MEV/EDS não foi suficiente para que se pudesse entender o mecanismo de reação deletéria provocada entre os ativadores alcalinos e a cinza volante. Portanto, trabalhos futuros deverão contemplar o uso de ferramentas auxiliares às adotadas nesse trabalho com o objetivo de esclarecer tal mecanismo deletério.

Palavras chaves: Cinzas volantes; ativação alcalina; resíduos.

Fly ash alkali-activated with NaOH and Ca(OH)₂ solution

ABSTRACT

The main objective of this work was to evaluate over time the development of the compressive strength of alkali-activated fly ash mortars. A combined solution of NaOH and Ca(OH)₂ was used as alkaline activator. The curing of the samples was carried out in two distinct ways. In the first one, samples were kept at 70°C during the first 12 hours after mixing and at 22°C afterwards, until the age of testing. Although compressive strengths of about 20 MPa were achieved during the first 24 hours, the strength started to decrease after 7 days. Considering this behaviour, a second method of curing was adopted. The mix proportions were the same as before, however the mortar samples were kept in an oven at 70°C until the age of testing. In this case, the compressive strength values decreased more significantly and in a shorter period of time, as compared to the results obtained for samples cured using the first method. Complementary studies were performed in order to better understand the observed reduction in compressive strength. Microstructural

analyses of the fly ash, before and after the alkali-activation, have been carried out using Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy-Dispersive Spectroscopy (EDS). It was possible to identify three different morphologies in the alkali-activated pastes: one composed by regions with dense aspect; other showing partially solubilised particles of fly ash; and a third showing the formation of products with a needle-like shape. The information provided by the SEM/EDS experiments was not enough to enable the complete understanding of the mechanism of the deleterious reaction that took place among the alkaline activators and the fly ash. Therefore, future studies should address this question by using additional analysis tools in order to clarify this deleterious mechanism.

Keywords: Fly ash, alkali-activation, waste

1 INTRODUÇÃO

As cinzas volantes (CV) são subprodutos obtidos na geração de energia elétrica, a partir do carvão mineral, em usinas termelétricas. Como possuem propriedades pozolânicas, são adquiridas pelas indústrias cimenteiras e concretreiras. Entretanto, estas não conseguem absorver toda a cinza gerada, havendo sérios problemas ambientais e econômicos quanto a sua disposição.

Como exemplo, cita-se a termelétrica Presidente Médice, localizada na cidade de Candiota – RS, na qual apenas 15% das CV geradas são comercializadas. O excedente é disposto no meio ambiente como material de aterro nas áreas de extração do carvão mineral.

Como possível solução para as CV excedentes das termelétricas, se tem os cimentos álcali-ativados. Estes cimentos são diferentes dos cimentos Portland, pois são obtidos em um ambiente fortemente alcalino, não sendo necessária a presença de clínquer.

PALOMO *et al.* [1] comentam que a álcali-ativação, muitas vezes dita geopolimerização, é um processo químico que permite ao usuário transformar estruturas vítreas (parcialmente ou totalmente amorfas e/ou metaestáveis) em um compósito bem compactado e cimentante. VAN JAARSVELD *et al.* [2] complementam que para ocorrer a polimerização do material precursor é necessário um meio fortemente alcalino para ser possível dissolver certa quantidade de sílica e alumina, assim como hidrolisar a superfície das partículas das matérias-primas.

Para FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.* [3], o estudo da álcali-ativação poderia ser dividido em 2 modelos principais:

- Álcali-ativação das escórias granuladas de alto-forno (EGAF), que apesar de pesquisada e utilizada há bastante tempo, ainda persistem algumas controvérsias a respeito da natureza dos produtos de reação;
- Álcali-ativação de certas argilas calcinadas (principalmente o metacaulim) e de CV. Esse modelo, por ser bem mais recente quando comparado ao primeiro, tem obtido destaque na literatura nos últimos anos.

PALOMO *et al.* [1] complementam que as duas principais diferenças caracterizadas por ambos modelos de álcali-ativação seriam:

- Composição do material a ser álcali-ativado: essencialmente, *Si* e *Ca* no primeiro caso, enquanto *Si* e *Al* dominantes no segundo;
- Concentração do ativador: baixo ou moderado para o primeiro modelo e alto para o segundo.

