

ESTABILIZAÇÃO ALCALINA DE SOLOS CAULINÍTICOS PARA FABRICAÇÃO DE ADOBES

Adriano da Silva Félix¹; Beatriz Lemos Cavalcante de Carvalho Santiago²; Raimundo Gonçalves Ribeiro Neto³; Normando Perazzo Barbosa⁴; Brunna Lima de Almeida Víctor Medeiros⁵; Khosrow Ghavami⁶

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal da Paraíba - Campus João Pessoa, Brasil
¹adriano.s.felix@hotmail.com; ³rnetogoncalves@hotmail.com; ⁴nperazzob@yahoo.com.br

² Departamento de Arquitetura e Urbanismo - Universidade Federal da Paraíba - Campus João Pessoa, Brasil,
beatrizlemos_s@hotmail.com

⁵ Departamento de Engenharia Engenharia de Materiais - Universidade Federal de Campina Grande - Campus Campina Grande, Brasil, prof.brunna.almeida@gmail.com

⁶Prof. Emérito da Universidade Federal da Paraíba - Campus João Pessoa, Brasil
ghavami@puc-rio.com.br

Palavras-chave: adobe, solo, ativação alcalina, estabilização, água

Resumo

O adobe é certamente um dos materiais mais antigo da humanidade e de menor custo energético entre os materiais de construção. Devido ao seu processo produtivo esse material se torna suscetível à ação da água, sendo necessária sua estabilização. Um novo método de estabilização proposto para aumentar a durabilidade do adobe é o da ativação alcalina. Nesse caso, o ligante alcalino é formado pela dissolução de partículas ricas em sílica e alumina submetidas a um ambiente alcalino. O presente trabalho tem como objetivo realizar a estabilização do solo caulinitico por meio da ativação alcalina para fabricação de adobes, sem a adição de precursores geopoliméricos, com o intuito de melhorar suas características mecânicas e resistência a ação da água. Foram elaboradas misturas com o solo no estado natural (SN) e solo calcinado (SC) com dois tipos de concentrações molares para as soluções alcalinas (10 mols e 12 mols). Para melhorar sua reatividade, o solo foi moído até passar na peneira de nº 325. As amostras foram submetidas a dois processos de cura diferentes (cura ambiente 28°C e cura em estufa elétrica 65°C) e realizado os ensaios de imersão em água e resistência à compressão simples. Os resultados parciais mostram que os adobes produzidos com essas misturas têm maior durabilidade à ação da água, com absorção dentro do limite previsto em norma para o tijolo de solo-cimento e resistência à compressão que varia de 6,3 MPa à 21,7 MPa. Isto possibilita a produção em larga escala de adobes para construção de habitação de interesse social com baixo custo energético no processo produtivo.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a população mundial sofre bastante com a falta de moradia devido aos elevados custos dos materiais de construção industrializados disponíveis no mercado. Além disso, esses insumos necessitam de grandes quantidades de energia no seu processo produtivo e conseqüentemente geram demasiada deposição de resíduos no meio ambiente. Existem algumas técnicas construtivas como alternativa para reduzir esses problemas, entre elas há as técnicas de construção com terra.

São vários os benefícios do uso da terra como material de construção: disponibilidade; excelente desempenho térmico; absorção e liberação de umidade, mantendo o ambiente saudável, poluição mínima e baixo consumo energético; fácil reincorporação a natureza podendo também com a terra, gerarem-se tecnologias apropriadas (Barbosa, Mattone, 2002; Minke, 2006). Entre as diversas técnicas que utilizam a terra como matéria-prima para construção pode se citar a do adobe como uma das que causam menos impacto ao meio ambiente (Degimenci, 2008; Millogo, Morel, 2012; Barbosa, Ghavami, 2015; Corrêa et al. 2015; Félix et al. 2015).

O adobe é uma técnica de construção com terra de fácil produção, que consiste na moldagem da mistura plástica de solo e água, moldado em formas de madeira ou metálicas e postos para secagem ao ar livre a meia sombra (Rogers, Smalley, 1995; Torgal, Eires, Jalali, 2009). Consequentemente, devido a grande facilidade de produção e matéria-prima abundante, esse material foi utilizado nas primeiras construções e vem sendo até os dias atuais (Torgal, Eires, Jalali, 2009).

