

Influência da Composição Química das Soluções Alcalinas Ativadoras na Produção de Geopolímeros a Base de Cinza Volante

A. G. S. Azevedo^{1*}, K. Strecker¹

¹ Universidade Federal de São João del-Rei, – UFSJ, Campus Sto Antônio
Praça Frei Orlando 170 – Centro, São João del-Rei, MG, CEP 36307-352, Brasil.

(Recebido em 26/09/2016; revisado em 17/01/2017; aceito em 24/04/2017)
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

A substituição do cimento Portland comum por materiais com propriedades similares ou melhores e menos nocivos ao meio ambiente vem sendo realizada com um aumento nas pesquisas relacionadas à obtenção dessa nova classe de ligantes. Os geopolímeros são materiais que se apresentam como bons substitutos para serem utilizados como ligante na indústria da construção civil. Nesse trabalho, amostras de geopolímeros foram produzidas pela ativação de cinza volante e diferentes ativadores alcalinos. As propriedades mecânicas e microestruturais foram utilizadas para observar como que a composição química da solução influencia as propriedades finais dos geopolímeros. Os resultados obtidos demonstraram que os materiais possuem alta resistência à compressão nas primeiras horas de cura (28 MPa) e que aumenta para valores próximos de 48 MPa após 28 dias. As propriedades físicas, tais como absorção de água, porosidade aparente e densidade também tiveram modificações quando soluções com diferentes composições químicas foram utilizadas para se ativar as cinzas volantes. A morfologia dos geopolímeros obtidos apresentou modificações depois do contato da cinza com as diferentes soluções alcalinas.

Palavras-chave: Geopolímero; geopolimerização; solução alcalina; cinza volante.

Abstract:

In this work, samples of geopolymers were produced by the activator of Fly Ash with different alkaline solutions (NaOH and Na₂SiO₃). The mechanical characterization and microstructural were employed to study the influence of the geopolymerization process in the final proprieties of the binder material. The results showed that the geopolymers have high mechanical strength in the first 24 hours of curing (28 MPa) and increase to 48 MPa after 28 days of curing. The physical proprieties such as water absorption, apparent porosity and density changed when different solutions were used to produce the geopolymers specimens. The morphology of the fly ash based geopolymers showed different of the surface of original fly ash after the contact of raw material with the alkaline solutions.

Keywords: Geopolymers; geopolymerization; alkaline solution; Fly Ash.

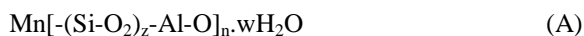
1. Introdução

No atual cenário de crescimento em que nos encontramos o consumo de cimento Portland vem apresentando um aumento acelerado ano após ano. Atualmente, o consumo se encontra próximo de 2600 toneladas por ano e, de acordo com o Torgal e Jalali (2010) [1], um consumo quatro vezes maior deve ser apresentado daqui a 40 anos [1]. Uma das maiores preocupações do aumento da produção do cimento Portland (CP) está relacionada com o consumo energético existente durante a fabricação do clínquer e das emissões de gases que contribuem para o aumento do efeito estufa, principalmente o CO₂ [2,3]. Dessa forma, as pesquisas de novos materiais com características iguais ou superiores ao do CP têm sido amplamente desenvolvidas nas ciências e engenharia de materiais, dando origem aos geopolímeros.

Os geopolímeros são materiais de elevada resistência mecânica inicial, que apresentam elevada resistência a ataques ácidos e de sulfatos, resistência a ciclos de gelo/degelo e resistência ao fogo, possuindo propriedades refratárias [4–9]. Esses materiais foram primeiramente estudados por Glukhovsky [10] em Kiev – Ucrânia, entretanto, na década de 70 o pesquisador Davidovits [10-11] iniciou os estudos da produção, caracterização e comercialização desses novos ligantes [10,11]. Davidovits [10,11,12] criou o termo “Geopolímero” e designou a geopolimerização como sendo o processo de produção destes. A semelhança com o processo de produção dos polímeros orgânicos foi fundamental para a escolha do nome dado ao processo.

A nomenclatura utilizada para nomear os geopolímeros é baseada no termo polissialato e possui forma empírica como demonstrado na fórmula (A) é utilizada como abreviação de silico-oxo-aluminato [3,12,13].