Trabalhos como os de ROY [4], BARBOSA *et al.* [5], SILVA *et al.* [6], PUERTAS *et al.* [7], têm mostrado que produtos à base de cimentos álcali-ativados muitas vezes apresentam características mecânicas, de durabilidade e ambientais superiores às dos produtos à base de cimento Portland.

Resistências à compressão da ordem 40 MPa foram obtidas em pastas à base de cinzas volantes álcali-ativadas (CVAA) em apenas 2 h, bastando para isso cura térmica à 85°C [1].

Assim, esse trabalho teve como objetivo principal avaliar o comportamento da resistência à compressão, ao longo do tempo, em amostras de argamassas à base de CVAA, utilizando para isso soluções combinadas de *NaOH* e *Ca(OH)₂*. Como estudos complementares foram realizadas análises microestruturais da CV antes e depois da álcali-ativação, utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV), com imagens de elétrons secundários, acoplado com microsonda eletrônica (EDS).

2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1 Materiais

A amostra de CV foi proveniente de uma usina termelétrica localizada no RS. O espectro de difração de raios X – Figura 1 - mostrou características de um material amorfo, contendo picos cristalinos de quartzo, mulita e hematita.

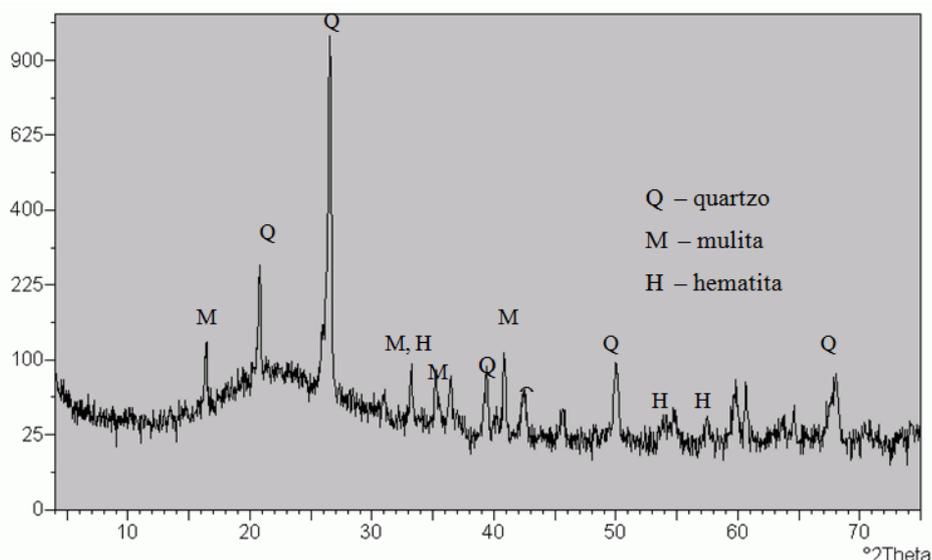


Figura 1: Espectro de difração de raios X da amostra de cinza volante

O diâmetro médio das partículas de CV foi 29,21 μm , determinado com o auxílio do granulômetro à laser marca CILAS. A massa específica de 2,05 g/cm^3 foi determinada utilizando os procedimentos da NBR 6474 [8]. A composição química da CV foi determinada por fluorescência de raios X e está apresentada na forma de óxidos na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química da cinza volante (% em massa).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂	MgO	K ₂ O	SO ₄
70,79	14,65	2,65	5,90	0,132	2,195	0,261	2,35	0,496

O agregado miúdo utilizado foi areia quartzosa de dimensão máxima de 4,8 mm e módulo de finura de 2,55.

O NaOH e o Ca(OH)₂ utilizados apresentavam índices de pureza de 97% e 99%, respectivamente.

2.2 Metodologia

Em um misturador magnético, nos 10 minutos iniciais, foram misturados o NaOH e a água. A essa solução foi adicionado o Ca(OH)₂ e realizada a mistura por mais 15 minutos, sendo obtida a solução ativadora. Essa solução foi utilizada apenas quando completado seu resfriamento.

