

DESEMPENHO DOS ATIVADORES ALCALINOS PARA PRODUÇÃO DE GEOPOLÍMEROS COM SOLO LATERÍTICO EM SÃO LUÍS – MA

Dellane Stephani Carvalho dos Santos (Universidade Ceuma) E-mail: stephanidscs@hotmail.com

Ramaiany Carneiro Mesquita (Universidade Ceuma) E-mail: ramaianycarneiro@hotmail.com

José Costa Sampaio Filho (Universidade Ceuma) E-mail: j.sampaio@ceuma.br

Resumo: O processo de fabricação do cimento é responsável pela liberação de uma grande quantidade de dióxido de carbono (CO₂) ao meio ambiente, contribuindo para o aquecimento global. Com o propósito de buscar um material alternativo ao Cimento Portland, e que seja menos agressivo ao meio, o objetivo geral da pesquisa foi analisar o desempenho de ativadores alcalinos para produção de geopolímeros com solo laterítico retirado de uma jazida em São Luís (MA), a fim de melhorar sua resistência à compressão. Essa prática revela-se como uma solução para as questões de alterações climáticas podendo reduzir na ordem de 4 vezes as emissões de CO₂ associadas à produção do concreto. Foram realizadas no total 18 corpos de prova entre o precursor e os ativadores com 10 e 12 Mols de hidróxido de sódio (NaOH) mais silicato de sódio (Na₂SiO₃) ativando alcalinamente a sílica e a alumina presentes na argila laterítica e tendo suas determinações de resistência à compressão simples analisadas aos 7, 14 e 28 dias. As misturas tiveram como relação entre massa precursor/ativador de 2,85. Os resultados das misturas com 12M de NaOH e Na₂SiO₃ foram mais satisfatórios do que com a molaridade de 10M.

Palavras-chave: Cimento, Geopolímero, Solo laterítico.

PERFORMANCE OF ALKALINE ACTIVATORS FOR THE PRODUCTION OF GEOPOLYMERS WITH LATERITIC SOIL IN SÃO LUÍS – MA

Abstract: The cement manufacturing process is responsible for releasing a large amount of carbon dioxide (CO₂) into the environment contributing to global warming. The objective of this research was to analyze the performance of alkaline activators for the production of geopolymer with lateritic soil from a deposit in São Luís (MA) a. to improve their compressive strength. This practice proves to be a solution to climate change issues and can reduce CO₂ emissions associated with concrete production by 4 times. A total of 18 specimens were tested between the precursor and the activators with 10 and 12 Mols of sodium hydroxide (NaOH) plus sodium silicate (Na₂SiO₃), alkaline activating the silica and alumina present in the lateritic clay and having their determinations of resistance were analyzed at 7, 14 and 28 days. The mixtures had a ratio of precursor / activator mass of 2.85. The results of the mixtures with 12M NaOH and Na₂SiO₃ were more satisfactory than with the 10M molarity.

Keywords: Cement, Geopolymer, Lateritic soil.

1. Introdução

A produção do cimento se posiciona como uma causa firme para elevadas emissões de dióxido de carbono (CO₂) ao meio ambiente, o que acarreta ao aquecimento global. As investigações por novos materiais que substituem o cimento vem sendo estudadas e é uma solução inovadora para problemas climáticos auxiliando na redução de 4 vezes as emissões de CO₂ das indústrias cimenteiras.

Os solos lateríticos encontram-se em regiões tropicais e subtropicais com presença de argila e silte, cujas composições apresentam a sílica e a alumina necessárias para a reação química. E, além da sua composição química favorável, o solo é um material local de baixo custo para

realização dos experimentos. Diversas pesquisas apontam a eficácia do hidróxido alcalino e/ou silicato quando em contato com precursores ricos em aluminossilicatos.