Porém, quando produzido apenas com solo e água, o adobe tem sua durabilidade reduzida quando exposto a ação da água, sendo necessário a sua estabilização com produtos químicos como cimento Portland, cal, gesso, soluções betuminosas, saliva sintética do cupim ou materiais naturais, como é o caso do amido de mandioca (Corrêa et al, 2006; 2015; Barbosa, Ghavami, 2007; Veiga, 2008; Félix et al, 2015). Outra forma de estabilização química é a ativação alcalina ou geopolimerização. Nesse método, partículas ricas em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) presentes, ou adicionadas, ao solo reagem em um ambiente de alcalinidade elevada, formando um ligante suplementar de estrutura amorfa.

A observação realizada pelo professor e pesquisador Joseph Davidovits (1979; 1987; 1991), na década de 70, de difratogramas de um material amorfo de aluminossilicato obtido pelo precursor caulim e soluções altamente alcalinas de hidróxido de sódio e silicato de sódio, resultou no termo conhecido atualmente como geopolímero. Esse nome derivou-se de um pensamento quanto a sua valia tecnológica, onde “geo” refere-se à natureza da matéria do material inorgânico e “polímero” refere-se à estrutura análoga a de polímeros orgânicos, já que a descoberta surgiu em pesquisas envolvendo polímeros inorgânicos inflamáveis que servissem de material ligante alternativo em meio à crise energética da época.

Atualmente diversos materiais servem como precursores geopoliméricos, em especial as argilas calcinadas. Como o adobe é preparado, em geral, por solos argilosos ricos em sílica e alumina, torna-se possível a estabilização desse material por meio da dissolução desses minerais em meio alcalino (Diop, Crutzerck, 2008; Hohsen, Mostafa, 2010; Diop, Crutzerck, Molez, 2011; Oliveira et al, 2014; Slaty et al, 2015).

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo realizar a estabilização do solo caulinitico por meio da ativação alcalina para fabricação de adobes sem a adição de precursores geopoliméricos, com o intuito de melhorar suas características mecânicas e resistência a ação da água.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nesse estudo foram: solo local (in natura e calcinado), silicato de sódio industrializado (Na_2OSiO_3), hidróxido de sódio (NaOH), água da rede de distribuição pública. Os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

3.1 Caracterização física do solo

O solo utilizado tem uma cor levemente amarelada e sua caracterização foi realizada no seu estado físico natural como é sumarizado na tabela 1.

Para que o solo possa reagir com as soluções alcalinas, o mesmo deve estar com uma granulometria bastante fina. Dessa forma, o solo usado passou por um processo de moagem que modificou sua composição física para otimizar a ativação, como pode ser visto na tabela 2, e após esse processo foi peneirado na peneira de nº 325 (abertura de malha de 0,045 mm).

Tabela 1 - Caracterização do solo no estado natural

Composição granulométrica do solo in natura (%)	
Pedregulho (>2,00mm)	3
Areia grossa (0,06 mm a 2,0 mm)	47
Areia fina (0,074mm a 0,42mm)	33
Silte +Argila (< 0,06 mm)	17
Limites de Atterberg (%)	
Limite de liquidez	23,2
Limite de plasticidade	18,7
Índice de plasticidade	11,8

Tabela 2 – Finura Blaine do solo de acordo com o tempo de moagem e número de rotações

Número de rotações [x 1000 unid.]	Tempo de moagem [mi]	Finura Blaine [cm²/g]
10,0	161	8.974

3.2 Composição química do solo

Para a caracterização química do solo foram realizados os ensaios de difração de raio-x (DRX), onde o material estudado tem uma grande predominância do argilomineral caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e fluorescência de raio-x (FRX). Os resultados da caracterização química do solo são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Composição química do solo

Composto químico	Solo (%)
Sílica (SiO_2)	66,045
Alumina (Al_2O_3)	22,361
Hematita (Fe_2O_3)	7,859
Titânio (TiO_2)	2,844
Potássio (K_2O)	0,076
Cálcio (CaO)	0,167
Sódio (Na_2O)	0,171
Magnésio (MgO)	0,082
Outros	0,569

Geralmente, para o processo de ativação alcalina ou geopolimerização é utilizado um material fonte de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) que é chamada de precursor. Um dos materiais mais utilizados para esse processo é o metacaulim, por apresentar uma elevada concentração desses óxidos no seu estado amorfo. Nessa lógica foi utilizado o solo na forma natural e calcinado. O solo passou por um processo de calcinação à 700° C durante um período de 2 horas.