Na Tabela 2 estão apresentadas as relações molares utilizadas para o preparado das argamassas álcali-ativadas. Essas relações são referentes ao conjunto CV + ativadores e foram estabelecidas a partir da composição química da CV e do índice de pureza dos ativadores alcalinos. A relação água/aglomerante adotada para o preparo das argamassas foi de 0,54. Esse índice leva em consideração a água presente no NaOH. A relação em massa de CV:agregado miúdo foi de 1:2.

A mistura da CV e da solução ativadora foi realizada em uma argamassadeira. Para essa mistura o equipamento foi mantido em baixa velocidade nos 4 minutos iniciais e em alta velocidade nos 3 minutos finais. Mesmo procedimento de mistura foi realizado entre a pasta álcali-ativada e o agregado miúdo. A argamassa álcali-ativada foi lançada em moldes cúbicos de aresta de 5 cm.

A cura da argamassa foi realizada de duas formas distintas. Na primeira, as amostras foram mantidas em estufa à 70°C/12h, e após esse período foram colocadas em sala climatizada à temperatura constante de 22°C. As idades adotadas para a determinação da resistência à compressão foram de 4 h, 6 h, 8 h, 10 h, 12 h, 24 h, 48 h, 7 dias e 28 dias. Essas idades são contadas a partir do momento em que as amostras foram colocadas na estufa. Como foi verificado decréscimo da resistência dessas amostras a partir da idade de 7 dias, foram preparadas novas amostras de argamassa utilizando as mesmas relações molares mostradas na Tabela 2. Porém, a cura dessas amostras foi realizada à temperatura constante de 70°C até a idade de ensaio. Esse procedimento foi adotado com o propósito de acelerar as reações deletérias e verificar o valor da resistência na idade de 28 dias. A temperatura de cura de 70°C foi adotada como uma temperatura intermediária às utilizadas por FAN *et al.* [9], que adotaram cura à 55°C, e FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.* [3], que adotaram cura à 85°C.

Tabela 2: Relações molares utilizadas para o preparo das amostras álcali-ativadas.

Relações molares (cinza volante + ativadores)	
S/Al	8,19
C/S	0,22
N/Al	2,47
N/S	0,30

S = SiO₂ ; C = CaO; Al = Al₂O₃;

As pastas analisadas no MEV/EDS foram preparadas utilizando as mesmas relações molares mostradas na Tabela 2. A cura foi realizada à temperatura 70°C/12h, sendo após colocadas em sala climatizada à 22°C. A caracterização microestrutural foi realizada nas amostras com idade de 28 dias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resistência à Compressão de Argamassas à base de Cinzas Volantes Álcali-ativadas

Na Tabela 3 são apresentadas as resistências à compressão das amostras de argamassas à base de CVAA, em distintas idades, submetidas aos dois métodos de cura: 70°C/12h, e após esse período as amostras foram colocadas em sala climatizada à 22°C até a idade de ensaio; temperatura constante de 70 °C até a idade de ensaio. O valor da resistência para cada idade é o resultado médio da resistência de três corpos-de-prova (CP).

Tabela 3: Resistência à compressão de amostras de argamassas à base de cinzas volantes álcali-ativadas submetidas aos dois métodos de cura.

Idade (horas)	Resistência (MPa)	
	Cura térmica 70 °C	
	12 h*	até idade de ruptura
4	0,82	0,59
6	2,71	1,60
8	14,16	9,57
10	14,63	17,53
12	18,47	18,54
24	19,40	21,41
48	20,08	8,88
7 dias	18,35	6,12
28 dias	10,71	5,00

*Após 12 h em estufa, as amostras foram colocadas em sala climatizada a temperatura de 22°C até a idade de ruptura

Na Tabela 3 é verificado que as amostras curadas à 70°C/12h apresentaram ganho de resistência até a idade de 48 h - 20 MPa. Esse resultado é superior aos obtidos em amostras à base de CVAA reportados por FAN *et al.* [9], JUESCHI *et al.* [10], VAN JAARSVELD *et al.* [11], para a mesma idade de ensaio. Contudo,

a partir da idade 7 dias houve um decréscimo da resistência verificado até a última idade de ensaio (28 dias). Isso provavelmente está relacionado a reações deletérias, a partir de fases metaestáveis formadas da combinação dos ativadores com a CV. Para as amostras curadas à temperatura constante de 70°C, as reações deletérias foram aceleradas, havendo queda acentuada da resistência a partir da idade de 48 h. Esse comportamento foi verificado até a idade de 28 dias.