Na reação química, o Al (alumínio) é liberado antes do Si (silício) e por essa razão a variação na quantidade de sílica no ativador resultará em produtos com propriedades e estruturas distintas. Assim, os ativadores com silicato ocasionam o aumento da sílica e uma aceleração no processo de geopolimerização, pois a sílica reage com a alumina livre na mistura (SEVERO, 2013). Assim, os silicatos ajudam na produção de uma nova estrutura com mais Si e maior resistência mecânica.

Ao se perguntar o porquê da demora da comercialização dos geopolímeros, o professor francês Davidovits, considerado o pioneiro no ramo, informa que as normas para produção de um Cimento Portland (CP) não estão adaptadas a este novo tipo de cimento. Logo, as normas devem ser criadas por um comitê ad hoc, sendo necessária a existência de cimentos geopoliméricos padrões. Atualmente, todos os especialistas elaboram uma mistura própria com o uso de produtos locais (DAVIDOVITS, 2013).

O objetivo do trabalho foi avaliar qual combinação de ativadores com o solo laterítico obteve melhor desempenho mecânico ao ser submetido ao ensaio de compressão simples. Os ativadores foram o hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na₂SiO₃), com diferentes molaridades, ou seja, diferentes concentrações a 10M e 12M. A prática se deu pelo rompimento de 18 corpos de prova nas idades de 7, 14 e 28 dias de cura à temperatura ambiente e as misturas tiveram como relação entre massa precursor/ativador 2,85. As molaridades optadas foram devidas à observações de trabalhos publicados sobre o tema.

Em resumo, a pesquisa fez uma abordagem sobre a origem dos geopolímeros, suas reações químicas, suas aplicações e vantagens, principais componentes dos minerais de argila e como a temperatura pode influenciar durante o processo de cura. Os ensaios se basearam na Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

2. Origem dos Geopolímeros

O termo "geopolímero" foi usado pela primeira vez para aglutinantes à base de argila ativados por álcali na década de 1970 pelo químico francês Joseph Davidovits, e só em 2000 houve pesquisa internacional concentrada nesses novos aglutinantes (HEATH et al., 2014, p. 75).

Até 1972, trabalhava-se em pastas orgânicas para fundições, fibras têxteis sintéticas, como o couro natural e sintético, colágeno e membranas orgânicas. A partir de 1972, devida a uma série de incêndios catastróficos na região da França envolvendo plásticos orgânicos inflamáveis, o pesquisador Davidovits começou a focar suas pesquisas para buscar um novo produto que fosse resistente ao calor, ou seja, um material não inflamável e não combustível (DAVIDOVITS, 1994b). Assim, criou nessa data a empresa privada de pesquisa denominada, atualmente, de CORDI-GÉOPOLYMÈRE.

Segundo Severo (2013, p. 55), um grupo de pesquisadores, almejando a criação de um novo produto que fosse resistente ao fogo, conseguiu produzir um material sílico-aluminoso ativado alcalinamente, sendo denominado pelo Davidovits de geopolímero. Em 1979, Davidovits registrou a patente acerca desse novo material e fundou o Geopolymer Institute. Desde então, o cientista francês desenvolveu várias pesquisas e solicitou diversos pedidos de patentes sobre o tema. No entanto, bem antes da década de 70, mas especificamente na década de 1950, foram desenvolvidos materiais semelhantes na antiga União Soviética, que receberam o nome de cimentos de solo.

A designação "solo" foi dada pelo fato de utilizarem para sua produção o material natural ativado para despertar neste a sua capacidade ligante. Os "cimentos de solo" eram obtidos a

partir de aluminossilicatos minerais moídos, misturados com resíduos industriais ricos em álcalis (SEVERO, 2013, p. 55).

Desde 1983, Davidovits (1994a, p.2) participou nos Estados Unidos (EUA) do desenvolvimento de novos conceitos de cimento envolvendo química geopolimérica. Os novos cimentos passaram a ser comercializados nos EUA pelo fabricante de cimento americano Lone Star Industries (Inc.), patenteando o primeiro cimento geopolimérico denominado Pyrament.