3.3 Água

Para moldagem dos corpos de prova foi utilizada água da rede distribuidora que abastece a UFPB.

3.4 Soluções alcalinas (silicato de sódio e hidróxido de sódio)

Foi utilizados silicato de sódio industrializado com relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2,17$ em massa e pH de aproximadamente 13. O hidróxido de sódio, em escamas, tinha concentração de 98% e pH de 13.

3.5 Misturas

Para a produção das misturas ativadas alcalinamente foi utilizado o método sugerido por Davidovits (1982) para gerar os compostos do tipo NaPSS (polissialatosiloxo de sódio) que tem a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 4$. Este método consiste em preparar uma mistura de aluminossilicatos em solução alcalina, em que a composição da mistura tenha razões molares de óxidos dentro dos valores indicado na tabela 4.

Tabela 4 – Razão molar necessária para a formação de geopolímeros

Razões molares dos óxidos	
$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0,20 a 0,28
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3,50 a 4,50
$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	15,00 a 17,50
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	0,80 a 1,20

Para a moldagem dos corpos de prova foram elaboradas soluções alcalinas de hidróxido de sódio e silicato de sódio de 10 mols e 12 mols e adicionadas ao solo no estado natural (SN) e solo calcinado (SC). Foram moldados corpos de prova cilíndrico de 5 cm x 10 cm e adensado durante 2 minutos usando a base de um agitador de peneiras. Após 10 minutos do processo de moldagem aos corpos de prova foram retiradas dos cilindros e colocadas em um saco plástico para ajudar a conservar a água da mistura e só retirada após 3 dias (Sumajow, Rangan, 2006; Félix et al, 2015) (figura 1). Em seguida eram retiradas e submetidas ao processo de cura térmica em estufa elétrica a 65°C e cura ambiente de aproximadamente 28°C.



Figura 1 - Corpos de prova cilíndrico de 5 cm x 10 cm e confinamento em saco plástico

As proporções dos materiais para a ativação alcalina da terra caulinitica são apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 – Quantidades dos materiais para o solo in natura e calcinado para a elaboração de 10 corpos de prova

Solo in natura (g)	Molaridade	Ativador alcalino		
		Na ₂ O.2SiO ₃ (g)	NaOH (g)	Água (%)
SN – 3.400	10 Mols	50	280	20
SN – 3.400	12 Mols	50	340	20
Solo calcinado (g)	Molaridade	Ativador alcalino		
		Na ₂ O.2SiO ₃ (g)	NaOH (g)	Água (%)
SC – 3.400	10 Mols	50	280	20
SC – 3.400	12 Mols	50	340	20

O procedimento de moldagem dos corpos de prova pode ser visto na figura 2.