Um estudo complementar mostrou que pastas à base de CVAA, preparadas com as mesmas relações molares mostradas na Tabela 2, apresentaram decréscimo na resistência à compressão semelhante ao verificado nas argamassas álcali-ativadas [12]. Isso descarta uma possível reação álcali-agregado.

Apesar de poucos trabalhos reportarem queda na resistência à compressão, muitas vezes porque a resistência foi determinada em idades iniciais, YIP *et al.* [13] verificaram que algumas matrizes à base de metacaulim e EGAF álcali-ativadas mostraram decréscimo da resistência ao longo do tempo, corroborando com os resultados dessa pesquisa. Os autores concluíram que o efeito deletério nas características mecânicas das matrizes álcali-ativadas estava relacionado ao teor de EGAF (contendo 43% de CaO) e ao Ms (relação molar entre o SiO_2/Na_2O). Para um ambiente mais alcalino (Ms = 1,2) o decréscimo da resistência foi percebido nas matrizes que possuíam teores de EGAF a partir de 40%. Por outro lado, para um aumento do Ms = 2 (menor quantidade de Na_2O) foi verificado decréscimo para as matrizes contendo teores de EGAF a partir de 60%.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.* [14] também verificaram declínio da resistência à compressão entre as idades de 1 e 28 dias em amostras à base de CVAA com solução de $NaOH$ (8M) submetidas à cura de 85°C/20 h. A CV utilizada apresentava teor de CaO de 9.6%.

Portanto, em matrizes que estejam presentes o Na_2O e o CaO , independente se na forma de ativadores alcalinos ou na forma de compostos constituintes das matérias-primas a serem álcali-ativadas, existem relações molares entre o Na_2O/CaO que poderão desencadear reações deletérias nas matrizes no estado endurecido.

3.2 Caracterização Microestrutural das Pastas à base de Cinzas Volantes Álcali-ativadas

As Figuras 2a e 2b mostram os aspectos morfológicos das partículas de CV antes do processo de álcali-ativação.

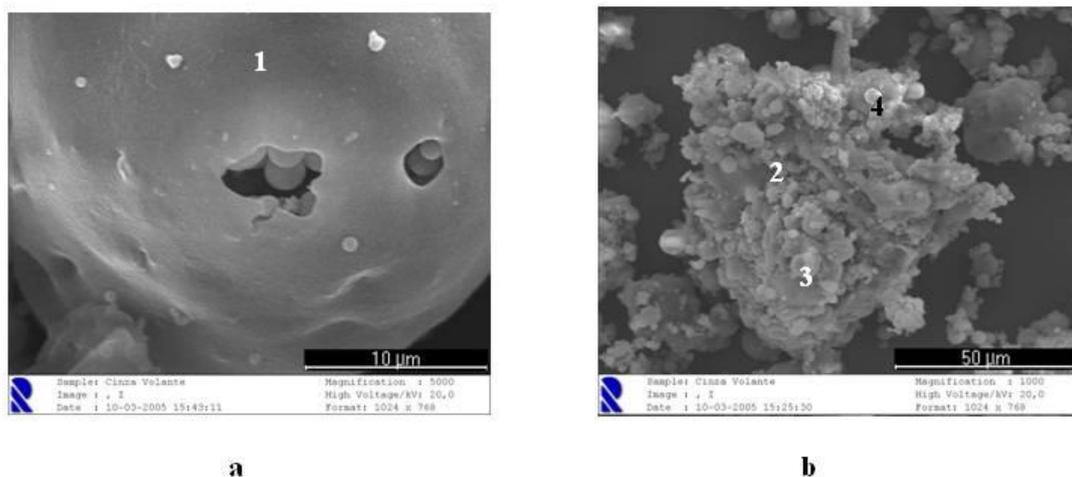


Figura 2: Micrografias (MEV por elétrons secundários) da cinza volante (CV) no seu estado natural
(a) plerosferas contendo partículas cenosféricas de CV (5.000X)
(b) aglomerado de partículas esféricas em uma partícula angulosa de CV (1000X)

Na Figura 2a é observada a presença de cenosferas (microesferas) no interior de uma partícula esférica de maior diâmetro, denominada plerosfera. Na Figura 2b são verificadas diversas partículas de CV aglomeradas em uma partícula de CV angulosa. Os números representam os locais em que foram realizadas as análises pontuais por EDS, cujos resultados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4: Análise química elementar semi-quantitativa das partículas de cinza volante, determinada com sonda EDS, cujos pontos de análise são apresentados nas Figuras 2a e 2b.