Em 1985, um estudo feito pelo corpo de engenheiros dos EUA, na cidade de Vicksburg, descreveu as aplicações dos cimentos ativados por álcali em operações militares. Apenas em 1986 que o pesquisador francês tomou consciência da pesquisa feita pelo ucraniano Glukhovsky et al. na ativação de escória granulada e em cimentos de solo alcalino. O ucraniano é considerado o principal impulsionador desses estudos de ativação alcalina (DAVIDOVITS, 1994a, p.2).

Os estudos sobre concretos geopolímeros e dados publicados na literatura da Europa Oriental sobre escórias ativadas por álcali destacaram as características únicas de cimentos de geopolímeros e cimentos de solo alcalinos em termos de alta resistência inicial, máxima força e adaptabilidade na formulação e colocação (DAVIDOVITS, 1994a, p. 2).

De acordo com Davidovits, as pesquisas com o propósito de buscar um novo material por meio da geopolimerização não tinham foco acadêmico. Isso explicava o fato de poucas literaturas científicas disponíveis sobre esse tema e as existentes pertenciam à literatura de patentes.

3. Geopolimerização

A geopolimerização consiste na dissolução, transporte ou orientação e policondensação através de uma reação exotérmica. O material de origem do geopolímero contém um elevado teor de sílica e alumina e é ativado por um líquido de elevada alcalinidade (SEPÚLVEDA, 2007). De acordo com Heath et al. (2014, p. 75), os geopolímeros são formados a partir de um precursor rico em aluminossilicatos em solução junto com hidróxido alcalino e/ou silicato como ativadores. Os precursores podem ser as argilas naturais, metacaulim (argila calcinada), cinzas volantes e escórias.

Para Duxson et al. (2007), o processo de geopolimerização acaba por libertar a sílica e a alumina na solução. No momento da dissolução das partículas, cria-se um material com excesso de sílica e alumina formando um gel e, por fim, a condensação com grandes redes estruturais. Durante a reação química, a água é libertada e colabora para a formação de um gel que gera uma rede tridimensional de aluminossilicatos. A escolha dos materiais para o processo influencia no crescimento e endurecimento do geopolímero.

Diversos estudos apontam uma melhora nas propriedades mecânicas e de durabilidade nas reações alcalinas, utilizando como precursores a escória de alto forno (resíduo resultante da fabricação do ferro em alto forno), as cinzas volantes (poeira da incineração do carvão), metacaulim (minerais de argila calcinada) e outros. Segundo Sepúlveda (2007), se o precursor tiver sua origem através de calcinação, como o metacaulim (caulim calcinado) e cinzas volantes, o polímero inorgânico apresentará bons resultados em suas propriedades mecânicas em comparação com os materiais não calcinados (caulim).

É considerado complexo e de fundamental importância o entendimento sobre o processo das reações nos materiais ativados alcalinamente, com evidência para dissolução alcalina e precipitação numa solução aquosa de um precursor, sendo responsável pelo endurecimento e propriedades dos álcali-ativados (SEPÚLVEDA, 2007).

A reação química da geopolimerização é exotérmica. Segundo Severo (2013 apud Glukhovskiy, 1980), há um método geral para a ativação alcalina em precursores constituídos de sílica e alumina. As etapas são compostas por reações de: dissolução, coagulação, condensação e cristalização.

- a) Dissolução: consiste em uma quebra das ligações covalentes Si-O-Si e Al-O-Si. Isso acontece quando o pH da solução alcalina aumenta, de modo que esses grupos são transformados em uma fase coloidal. Ocorre a dissolução das partículas sólidas do precursor na solução alcalina;
- b) Coagulação: ocorre a acumulação dos produtos das quebras de ligações, sendo que estes interagem, simultaneamente, entre eles para formar uma estrutura coagulada. Em seguida, ocorre a terceira fase: a condensação;
- c) Condensação: gera uma estrutura condensada e, com o tempo e a temperatura, pode desenvolver cristalização. Dando início a uma gelificação acompanhada da reorganização da estrutura;
- d) Cristalização: corresponde à formação e ao endurecimento do geopolímero dado como resultado da condensação entre espécies aluminatos e silicatos.