*Email: adrianogalvao26@yahoo.com.br (A. G. S. Azevedo)



Em que M é um cátion (metal alcalino ou metal alcalino terroso) e n é o grau de polimerização. O símbolo (-) é usado para demonstrar a presença de uma ligação e z pode ser 1, 2 ou 3. A variação de z automaticamente causa uma variação na razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Essa variação propicia a formação de diferentes tipos de geopolímeros, como resumido na Tabela 1. W corresponde ao grau de hidratação do polímero mineral [14–17].

Tabela 1. Monômeros base de formação dos geopolímeros.

Monômero	Razão Si/Al
Poli(sialato) (-Si-O-Al-O-)	1:1
Poli(sialato-siloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O-)	2:1
Poli(sialato-disiloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)	3:1

Como apresentado na Tabela 1 a modificação química dos geopolímeros promove a obtenção de diferentes unidades repetidoras, o que modifica as propriedades finais do ligante. Entretanto, um controle da razão Si/Al durante a produção dos geopolímeros é difícil devido a vasta gama de materiais utilizados como matéria prima na produção. Os geopolímeros podem ser produzidos pela mistura de aluminossilicatos, tais como, escória granulada de alto-forno [17–19], metacaulim [9,20–22] e cinza volante [5,23–32] com soluções alcalinas, podendo conter SiO_2 devido a adição de Na_2SiO_3 .

As soluções alcalinas utilizadas na produção dos geopolímeros devem possuir grande quantidade de íons OH^- para que a rede tridimensional amorfa comumente encontrada nos materiais de partida seja dissolvida. As matrizes com baixo ordenamento atômico são solubilizadas pelas soluções e posteriormente se transformam em matrizes compactas e com grande resistência mecânica devido aos processos de policondensação [33].

A utilização da cinza volante como matéria prima na produção de geopolímeros tem aumentado devido, principalmente, à grande quantidade de cinza gerada durante os crescentes processos de produção de energia nas termelétricas [17]. De acordo com Provis e Van Deventer [17] somente na Austrália, a produção de cinzas volantes ultrapassa as 12 Mt anuais, sendo apenas 4 Mt reaproveitadas como matéria prima em outros processos industriais. Desta forma, a produção de geopolímeros a base de cinzas volantes é viável não apenas nas propriedades mecânicas, químicas e físicas apresentadas, mas também pela possibilidade de reaproveitamento de resíduos industriais.

As cinzas volantes provenientes das termelétricas ao redor do mundo apresentam variações na sua composição química e também nas suas propriedades morfológicas e texturais [27]. A obtenção de matrizes de elevada resistência mecânica está diretamente ligada com a composição química das soluções alcalinas utilizadas na ativação do material de partida, sendo os principais constituintes as espécies Na_2O , SiO_2 e H_2O [4,20,29,34]. Assim sendo, se faz necessário um estudo sobre o comportamento de cinzas volantes brasileiras,

provenientes do complexo termelétrico de Jorge Lacerda no estado de Santa Catarina – Brasil, utilizando soluções ativadoras contendo diferentes quantidades de Na_2O , SiO_2 e H_2O . A posterior caracterização dos geopolímeros produzidos será capaz de demonstrar a formulação química que favorece a obtenção de matrizes com elevada resistência mecânica.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

Cinza Volante

A cinza utilizada para a produção dos geopolímeros foi fornecida pela empresa Pozo Fly – Comércio de cinza Lima LTDA. As cinzas provenientes do complexo termelétrico de Jorge Lacerda/SC são recebidas na forma bruta e passam por processos de armazenamento, moagem e ensacamento.

Silicato de Sódio Alcalino (Na_2SiO_3)

O silicato de sódio utilizado para a produção das soluções alcalinas foi adquirido da empresa Diatom®, apresenta código de referência R-2252 e composição química como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química e propriedades físicas do silicato alcalino fornecidas pelo fabricante.

Composição (%)	Sólidos Totais (%)	Umidade (%)	Densidade a 25°C (g/cm^3)	Viscosidade (cP)
Na_2O	14,96			
SiO_2	33,57	48,56	1,59	1,35
$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	2,40			

Hidróxido de Sódio (NaOH)

As soluções alcalinas foram preparadas com hidróxido de sódio (NaOH) do tipo P.A. na forma de escamas da marca Sulfal Química LTDA e pureza de 98%.