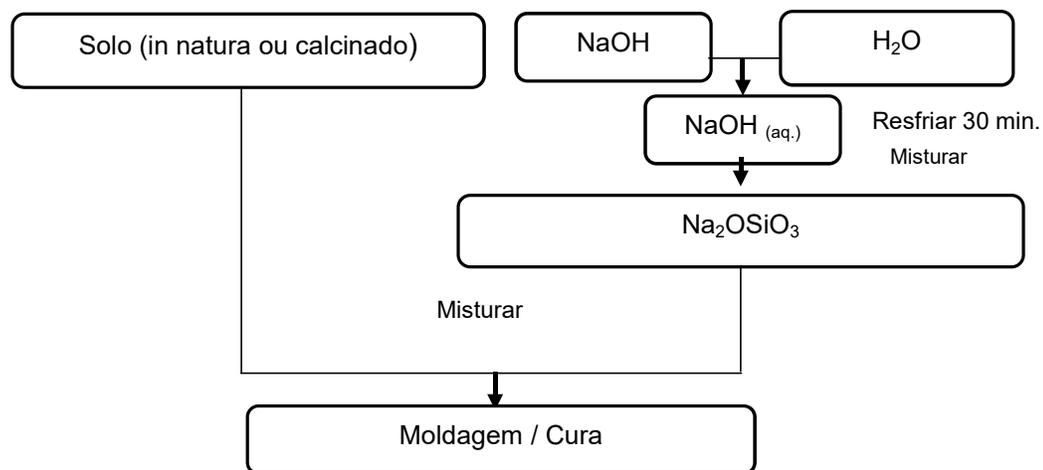


Figura 2 – Esquema sequencial do processo de moldagem

3.6 Ensaios de resistência à compressão, resistência à ação da água, absorção de água e perda de massa

Os ensaios de resistência à compressão, resistência à ação da água, absorção e perda de massa foram feitos considerando-se uma adaptação da norma NBR 8492 (ABNT, 2012). A absorção foi determinada pela equação (1) nos corpos de prova que resistiram à ação da água e foi possível determinar sua massa após o ensaio.

$$W = \frac{P_w - P_s}{P_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

W: absorção de água (%)

P_w: massa úmido (g)

P_s: massa seca (g)

A perda de massa foi determinada pela (equação 2).

$$M = \frac{P1 - P2}{P2} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

M: Perda de massa (%)

P1: Massa antes do ensaio (g)

P2: Massa depois do ensaio (g)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resistência à ação da água, absorção de água e perda de massa

Todos os corpos de prova apresentaram um bom desempenho quando submetidos ao ensaio de imersão (figura 3). De acordo com Davidovits, (1979) e Diop e Crutzerck (2008) esse fato se deve ao potencial de dissolução dos alumino-silicatos presentes no solo caulínico exposto em um meio de alta alcalinidade, dessa forma sintetizando um material mais coeso e de difícil solubilidade em meio aguoso ou ácido.

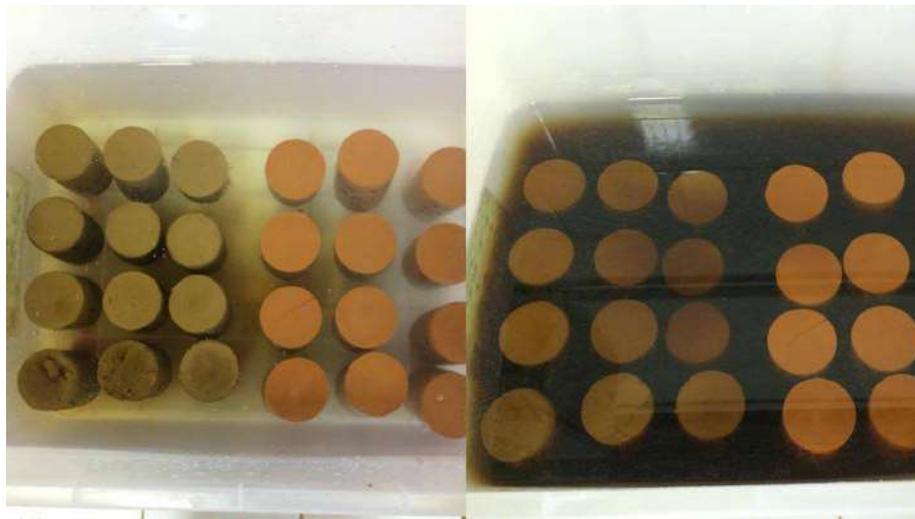


Figura 3 - Corpos de prova imersos no início do ensaio e ao término depois de 24 horas.

Os resultados desse ensaio são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência à água, absorção e perda de massa por imersão

Amostras em cura ambiente 28° C	Massa (g)	Integridade dos corpos de prova imersos em água por 24h	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	Massa da água (g)	Absorção de água (%)	Perda de massa (g)	Perda de massa (%)
SN-10 Mols	318,5	sim	356,1	317,0	37,6	11,8	1,5	0,48
SN-12 Mols	314,30	sim	347,7	311,0	33,4	10,6	3,3	1,06
SC-10 Mols	330,4	sim	380,4	329,2	50,0	15,1	1,3	0,38
SC-12 Mols	331,9	sim	379,0	328,8	48,1	14,2	3,1	0,93