O alumínio presente nos precursores é dissolvido na solução e tem facilidade de reagir com qualquer silicato fornecido pelos ativadores alcalinos, logo, pode-se dizer que as soluções com silicato de sódio favorecem a formação de produtos com melhores propriedades mecânicas do que as misturas com hidróxido de sódio (DUXSON, 2007). Assim, é notório que a quantidade de sílica e alumina na reação química pode gerar vários resultados sobre as propriedades do novo produto.

4. Aplicações e Vantagens dos Geopolímeros

Pesquisadores na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) pesquisam, desde 2001, sobre um cimento que promete dobrar a produção sem aumentar a emissão de CO₂. Assim, eles aumentaram a quantidade de componentes não reativos na composição do cimento, incluindo calcário moído, esperando um volume menor das reações químicas. Os resultados alcançaram um percentual de 70% de componentes não reativos sem afetarem a resistência do material. Desta forma, o projeto influi no cenário da indústria cimenteira (GRANDES CONSTRUÇÕES, 2014, p. 45).

As vantagens que o material ativado alcalinamente pode oferecer são: matéria prima abundante; economia de energia e sustentabilidade ambiental; produção simples; não favorece a formação da carbonatação, pois esta acontece quando a água entra em contato com o hidróxido de cálcio presente na composição do cimento, logo, não se encontra livre o hidróxido de cálcio no geopolímero; ganhos rápidos de resistência: pesquisas apontam que os geopolímeros podem adquirir por volta de 70% da resistência à compressão em 4 horas; excelentes propriedades de durabilidade: em comparação ao concreto tradicional, o geopolímero possui uma maior resistência a ácidos; excelente comportamento a ataques de sulfatos; elevada resistência ao fogo: o novo produto pode resistir entre 1000 °C a 1200 °C sem perder sua função.

Reforçando a ideia do impacto ao meio ambiente, na pesquisa de Habert e Ouellet-Plamondon (2016, p. 22), informava que o impacto ambiental dos geopolímeros com o novo concreto à base de ativador alcalino era uma solução inovadora para problemas de mudanças climáticas, ajudando na redução de 4 vezes das emissões de CO₂ da produção de cimento. E a produção do Cimento Portland poderia acarretar até 2020 um percentual de 10 a 15% da emissão de gás carbônico na atmosfera. Recentemente, o relatório ROADMAP tecnológico do cimento

(2019) informou que o Brasil almeja diminuir as emissões desses gases das indústrias cimenteiras em duas etapas, a primeira até 2030 e a segunda até 2050.

5. Minerais de Argila

Conforme o que diz Daibert (2014, p. 21), os minerais do solo podem ser classificados em dois grupos: primários e secundários. Os minerais secundários mais encontrados no solo são: a argila (silicatos de alumínio no estado cristalino); silicatos não cristalinos; óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro; carbonatos de cálcio e de magnésio. Os argilominerais se subdividem em caulinita, montmorilonita e ilita. A argila é constituída principalmente por plaquetas minerais de argila finamente dimensionadas que são alumino-silicatos em camadas (DAIBERT, 2014, p.21).

As argilas lateríticas são encontradas principalmente em solos lixiviados de regiões tropicais e subtropicais úmidas e são caracterizadas por uma cor avermelhada ou amarela pronunciada. Esses depósitos concentraram óxidos de ferro e / ou alumínio, com caulinita (argila considerada mais pura) como mineral de argila predominante (KHEORUENROMNE, 1987 apud LECOMTE-NANA, 2009). Ao estarem disponíveis, portanto econômicos, os solos foram usados como material de construção comum.