2.2. Métodos

Para a produção dos geopolímeros a cinza volante foi misturada com as soluções ativadoras em temperatura ambiente. A pasta obtida foi submetida a cura térmica por 24 horas a 65°C e posterior cura a temperatura ambiente (1, 7 e 28 dias). As composições químicas dos ativadores utilizados estão apresentadas na Tabela 3. Os ativadores alcalinos foram preparados com um dia de antecedência para se evitar aquecimento durante a dissolução do NaOH o que poderia afetar as reações de geopolimerização. Em todas as misturas a razão entre a solução ativadora e a cinza volante utilizada foi mantida constante em valores próximos de 0.5. As pastas frescas foram adicionadas a moldes plásticos com dimensões de 50 X 25 mm (altura x diâmetro) e seladas utilizando um filme plástico para evitar a perda de água por evaporação. Os

moldes foram vibrados em mesa vibratória por 60 segundos para se remover as bolhas formadas durante o preenchimento dos moldes.

Tabela 3. Concentração e Razões dos principais parâmetros que afetam o ganho de resistência mecânica das CVAA

Amostra	%Na ₂ O ^a	%SiO ₂ ^a	SiO ₂ /Na ₂ O ^a	H ₂ O/CV (massa)
H10S0	11,69	0	0	0,35
H12S0	13,51	0	0	0,33
H16S0	16,98	0	0	0,28
H10S10	10,85	3,36	0,31	0,33
H12S10	12,31	3,36	0,27	0,31
H16S10	15,08	3,36	0,22	0,28
H10S20	10,01	6,71	0,67	0,31
H12S20	11,11	6,71	0,6	0,3
H16S20	13,18	6,71	0,51	0,27
H10S30	9,17	10,07	1,1	0,29
H12S30	9,9	10,07	1,02	0,28
H16S30	11,29	10,07	0,89	0,27

^a em relação a quantidade de cinza volante (peso).

A nomenclatura utilizada para identificar as amostras consiste em apresentar a concentração de NaOH (mol.L⁻¹) das soluções ativadoras, dada pela letra H e também a porcentagem de Na₂SiO₃ utilizada em cada mistura (% em massa), que é representada pela letra S. O tempo de cura é expresso pelo número de dias de cura, logo a frente da composição da solução ativadora utilizada. Como exemplo podemos citar a amostra H12S20-7 que corresponde a amostra produzida utilizando a solução de NaOH (12M) e com 20% de Na₂SiO₃ após 7 dias de cura.

A composição química da cinza volante foi analisada por meio de fluorescência de raios x. A massa específica e a análise granulométrica foram obtidas por meio da picnometria a Hélio e distribuição granulométrica a laser, respectivamente.

Os geopolímeros foram caracterizados por meio de ensaios resistência à compressão de acordo com a norma ASTM C109 [35]. As morfologias da cinza e das amostras de geopolímeros foram avaliadas com o auxílio da microscopia eletrônica de varredura (MEV). As propriedades físicas dos

ligantes inorgânicos foram estudadas como descrito na norma britânica BS 10545-3 (1997) [36].

3. Resultados e Discussão

3.1. Caracterização da cinza volante

Análise granulométrica

Os resultados referentes a distribuição granulométrica da cinza volante utilizada é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4. Diâmetros das partículas presentes na cinza volante (D80, D50 e D10) e massa específica.

Diâmetro	Tamanho (µm)	Massa específica (g/cm ³)
D10	4,99	
D50	30,82	2,21 ± 0,01
D80	115,12	

Os tamanhos das partículas variam entre 0,275 µm e 209 µm. A Tabela 4 apresenta os dados relacionados aos diâmetros D10, D50 e D80 que correspondem aos tamanhos de partículas abaixo dos quais equivalem a 10, 50 e 80% da massa do material, respectivamente. Na Tabela 4 também se encontra a massa específica da cinza volante obtida por meio da picnometria a gás. A cinza volante utilizada para se obter os geopolímeros apresenta uma massa específica próxima de 2,2 g/cm³ e um valor de D50 de 30 µm. Tais valores estão próximos àqueles encontrados no trabalho de Livi *et al.* [37], em que os autores, trabalhando com a cinza volante do mesmo complexo termelétrico, obtiveram valores de massa específica de 2,5 g/cm³ e D50 = 16 µm. Vale ressaltar que os autores realizaram uma moagem antes da ativação da cinza volante, o que explica a diminuição do tamanho das partículas do material de partida.

Composição Química (FRX)

A Tabela 5 apresenta a composição química da CV. É possível observar que a cinza é composta basicamente de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, o que, de acordo com a norma ASTM C618 (2010) [38], corresponde a uma cinza volante do tipo F pois apresenta a soma dos óxidos citados acima de 70%. No trabalho Livi *et al.* [37], os autores trabalharam com cinzas volantes provenientes do mesmo complexo termelétrico nas quais as cinzas utilizadas nesse trabalho foram obtidas.