Amostras em cura elétrica 65°C	Massa (g)	Integridade dos corpos de prova imersos em água por 24h	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	Massa da água (g)	Absorção de água (%)	Perda de massa (g)	Perda de massa (%)
SN-10 Mols	303,2	sim	338,7	300,1	35,5	11,7	3,1	1,02
SN-12 Mols	318,7	sim	350,0	314,3	31,3	9,8	4,4	1,40
SC-10 Mols	331,4	sim	381,7	331,1	50,3	15,2	0,3	0,09
SC-12 Mols	330,5	sim	375,9	327,9	45,4	13,7	2,6	0,79

Todas as amostras obtiveram resultados de absorção dentro dos valores exigidos pela norma NBR 8492 (ABNT, 2012). As misturas de solo calcinado (SC) apresentaram valores maiores em relação aos do solo natural (SN) devido a sua maior reatividade por conter maior quantidade de material amorfo em sua composição proveniente do mineral metacaulinitico, que acelera o processo de dissolução dos aluminos-silicatos por meio de uma reação exotérmica e conseqüentemente eliminando a água da mistura de forma mais rápida (Davidovits, 1979).

4.2 Resistência à compressão

Todas as misturas tiveram resistência à compressão com valores superiores a da norma NBR 8492 (ABNT, 2012), podendo ser usados para fabricação de adobes com função estrutural como pode ser visto na figura 4 e 5.