Posição	Teor (%)						
	O	Al	Si	Fe	Ti	K	Ca
1	45,09	15,26	35,73	1,19	1,24	1,45	-
2	54,26	13,29	29,20	1,99	-	1,23	-
3	42,67	13,59	31,03	8,15	1,21	1,92	1,39
4	61,89	9,64	24,18	1,37	-	1,03	1,88

Os resultados apresentados na Tabela 4 mostram que os elementos *Si* e *Al* são predominantes na CV. Esses resultados corroboram com os resultados apresentados na Tabela 1.

Na Figura 3a visualiza-se o aspecto superficial de uma plerosfera que foi parcialmente atacada pela solução alcalina. Na Figura 3b observa-se em detalhe a cenosfera assinalada na Figura 3a.

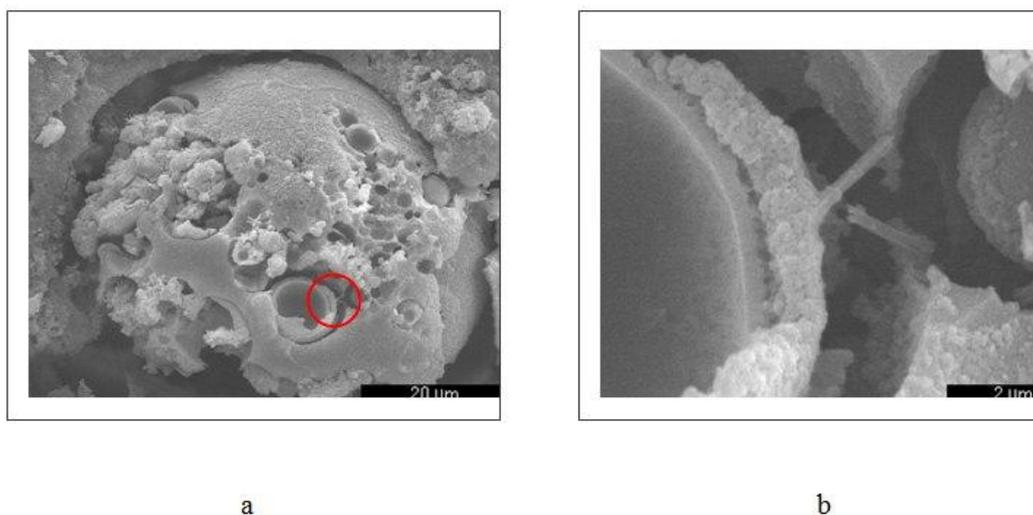


Figura 3: Aspecto morfológico de uma pasta à base de cinza volante álcali-ativada, com idade de 28 dias (a) plerosfera parcialmente solubilizada, permitindo a visualização das cenosferas contidas em seu interior (b) aspecto da casca externa da cenosfera atacada pelo ativador alcalino. Região assinalada na Figura 3a

A Figura 3a mostra o aspecto da superfície porosa de uma plerosfera de CV e também o aspecto das cenosferas presentes no seu interior, após seu contato com o ativador alcalino. Observa-se que o ativador alcalino atingiu as cenosferas somente após ocorrer a dissolução parcial da casca externa da plerosfera, mostrando que a polimerização da estrutura nas plerosferas ocorre do seu exterior para o interior, com o ataque às cenosferas. Essas observações estão de acordo com o modelo proposto para a álcali-ativação das partículas de CV apresentado por FERNANDEZ-JIMENEZ *et al.* [3].

Ressalta-se que as microesferas, por possuírem área superficial superior ao restante das partículas de CV, possuem reatividade mais elevada. Sua reação gera produtos de reação extra, empacotando a microestrutura e daí gerando aumento significativo na resistência.