Tabela 5. Composição química da cinza volante utilizada para a produção dos geopolímeros.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Outros Óxidos*	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ [#]
56.025	29.406	6.155	3.771	2.069	1.805	1.242	3.88

* (ZnO, MnO, Cr₂O₃, SrO, CuO, Rb₂O, Y₂O₃, PbO, Ga₂O₃, GeO₂, NiO ZrO₂, V₂O₅ SO₃ e NbO). # Razão molar.

Entretanto, a composição química das amostras apresentam diferenças entre as espécies químicas presentes. Tais alterações também ocorrem com outros pesquisadores ao redor do mundo [27,39]. A composição química das amostras

apresentam concentrações diferentes em todos os elementos. Entretanto, a mudança na quantidade de Fe₂O₃ e CaO podem apresentar interferências nos processos de geopolimerização [40, 41].

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 1 apresenta as imagens da cinza volante utilizada na obtenção dos corpos de prova geopoliméricos. É possível observar que as partículas da cinza se apresentam na forma esférica e de tamanhos variados, estando de acordo com os resultados de distribuição granulométrica presentes na Tabela 4. As esferas podem ser ocas ou conter esferas com menor diâmetro dentro do seu interior [38].

3.2. Resistência à Compressão dos Geopolímeros

A Tabela 6 apresenta os resultados da resistência à compressão dos geopolímeros produzidos com cinza volante e diferentes soluções alcalinas. É possível observar que as amostras fabricadas apenas com as soluções de NaOH apresentam os menores valores de resistência à compressão, 4,95, 9,77 e 10,17 MPa para as amostras H10S0-1, H12S0-1 e H16S0-1, respectivamente. O aumento do tempo de cura favoreceu o ganho de resistência mecânica das amostras H10S0 e H12S0. Após 28 dias as amostras obtiveram resistências com valores aproximadamente 49% superiores, demonstrando que as reações de geopolimerização continuam ocorrendo e, conseqüentemente, aumentando a resistência do material. A amostra H16S0-28 apresentou um decréscimo nos valores de resistência. Tal fato pode estar associado com a elevada concentração de Na₂O presente na solução ativadora. O álcali em excesso pode precipitar e perturbar a estrutura do geopolímero. Tal perturbação diminui a resistência mecânica das amostras [15]. No trabalho de Palomo *et al.* [15] os autores observaram uma diminuição da resistência à compressão das amostras após o aumento da concentração dos íons OH⁻ na solução. Os autores obtiveram resistências próximas de 21,2 e 8,7 para concentrações de OH⁻ iguais a 12 e 18 mol.L⁻¹, respectivamente. O aumento da concentração de NaOH nas soluções também promovem uma diminuição da

quantidade de água nas misturas, como pode ser observado na Tabela 3. A diminuição das moléculas de H₂O no sistema promove a diminuição da trabalhabilidade das pastas, o que interfere no preenchimento dos moldes e na compactação dos corpos de provas. A diminuição da trabalhabilidade pode estar associada com o aparecimento de falhas nos corpos de prova, o que promove, conseqüentemente, a diminuição da resistência mecânica dos geopolímeros estudados. A diminuição da trabalhabilidade com o aumento da concentração das soluções ativadoras também foi observado por Patankar *et al.* [42].

Tabela 6. Resistências à compressão dos geopolímeros produzidos com diferentes soluções alcalinas.

Amostra	Resistência à compressão (MPa)		
	1 Dia	7 Dias	28 Dias
H10S0	4,95 ± 1,48	5,96 ± 0,49	9,69 ± 0,64
H12S0	9,77 ± 1,56	10,83 ± 1,37	19,13 ± 1,06
H16S0	10,17 ± 1,50	13,87 ± 1,69	8,77 ± 1,57
H10S10	32,31 ± 2,77	38,57 ± 1,10	34,87 ± 1,92
H12S10	38,51 ± 1,49	38,68 ± 1,31	33,75 ± 1,19
H16S10	28,05 ± 0,77	30,87 ± 1,55	31,96 ± 2,0
H10S20	23,42 ± 1,88	30,26 ± 3,82	33,02 ± 2,26
H12S20	28,27 ± 2,67	33,28 ± 3,97	39,24 ± 1,55
H16S20	24,60 ± 1,0	24,57 ± 1,86	28,96 ± 0,8
H10S30	19,77 ± 5,21	29,86 ± 2,92	28,11 ± 4,0
H12S30	27,78 ± 3,65	48,20 ± 2,13	47,60 ± 4,5
H16S30	38,87 ± 3,34	37,45 ± 2,27	44,25 ± 1,87