Pode-se dizer que esses minerais correspondem a produtos com baixo consumo de energia visando sua ampla utilização para construção civil. O processo de geopolimerização pode ser usado para fabricar materiais estruturais a partir de minerais de aluminossilicatos, incluindo argilas com ou sem ativação térmica. Estudos assim foram realizados em países tropicais, como em Camarões, onde buscam materiais de construção que sejam mais acessíveis para a população.

A pesquisa sobre a ativação da argila caulínica com álcali, segundo Slaty et al. (2013), mostra que a produção de CO₂ durante a calcinação de minerais de argila é muito menor do que o obtido em Cimento Portland, pois a calcinação de minerais de argila é uma desidroxilação (menos energia) em vez de uma descarbonatação.

6. Influência da Temperatura

A temperatura, umidade e cura são importantes propriedades que influenciam nos resultados dos geopolímeros. Segundo pesquisas realizadas com o uso de cinzas volantes mais silicato de sódio e hidróxido de sódio mostram que o aumento da temperatura corresponde a uma melhora nas propriedades quando curadas a 60°C e maiores valores de resistência à compressão em relação às outras temperaturas de cura. Misturas utilizando metacaulim mais hidróxido e silicato de sódio, os resultados também apresentaram melhores características físicas e mecânicas a 60°C.

Se a cura da amostra for realizada de forma inadequada, ao invés de melhorar as propriedades mecânicas do material, poderá acelerar a carbonatação, ou seja, baixará o Ph e retardará a ativação das cinzas volantes com a perda de água e persistência de um elevado teor de alumínio nos géis formados sob estas condições. O material resultante é poroso e com baixa resistência mecânica (SEVERO, 2013).

Uma pesquisa a respeito da influência da temperatura para a ativação de solos lateríticos para serem impressos na construção civil com uma determinada quantidade de NaOH, Lemoungna et al. (2014) mostra uma mudança na resistência à compressão para amostras no estado seco, com 12-51 MPa e molhado, com 2-23 MPa.

Nos estudos realizados por Vassalo (2013, p. 92), utilizou-se como precursor o metacaulim com 10M, 12M, 18M de NaOH. A pesquisa concluiu que tanto na temperatura ambiente como na estufa o material apresentou aprimoramento na resistência mecânica aos 28 dias com

12M. Para a temperatura ambiente, conforme Davidovits (1994a, p. 1), os geopolímeros tendem a endurecer com uma resistência à compressão elevada. A força pode chegar até 20 MPa após 4 horas e, ao final dos 28 dias de cura, alcança até 100 MPa.

7. Materiais e Métodos

Dentre os materiais utilizados estavam o precursor, solo laterítico, coletado de uma jazida no bairro Vinhais de São Luís (MA), e os ativadores alcalinos: hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na₂SiO₃). O solo foi submetido a uma microsonda de raios-X e verificada sua composição mineralógica composta por 0,16% de magnésio, 10,68 % de alumínio, 72,12% de silício, 0,81% de titânio, 5,75% de ferro.

Com base em vários estudos a respeito da ativação alcalina de materiais predominantes de sílica e alumina, foram escolhidas as concentrações molares de 10M e 12M para ambos ativadores. Como há pouca presença de ferro na composição do precursor, não foi utilizado ácido para a dissolução de compostos de ferro. Evitou-se a adição de água além da necessária usada na preparação dos ativadores. A preparação do solo laterítico consistiu no ensaio de granulometria e utilização apenas do material passante da peneira de 0,6 mm, considerada a dimensão máxima das partículas para a bateria de ensaios. A proporção precursor/ativador escolhida como ponto de partida foi 2,85 devido pesquisa realizada por Fernandes (2018), na qual uma de suas misturas foi feita com lama residual, resíduos de vidro, NaOH e Na₂SiO₃. Para cada combinação de mistura foram realizados 3 corpos de prova (cps) totalizando 18 cps sendo rompidos no equipamento de resistência à compressão simples em 7, 14 e 28 dias de cura à temperatura ambiente.