A Figura 3b mostra de forma ilustrativa como ocorreu o processo parcial de álcali-ativação da cenosfera. A solução ativadora, após atacar de modo parcial a região externa da casca da cenosfera (aproximadamente 1 μm), não foi suficiente para solubilizá-la de forma efetiva, pois é observado que a região interna da casca (aproximadamente 0,3 μm) permaneceu estável.

Nas Figuras 4a e 4b são verificadas duas morfologias distintas na matriz álcali-ativada.

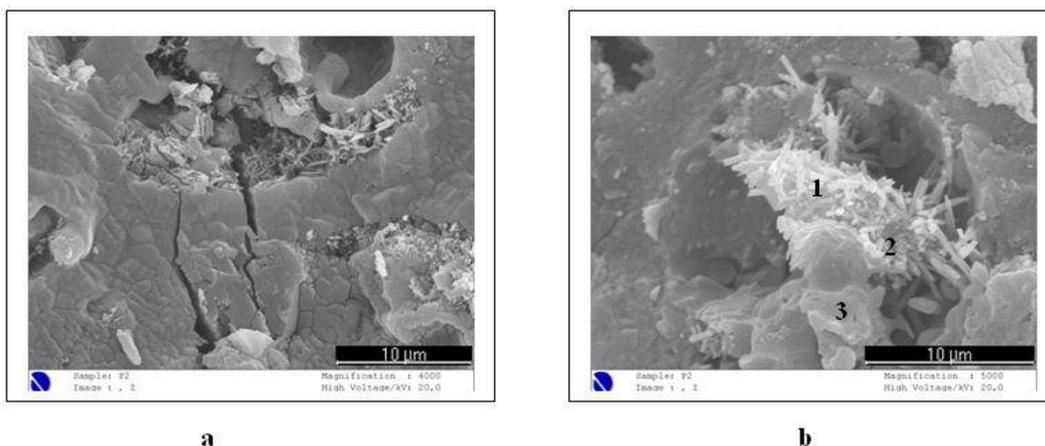


Figura 4: Formação de cristais na matriz álcali-ativada (a) microfissuras na matriz próximas aos cristais formados (b) a formação de compostos cristalinos sem a presença de microfissuras, em região distinta da apresentada na Figura 4a

A Figura 4a mostra a formação de cristais nos vazios da matriz álcali-ativada. Próximo a essa formação cristalina é verificada a presença de microfissuras, o que num primeiro momento poderia sugerir a formação de compostos expansivos responsáveis pelo aparecimento de tensões e formação dessas microfissuras. Entretanto, FERNÁNDEZ-FIMÉNEZ *et al.* [14] também observaram com o MEV presença de microfissuras em pastas à base de CVAA. Para os autores, elas poderiam ser geradas em consequência de alguns fatores: ou a cura térmica (85°C/20h), ou danos mecânicos durante a preparação das amostras, ou a retração por secagem no vácuo do MEV. Não foi possível a realização da análise química semi-quantitativa na região mostrada na Figura 4a.

Na Figura 4b observa-se uma formação cristalina identificada em outra região distinta da observada na Figura 4a. Foi realizada a análise química semi-quantitativa dessa estrutura nos pontos 1, 2 e 3. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Análise química elementar semi-quantitativa da formação cristalina mostrada na Figura 4b, com o auxílio do EDS.

Posição	Teor (%)				
	O	Al	Si	Na	Ca
1	51,32	17,40	21,22	5,23	4,81
2	50,50	16,68	24,77	4,82	3,13
3	50,15	22,64	20,32	4,17	2,72

Os resultados mostrados na Tabela 5 indicam a presença dos principais elementos formadores da matriz álcali-ativada. Apenas com a composição elementar não é suficiente determinar qual seria a fase cristalina formada. Porém, é comum a formação de zeólitas em matrizes álcali-ativadas, como apresentado por FERNÁNDEZ-FIMÉNEZ *et al.* [14]. Além disso, matrizes obtidas a partir de ativadores à base de NaOH, quando em concentrações molares elevadas, podem contribuir para que íons de Na⁺ fiquem livres na matriz e, através de sua reação com o CO₂ da atmosfera, formarem fases de Na₂CO₃.