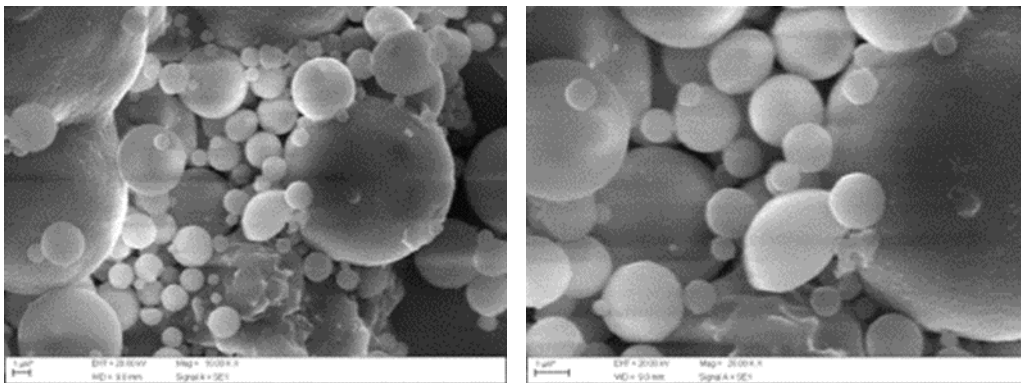


Figura 1. Microscopia eletrônica de varredura da CV volante utilizada para a produção dos geopolímeros. 10000 e 20000 X.

As amostras ativadas com as soluções de NaOH e Na₂SiO₃ apresentaram valores superiores as produzidas apenas com NaOH. A adição de 30% em peso de silicato de sódio nas soluções promoveu a obtenção de geopolímeros com resistências próximas de 38,8 MPa nas primeiras 24 horas e 44,25 MPa após 28 dias de cura. Esses resultados demonstram que a adição de Na₂SiO₃ favorece a obtenção de

geopolímeros com elevada resistência à compressão. Entretanto, fica evidente que existe uma relação entre a concentração de Na₂O e SiO₂ que promove a obtenção de matrizes mais resistentes. De acordo com a Tabela 2, as amostras ativadas com as soluções H12S30 e H16S30 apresentam razão Na₂O/SiO₂ próximas de 1,02 e 0,89, respectivamente. A maior resistência foi obtida quando a

razão $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ foi 1,02 (próximo de 1,0), como apresentado na Figura 2. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Škvára *et al.* [43], em que as maiores resistências foram obtidas para as amostras ativadas com soluções contendo a razão $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ próximo de 1,0 [43].

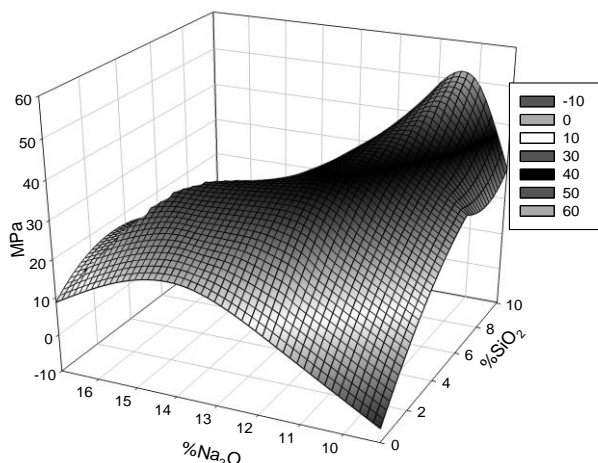


Figura 2. Relação entre a concentração de álcali ($[\text{Na}_2\text{O}]%$) e $[\text{SiO}_2]%$ no ganho de resistência mecânica dos geopolímeros após 28 dias de cura.