Tendo como referência a tese de Fernandes (2018), o procedimento das misturas deu-se por meio dos seguintes passos: secagem do solo laterítico na estufa à 105 °C +/- 5°C durante 24 horas; material passado na peneira #600 mm; pesagem do hidróxido de sódio e silicato de sódio e depois preencher até 100 ml de água destilada; os ativadores foram adicionados ao precursor e a mistura foi efetuada manualmente até a homogeneização, aproximadamente, 5 minutos; a mistura foi inserida em moldes prismáticos de 16×2,5×2,5 cm; os moldes foram revestidos por película de plástico e colocados em estufa para cura inicial à 60°C; decorridos 72 horas de cura, houve o desmolde dos corpos de prova e os corpos de prova foram cortados em dimensões de 2,5x2,5x2,5 cm; e rompimento.

8. Resultados e Discussões

Na figura 1 e tabela 1 serão apresentados os rompimentos e as médias à compressão simples dos corpos de prova.



Figura 1 – Rompimento do corpo de prova

Tabela 1 – Resultado das resistências à compressão

	Resistência à compressão simples (MPa)								
	7 dias			14 dias			28 dias		
	CP 1	CsP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9
GEO100S- NaOH,Na₂SiO₃ (10M)	19,12	22,31	14	8,09	12	8,33	13,48	14,71	15,45
Média	18,47			9,47			14,54		
GEO100S- NaOH,Na₂SiO₃ (12M)	13,24	12	16	12,26	14,46	16	15,20	19,37	16
Média	13,74			14,24			16,85		

Fonte: O autor (2020)

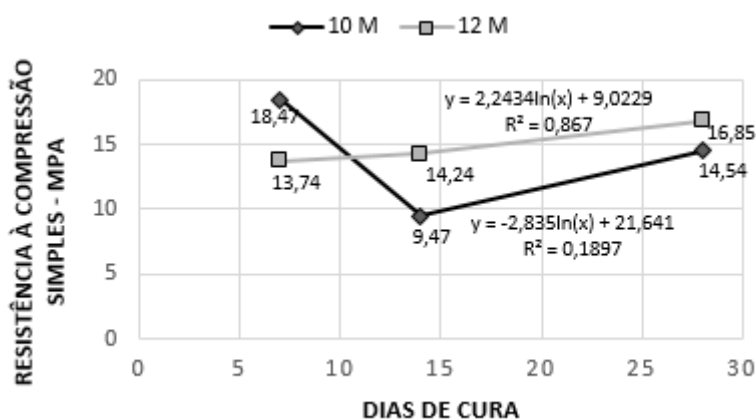


Figura 2 – Gráfico das médias dos geopolímeros

Os resultados de 7 dias de cura para ambas as misturas foram satisfatórios, ressaltando a combinação GEO100S – NaOH, Na₂SiO₃ (10M) atingindo em um molde 22,31 MPa. A mistura com 12M, por mais que possua maior proporção de silicato, obteve resultados inferiores ao 10M. Uma hipótese é o caso de algumas partículas menores terem ficado dentro das partículas maiores e não foram ativadas, assim, prejudicando a resistência do novo produto. No decorrer do tempo de cura, houve crescimento da resistência na mistura GEO 100S – NaOH, Na₂SiO₃ (12M) com 14,24 Mpa (14 dias) e 16,85 Mpa (28 dias) e a GEO 100S – NaOH, Na₂SiO₃ (10M) com 9,47 Mpa (14 dias) e 14,54 Mpa (28 dias).