Nesse sentido, trabalhos futuros contemplarão o uso do difratômetro de raios X com o objetivo de ser realizada a caracterização mineralógica de amostras álcali-ativadas, sendo possível, desta forma, a identificação de fases cristalinas que venham a ser formadas nessas matrizes.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso combinado de NaOH e Ca(OH)₂ como solução ativadora para a CV desencadeou reações deletérias na matriz endurecida e provocou o decréscimo da resistência à compressão ao longo do tempo. Esse decréscimo foi antecipado para aquelas amostras submetidas a cura térmica constante de 70°C até a data de ensaio.

As relações molares entre ativadores e CV que provocaram reações deletérias na matriz endurecida foram: S/Al 8,19; C/Al 0,22; N/Al 2,47 e N/S 0,30.

Foram identificadas 3 morfologias nas pastas álcali-ativadas: uma composta de regiões com aspecto massivo; outra apresentando partículas de CV parcialmente solubilizadas; e outra mostrando a formação de produtos em forma de cristais aciculares.

Apenas o uso do *MEV/EDS* não foi suficiente para que se pudesse entender o mecanismo de reação deletéria provocada entre os ativadores alcalinos e a CV. O auxílio de outras técnicas como difração de raios X, infravermelho por transformada de Fourier e espectroscopia de ressonância magnética nuclear acoplada com rotação no ângulo mágico podem contribuir para que sejam compreendidos os mecanismos e fenômenos responsáveis pelo decréscimo da resistência nesse material.

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] PALOMO, A., GRUTZECK, M.W., BLANCO, M.T. “Alkali-activated fly ashes. A cement for the future”, *Cement and Concrete Research*, v. 29, pp. 1323-1329, 1999.
- [2] VAN JAARVELD, J.G.S., VAN DEVENTER, J.S.J., LORENZEN, L., “The potential use of geopolymeric materials to immobilize toxic metals: Part I. Theories and Applications”. *Minerals Engineering*, v. 10, n. 7, pp. 659 – 667, 1997.
- [3] FERNANDEZ-JIMENEZ, A., PALOMO, A. “Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model”, *Cement and Concrete Research*, v. 35, pp. 1204-1209, 2005.
- [4] ROY, D.M., “Alkali-activated cements opportunities and challenges”, *Cement and Concrete Research*, v. 29, pp. 249-254, 2005.
- [5] BARBOSA, V.F.F., MACKENZIE, K.J.D., THAUMATURGO, C., “Synthesis and characterization of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: Sodium polysialate polymer”. *International Journal of Inorganic Materials*, v. 2, pp. 309-317, 2000.
- [6] SILVA, F.J., THAUMATURGO, C., “Fiber reinforcement and fracture response in geopolymeric mortars”, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, v. 26, pp. 167-172, 2002.
- [7] PUERTAS, F., FERNANDEZ-JIMENEZ, A. “Mineralogical and micro structural characterization of alkali-activated ash/slag pastes”. *Cement and Concrete Composites*, v. 25, pp. 287-292, 2003.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 6474*. “Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica: método de ensaio”. Rio de Janeiro, 1984.
- [9] FAN, Y., YIN, S., WEN, Z., ZHONG, J., “Activation of fly ash its effects on cement properties”, *Cement and Concrete Research*, v.29, n.4, pp. 467- 472, 1999.
- [10] JUESHI, Q., Shi, C., Zhi, W., “Activation of blended cements containing fly ash”, *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 8, pp. 1121-1127, 2001.
- [11] VAN JAARVELD, J., VAN DEVENTER, J.S.J., LUKEY, G.C., “The effect of composition and temperature on the properties of fly ash - and kaolinite - based geopolymers”, *Chemical Engineering Journal*, v. 89, pp. 63-73, 2002.
- [12] VARGAS, A.S., *Cinzas volantes álcali-ativadas para a obtenção de aglomerantes especiais*, Tese de D.Sc., PPGEM/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2006.
- [13] YIP, C.K., LUKEY, G.C., VAN DEVENTER, J.S.J., “The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at early stage of alkaline activation”. *Cement and Concrete Research*, v. 35, pp. 1688-1697, 2005.
- [14] FERNANDEZ-JIMENEZ, A., PALOMO, A., “Alkali activated fly ashes: properties and characteristic”. In: *Proceedings of the 11th on the Chemistry of Cement (ICCC)*, Durban, Africa do Sul, 11-16 May 2003.