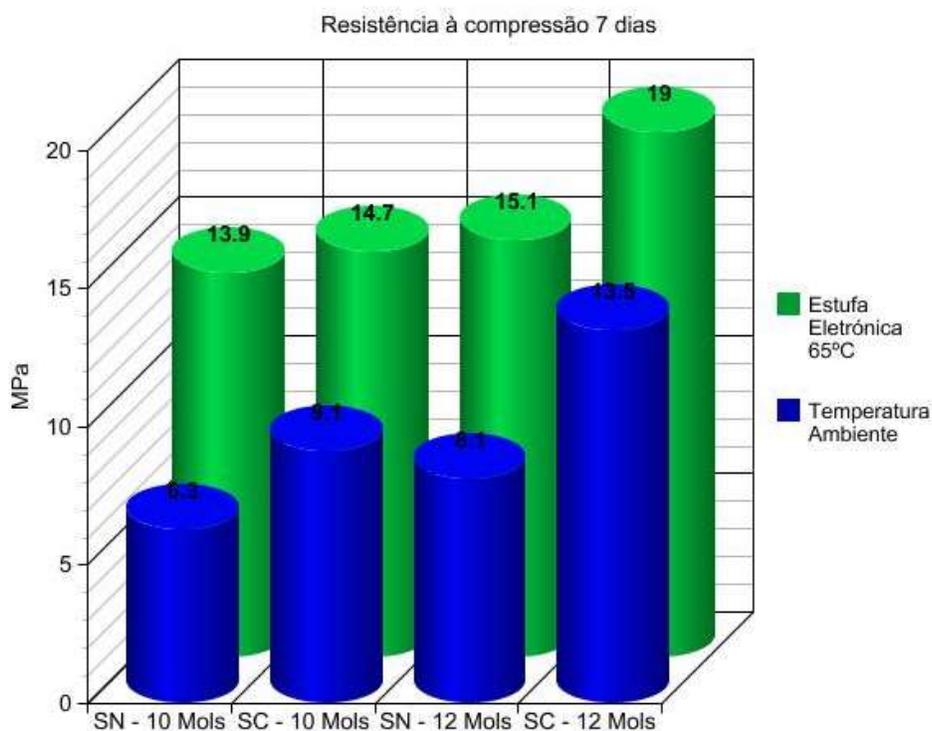


Figura 4 - Resistência à compressão das amostras de 7 dias

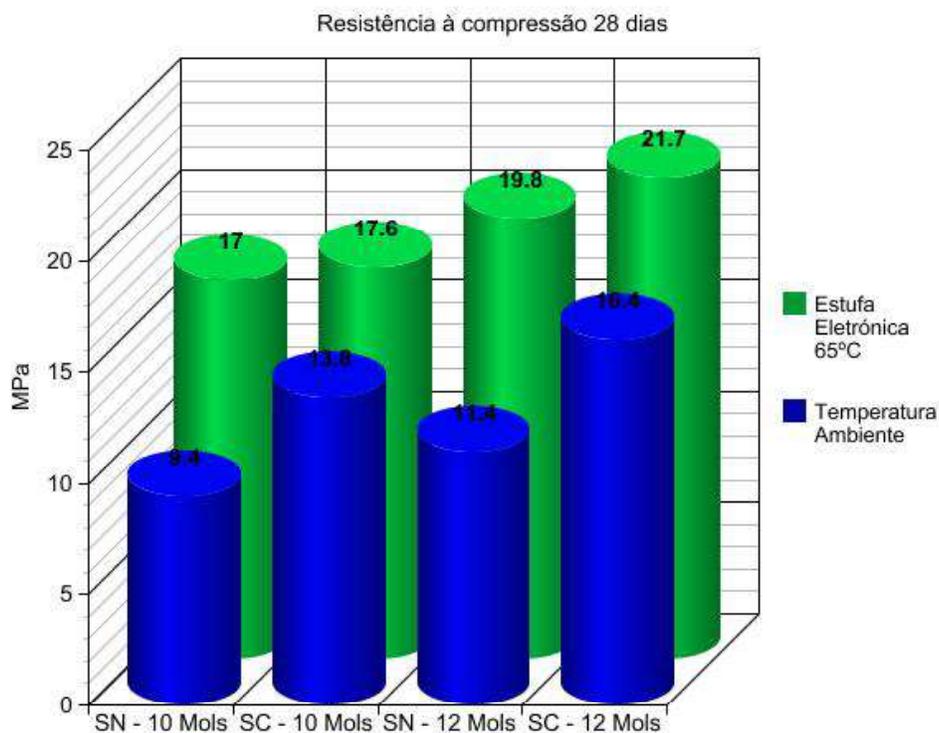


Figura 5 - Resistência à compressão das amostras de 28 dias (média de 5 corpos de prova)

As amostras que obtiveram os melhores resultados foram as curadas em estufa elétrica, em algumas misturas foi possível obter um aumento de resistência próximo de 50% em relação as amostras que foram submetidas a cura ambiente, esses resultados são semelhantes aos da literatura sobre adobes produzidos com ligantes ativados alcalinamente. Outro fator interessante é a evolução da resistência mecânica em relação ao aumento da molaridade da solução, segundo Diop e Crutzerck (2008), Diop, Crutzerck e Molez (2011), esse fato se deve ao maior potencial de dissolução da solução alcalina, porém foram registrados nas misturas de 12 mols o surgimento de carbonato de sódio (eflorescência) que, a longo prazo, é prejudicial para a durabilidade das alvenarias construídas com esse material, de certa forma sendo preferencial o uso das misturas com soluções de 10 mols.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi possível identificar o potencial de sintetização do solo caulinítico exposto a um meio de alcalinidade elevada para a produção de adobes que podem ser usados para alvenaria de vedação ou estrutural. Para estudos futuros estão sendo elaboradas misturas onde as soluções tenham uma menor quantidade de NaOH, tendo em vista o aparecimento de carbonato de sódio e o uso do solo caulinítico com uma finura mais elevada ou um solo que tenha predominância de outro argilomineral. É importante o conhecimento dessas outras variáveis a fim de proporcionar a estabilização do solo de forma que evite o uso de precursores geopoliméricos e tornando simples o uso dessa técnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). NBR 8492: Tijolo maciço de solo-cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=193718>>

Barbosa N. P, Ghavami K. (2007). Terra crua para edificações. São Paulo: IBRACON, 2007, v. 2, p. 1505-1538.