9. Conclusão

A pesquisa conseguiu provar a eficiência da ativação alcalina com o uso de um solo laterítico formado por 10,68 % de alumínio e 72,12% de silício. A temperatura e o teor molar do ativador influenciaram nas resistências iniciais e foram os principais agentes responsáveis pelas resistências finais obtidas. A maior média obtida foi 14,54 MPa com 10M e 16,85 MPa com 12M, assim, comprovando a hipótese da mistura com maior quantidade de silicato fornecer melhor valor.

É válida a análise através de outro ponto de vista com temperaturas de 40, 60 e 80°C em todo processo com maiores idades de cura e distintas proporções precursores/ativadores. Também seria interessante procurar outros materiais que substituam o silicato de sódio, por exemplo, resíduos de vidro como enriquecedor de sílica. Por fim, o processo das reações alcalinas e alguns resultados de ensaios feitos por outros pesquisadores com precursores e ativadores

alcalinos variados foram apresentados como forma de propulsionar a pesquisa em questão e ilustrar ideias sobre a geopolimerização.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2003.
- DAIBERT, D. J.; SANTOS, P.R. C.** *Análise dos Solos - Formação, Classificação e Conservação do Meio Ambiente*. São Paulo: [s.n.], 2014.
- DAVIDOVITS, J.** *Properties of geopolymers cements*. In: Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes. Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev State Technical University, Kiev, Ucrânia, p.1–19, 1994a.
- DAVIDOVITS, J.** *GEOPOLYMERS: Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement*. Journal Materials Education, Washington, v. 16 (2 & 3). p. 3–25, set. 1994b.
- DAVIDOVITS, J.** *GEOPOLYMER CEMENT: a review*. Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France, p. 1-11, jan. 2013. Disponível em < https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/GPCement2013.pdf > Acesso em: 07 jan. 2019.
- DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A.; VAN DEVENTER, J. S. J.** *Geopolymer technology: the current state of the art*. Journal of Materials Science, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, maio 2007.
- SLATY, Faten; KHOURY, Hani; WASTIELS, Jan; RAHIER, Hubert.** *Characterization of alkali activated kaolinitic clay*. Applied Clay Science, v. 75-76, Editora Elsevier, p. 120–125, mar. 2013.
- FERNANDES, A. C. C.** *Estudo da lixiviação por medição de pH e condutividade elétrica de materiais de ativação alcalina*. 2018. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Beira Interior. Covilhã, 2018.
- HABERT, G.; OUELLET-PLAMONDON, C.** *Atualização recente sobre o impacto ambiental dos geopolímeros*. RileM Technical Letters, v. 1, p. 17–23, abr. 2016.
- HEATH, A.; PAINE, K.; MCMANUS, M.** *Minimising the global warming potential of clay based geopolymers*. Journal Cleaner Production, Issue null, v. 78, Editora Elsevier, p. 75–83, set. 2014.
- LECOMTE-NANA, G.L.; LESUEUR, E.; BONNET, J.P.; LECOMTE, G.** *Characterization of a lateritic geomaterial and its elaboration through a chemical route*. Construction and Building Materials, v. 23, n. 2, p. 1126-1132, fev. 2009.
- LEMOUGNA, P. N.; MADI, A. B.; KAMSEU, E.; MELO, U. C.; DELPLANCHE, M. P.; RAHIER, H.** *Influence of the processing temperature on the compressive strength of Na activated lateritic soil for building applications*. Construction and Building Materials, v. 65, n. 29, p. 60-66, ago. 2014.
- Projeto australiano inova ao usar o concreto livre de cimento*. Revista Grandes Construções: construções, infraestrutura, concessões e sustentabilidade, n. 46, p. 44-45, mar. 2014.
- ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050*. Coordenado por Gonzalo Visado e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/themes/blade/_assets/pdf/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil.pdf>. Acesso em: 29 de fev. 2020.
- SEVERO, C. G. S.; COSTA, D. L.; BEZERRA, I. M. T.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.** *Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativadas alcalinamente*. Jul. 2013.
- VASSALO, E. A. S.** *Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado*. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais. p. 1–104, 2013.