Absorção de Água, Porosidade e Densidade Aparente

Os resultados das propriedades físicas dos geopolímeros produzidos com as diferentes soluções alcalinas após 28 dias de cura estão apresentados na Tabela 7. A densidade dos geopolímeros varia entre valores próximos de 1,47 – 2,07 g/cm^3 , abaixo do valor da massa específica da CV original (2,2 g/cm^3). A amostra H16S20-28 apresentou os menores valores de porosidade aparente (3,41%) e absorção de água (1,81%). As soluções fabricadas com a solução de NaOH 16 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ apresentam as menores porosidades dentro de uma mesma concentração de Na_2SiO_3 , demonstrando que a concentração de Na_2O além de interferir na obtenção de matrizes com elevada resistência mecânica influenciam no aparecimento de poros nas matrizes geopoliméricas.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens das superfícies dos geopolímeros após 28 dias estão apresentadas na Figura 3. É possível observar que a morfologia dos geopolímeros se difere da superfície das partículas de CV. O contato das partículas esféricas da CV com as soluções alcalinas favorece o aparecimento de uma superfície densificada, a qual é responsável pelo ganho de resistência mecânica das amostras [44]. Tais resultados estão de acordo com os resultados apresentados no trabalho de Azevedo *et al.* [45], em que os autores relatam que a utilização de soluções de NaOH com elevada concentração promove a obtenção de uma morfologia com poucas esferas intactas, demonstrando que o processo de dissolução e formação do gel aluminossilicato foi aumentado. Entretanto, devido a diminuição da concentração de moléculas de água na mistura o aparecimento de microtrincas pode ocorrer. Nas amostras H10S0-28, H12S0-28 e H16S0-28 apresentam algumas esferas mesmo depois do contato da cinza com as soluções ativadoras. As amostras ativadas com as soluções contendo 30% de Na_2SiO_3 apresentam uma superfície contendo uma grande quantidade do gel aluminossilicato, demonstrando que a razão $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ presente na solução ativadora é responsável pela maior efetividade dos processos de geopolimerização e promove a maior dissolução das partículas do material de partida. As amostras H12S30-28 e H16S30-28 que foram fabricadas com as soluções contendo a razão $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 1,02 e 0,89, respectivamente, são as que apresentam a maior formação da microestrutura correspondente ao geopolímero, corroborando com os resultados de resistência à compressão que foram os mais altos para essas amostras.

Na amostra H16S30-28, é possível observar uma estrutura densa, sem a presença de esferas da cinza volante que não se dissolveram. Contudo, na amostra H16S30-28, em que a quantidade de água foi baixa, é possível observar o aparecimento de trincas na superfície dos geopolímeros. Tais resultados corroboram com os encontrados por Li *et al.* [44] e Azevedo *et al.* [45] em que os autores demonstram que a diminuição da quantidade de água favorece o aparecimento de microtrincas nos materiais geopoliméricos.

Tabela 7. Valores de absorção de água, porosidade, densidade aparente dos geopolímeros a base de CV.

Amostra	Na_2O (%)*	$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	Absorção de H_2O (%)	Porosidade Aparente (%)	Densidade (g/cm^3)
H10S0-28	11.69	0	20.51	30.97	1.51
H12S0-28	13.51	0	15.36	24.03	2.06
H16S0-28	16.98	0	10.86	17.8	1.64
H10S10-28	10.85	0,31	20.42	30.05	1.47
H12S10-28	12.31	0,27	18.03	27.21	2.07
H16S10-28	15.08	0,22	11.37	18.87	1.66
H10S20-28	10.01	0,67	12.23	19.6	1.6
H12S20-28	11.11	0,6	16.08	25.56	2.14
H16S20-28	13.18	0,51	1.81	3.41	1.88
H10S30-28	9.17	1,1	26.93	39.2	1.46
H12S30-28	9.9	1,02	12.28	20.05	2.04
H16S30-28	11.29	0,89	6.4	11.93	1.86