- Barbosa, N. P.; Ghavami, K. (2015). Earth construction and sustainability. *Key Engineering Materials*, 634, 433-446.
- Barbosa, N. P.; Mattone, R. (2002). Construção com terra crua. I Seminário Ibero-americano de Construção com Terra. Salvador, BA, Anais Proterra/CYTED. Disponível em: www.passeidireto.com/arquivo/2106795/2-terra-cap-ibracon/11.
- Corrêa, A.; Teixeira, V.; Lopes, S.; Oliveira, M. (2006) Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do adobe (Tijolos de terra crua). *Lavras* 30, p. 503-515.
- Corrêa, A. A. R.; Mendes, L. M.; Barbosa, N. P.; De Paula Protásio, T.; De Aguiar Campos, N.; Tonoli, G. H. D. (2015). Incorporation of bamboo particles and "synthetic termite saliva" in adobes. *Construction and Building Materials*, 98, 250-256.
- Davidovits, J. (1979). Synthesis of new high-temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites. *Annual Pacific Technology Conference Thecnical Displays*, 4: 151-154.
- Davidovits, J. (1982) Mineral polymers and methods of making them. US Patent 4.349.386. 14 Set 1982. Disponível em: < <http://www.google.com/patents/US4349386>>.
- Davidovits, J. (1987). Ancient and modern concretes: What is the real difference? *Concrete International*, v. 9, nº 12, p. 23-35, Dezember.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis* 37, 1633.
- Degirmenci, N. (2008). The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization. *Construction and Building Materials*, 22, 1220–1224.
- Diop, M. B.; Crutzerck, M. W. (2008). Low temperature process to create brick. *Construction and Building Materials*, 22, 1114–1121.
- Diop, M. B.; Crutzerck, M. W.; Molez, I. (2011). Comparing the performances of bricks made with natural clay and clay activated by calcination and addition of sodium silicate. *Applied Clay Science*, 54, 172–178.
- Félix, A. S.; Ferreira, P. R. L.; Barbosa, N. P.; Ghavami, K. (2015). Estabilização alcalina de adobes. 15º Seminário Iberoamericano de Arquitetura y Construcción con Tierra – SIACOT. Cuenca, Equador.
- Hohsen, Q., Mostafa, N. Y. (2010). Investigating the possibility of utilizing low kaolinitic clays in production of geopolymer bricks. *Ceramics – Silikáty*, 54 (2), 160-168.
- Millogo, Y.; Morel, J.C. (2012). Microstructural characterization and mechanical properties of cement stabilized adobes. *Materials and Structures*, 45, 1311–1318.
- Minke, G. (2006) *Building with earth, Design and technology of a sustainable architecture*. Birkhäuser – Publishers for Architecture, Basel- Berlin-Boston.
- Oliveira, L. S.; Barbosa, N. P.; Carvalho, C. M.; Santos F. S. (2014). Stabilization of raw earth through alkaline activation. *Key Engineering Materials*, 600, 215-224.
- Rogers, C. D. F.; Smalley, I. J. (1995). The adobe reaction and the use of loess mud in construction. *Construction and Building Materials*, 40, 137-138.
- Slaty, F.; Khoury, H.; Rahier, H.; Wastiels, J. (2015), Durability of alkali activated cement produced from kaolinitic clay. *Applied Clay Science*, 104, 229–237.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos técnicos do Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), que com muito presteza ajudou para a conclusão desse trabalho.

AUTORES

Adriano da Silva Félix, mestrando em engenharia civil e ambiental da Universidade Federal da Paraíba, tecnólogo em construção de edifícios. Currículo completo em: <http://lattes.cnpq.br/3616946997976293>.

Beatriz Lemos Cavalcante de Carvalho Santiago, mestranda em arquitetura e urbanismo na Universidade Federal da Paraíba, arquiteta. Currículo completo em: <http://lattes.cnpq.br/547535055494039>.

Raimundo Gonçalves Ribeiro Neto, graduando em engenharia civil na Universidade Federal da Paraíba. Currículo completo em: <http://lattes.cnpq.br/6404781036654835>.

Brunna Lima de Almeida Victor Medeiros, professora do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, doutoranda em engenharia de materiais na Universidade Federal de Campina Grande. Currículo completo em: <http://lattes.cnpq.br/9966295997259863>.

Normando Perazzo Barbosa, professor titular do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba. Currículo completo em: <http://lattes.cnpq.br/6420367558476872>.

Khosrow Ghavami, Prof. Aposentado da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Prof. Emérito da Universidade Federal da Paraíba. Currículo completo em: <http://lattes.cnpq.br/1427567976681355>.