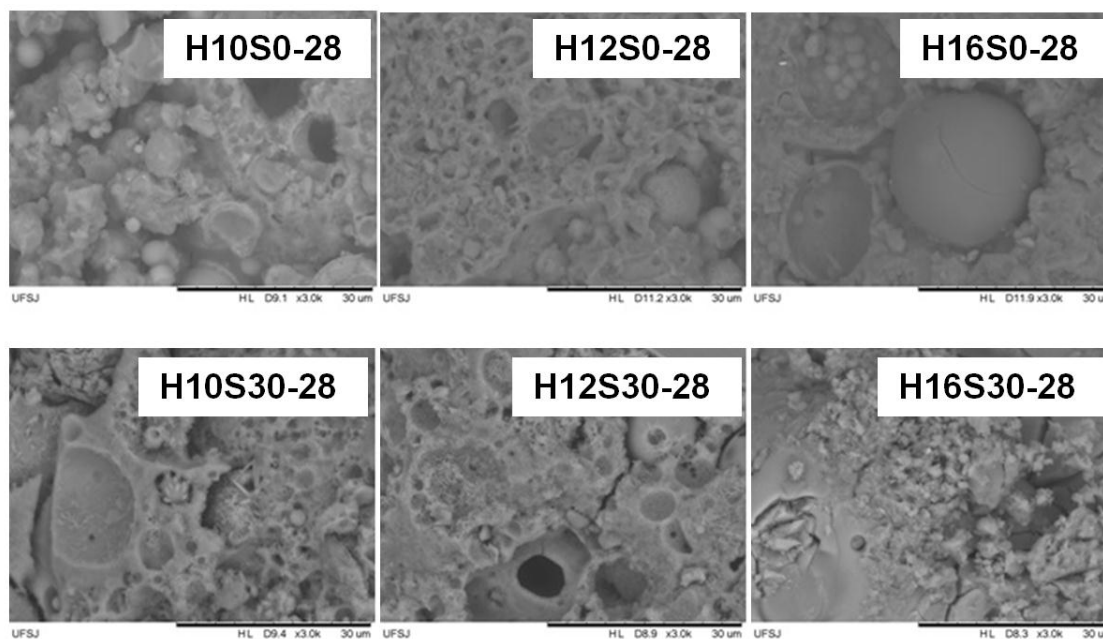


Figura3. Imagens obtidas por meio da microscopia eletrônica de varredura das diferentes amostras de geopolímeros. Aumento de 3000X.

Conclusão

A cinza volante proveniente do complexo termelétrico de Jorge Lacerda em Santa Catarina se apresentou como um bom material de partida para a produção de geopolímeros. A composição química das diferentes soluções alcalinas utilizadas para a ativação das cinzas foi de extrema importância para a obtenção de materiais com elevada resistência mecânica e pequena quantidade de poros.

Agradecimentos

Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), FAPEMIG e CAPES.

Referências

- [1] F. Torgal, S. Jalali. A sustentabilidade dos materiais de construção. 2010.
- [2] B. C. McLellan, R.P. Williams, J. Lay, A. Van Riessen, G.D. Corder. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of cleaner production*, 19, 1080–1090, 2011.
- [3] R. Davidovits, C. James. Second International Conference. (1999).
- [4] E. B. Görür, O. Karahan, C. Bilim, S. Ilkentapar, E. Luga. Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount , heat curing temperature and heat curing duration. *Construction and building materials*, 96, 673–678, 2015.
- [5] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, J.Y. Pastor, A. Martin. New Cementitious Materials Based on Alkali-Activated Fly Ash: Performance at High Temperatures. *Journal of the American Ceramic Society*, 91, 3308–3314, 2008.
- [6] O. A. Abdulkareem, A. M. Mustafa Al Bakri, H. Kamarudin, I. Khairul Nizar, A. A. Saif. Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete. *Construction and building materials*, 50, 377–387, 2014.
- [7] T. Bakharev. Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and concrete research*, 35, 658–670, 2005.
- [8] S. Thokchom, P. Ghosh, S. Ghosh. Effect of Na₂O Content on Durability of Geopolymer Mortars in Sulphuric Acid. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4, 65–70, 2009.
- [9] K. A. Komnitsas. Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. *Procedia Engineering*, 21, 1023–1032, 2011.
- [10] J. Davidovits, M. Davidovics. Composite Materials with Geopolymer Matrix. *Geopolymer '88*. 2, 325–337, 1988.
- [11] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo, J.S.J. Deventer, J.S.J. Van Deventer. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42, 2917–2933, 2006.
- [12] J. Davidovits. Geopolymer chemistry and properties. *Geopolymer*, 1, 25–48, 1988.
- [13] C. Verte. Green Chemistry and Sustainable

- Development Solutions Chimie Verte et Solutions. Sustain Development, 2005.
- [14] M. das D. B. Barroso. Desenvolvimento de compósitos com matriz de geopolímeros reforçados com partículas de quasicristais AlCuFe. (Dissertação de mestrado), Universidade Federal da Paraíba, 2009.
- [15] A. Palomo, M. W. Grutzeck, M. T. Blanco. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and concrete research*, 29, 1323–1329, 1999.
- [16] O. M. Damilola. Syntheses, Characterization and Binding Strength of Geopolymers: A Review. *International Journal of Materials Science and Applications*, 2, 185, 2013.
- [17] J. L. Provis, S. A. Bernal. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annual Review of Materials Research*, 44, 299–327, 2014.
- [18] T. W. Cheng, J. P. Chiu. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, 16, 205–210, 2003.
- [19] P. S. Deb, P. Nath, P.K. Sarker. The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Materials and Design*, 62, 32–39, 2014.
- [20] R. N. Thakur, S. Ghosh. Effect of mix composition on compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer composites. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4, 68–74, 2009.
- [21] W. Hajjaji, S. Andrejkovičová, C. Zanelli, M. Alshaaer, M. Dondi, J. A. Labrincha, F. Rocha. Composition and technological properties of geopolymers based on metakaolin and red mud. *Materials and Design*, 52, 648–654, 2013.
- [22] E. H. Kim. Understanding Effect of Si/Al Ratio and Calcium Hydroxide on Chemical Composition, Nanostructure and Compressivre Strength for Metakaolin Geopolymers. (Doctoral thesis), University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012.
- [23] W. K. W. Lee, J. S. J. Van Deventer. Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solutions *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 211, 2002.
- [24] J. Temuujin, A. Van Riessen, K.J.D. MacKenzie. Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 24, 1906–1910, 2010.
- [25] E. I. Diaz, E. N. Allouche, S. Eklund. Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers. *Fuel*, 89, 992–996, 2010.
- [26] T. Bakharev. Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 35, 1224–1232, 2005.
- [27] J. G. S. Van Jaarsveld, J. S. J. Van Deventer, G. C. Lukey. The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers. *Materials Letters*, 57, 1272–1280, 2003.
- [28] U. Rattanasak, P. Chindaprasirt. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, 22, 1073–1078, 2009.
- [29] M. Criado, A. Fernandez-Jimenez, A. G. de la Torre, M. A. G. A. Palomo. An XRD study of the effect of the SiO₂/Na₂O ratio on the alkali activation of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 37, 671–679, 2007.
- [30] P. Chindaprasirt, T. Chareerat, V. Sirivivatnanon. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 29, 224–229, 2007.
- [31] A. Fernández-Jimenez, A. G. De La Torre, A. Palomo, G. López-Olmo, M.M. Alonso, M. A. G. Aranda. Quantitative determination of phases in the alkali activation of fly ash. Part I. Potential ash reactivity. *Fuel*, 85, 625–634, 2006.
- [32] E. Arioz, O. Arioz, O.M. Kockar. Leaching of F-type fly Ash Based Geopolymers. *Procedia Engineering*, 42, 1114–1120, 2012.
- [33] D. Khale, R. Chaudhary. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of Materials Science*, 42, 729–746, 2007.
- [34] M. Criado, Fernández-Jiménez, Palomo, I. Sobrados, J. Sanz. Effect of the SiO₂/Na₂O ratio on the alkali activation of fly ash. Part II: ²⁹Si MAS-NMR Survey. *Microporous and Mesoporous Materials*, 109, 525–534, 2008.
- [35] ASTM:C157/C157M-08. Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. *ASTM International*, 14, 1–7, 2008.
- [36] 10545-3EN ISO EN. Ceramic Tiles - Part 3: Determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density. 1998.
- [37] C.N. Livi, W.L. Repette. Ligante geopolimérico produzido com cinza volante e hidróxido de sódio. *Ambiente Construído*, 15, 7–18, 2015.
- [38] C. A. International, S. Specification, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, 4, 5–7, 2010.
- [39] M.C. Bignozzi, S. Manzi, M.E. Natali, W.D. A. Rickard, A. Van Riessen. Room temperature alkali activation of fly ash: The effect of Na₂O/SiO₂ ratio. *Construction and Building Materials*, 69, 262–270, 2014.
- [40] F.G.M. Aredes, T.M.B. Campos, J.P.B. MacHado, K.K. Sakane, G.P. Thim, D.D. Brunelli. Effect of cure temperature on the formation of metakaolinite-based geopolymer. *Ceramics International*, 41, 7302–7311, 2015.
- [41] X. Guo, H. Shi, W. A. Dick. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 32, 142–147, 2010.

- [42] Patankar, Y.M. Ghugal, S.S. Jamkar. Effect of Concentration of Sodium Hydroxide and Degree of Heat Curing on Fly Ash-Based Geopolymer Mortar. *Indian Journal Material Science*, 1-6, 2014.
- [43] F. Škvára, T. Jílek, L. Kopecký. Geopolymer materials based on fly ash. *Ceramics - Silikaty*, 49, 195–204, 2005.
- [44] X. Li, X. Ma, S. Zhang, E. Zheng. Mechanical properties and microstructure of class C fly ash-based geopolymer paste and mortar. *Materials*, 6, 1485-1495, 2013.
- [45] A.G.S. Azevedo, K. Strecker. Brazilian fly ash based inorganic polymers production using different alkali activator solutions. *Ceramic International*, (2017).