

ESTABILIZAÇÃO ALCALINA DE ADOBES

Adriano da Silva Felix¹; Pablo Raphael de Lacerda Ferreira²; Normando Perazzo Barbosa³; Khosrow Ghavami⁴

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal da Paraíba, Brasil; adriano.s.felix@hotmail.com

²Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal da Paraíba, Brasil; pablorld@yahoo.com.br

³Prof. Titular do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal da Paraíba, Brasil; nperazzob@yahoo.com.br

⁴Prof. Emérito da Universidade Federal da Paraíba; ghavami@puc-rio.com.br

Palavras-chave: adobe, ativação alcalina, estabilização

Resumo

Alvenarias de adobe estão certamente entre aquelas que menor impacto causam ao meio ambiente. No entanto, uma limitação dos adobes é sua vulnerabilidade à ação da água. Pode-se melhorar essa propriedade incorporando-se estabilizantes convencionais como cal e cimento, porém como nos adobes são usadas terras argilosas, a quantidade de estabilizante para ser efetiva, pode chegar a 8% ou mesmo 10% em massa. Neste trabalho propõe-se um novo método para estabilização da terra, através da ativação alcalina. Nesse processo, componentes mineralógicos do solo e de produtos a eles adicionados reagem internamente em um ambiente de pH elevado. A quantidade de ligante cai para 3% ou mesmo 2%. Em concretos, nos quais se requer altas resistências, utiliza-se silicato de sódio industrial, de preço elevado. No caso da estabilização da terra, utilizou-se uma mistura de sílica ativa com hidróxido de sódio para substituir o produto comercial. Para fornecer sílica e alumina amorfas, foram utilizados metacaulim e/ou resíduos cerâmicos moídos. À mistura de hidróxido de cálcio, sílica ativa, metacaulim/resíduos cerâmicos, nas proporções adequadas chamou-se de ligante geopolimérico. Foram testados os teores de 0%, 1%, 2% e 3% desse ligante em relação à massa de terra. Percebeu-se que o ligante geopolimérico modifica as propriedades reológicas da mistura terra-água. Então, a quantidade de água para moldagem dos adobes foi aquela considerada adequada para tal, variando com a quantidade de ligante adicionado. Foi avaliado o efeito do ligante geopolimérico nas resistências à compressão, resistência à ação da água e variações dimensionais dos adobes. Os resultados mostram-se promissores, indicando um grande potencial para fabricação em larga escala de adobes com propriedades melhoradas.

1 INTRODUÇÃO

O problema habitacional em todo o planeta, e principalmente nos países do continente africano, asiático e sulamericano está muito longe de ser resolvido. Além disso, os materiais de construção industrializados possuem valor inacessíveis às camadas mais pobres da humanidade, envolvendo em seu processo produtivo um grande valor energético, gerando grandes impactos ambientais.

Um produto com grande potencial para ajudar a minimizar o déficit habitacional, e com baixo custo energético, é o adobe. Este vem sendo utilizado desde as primeiras civilizações tanto para a construção de pequenas casas como de enormes templos e palácios. Barbosa e Mattone (2002) afirmam que, vários são os benefícios do uso de terra crua em construção: disponibilidade; excelente desempenho térmico; absorção e liberação de umidade mantendo o ambiente agradável; poluição mínima e baixo consumo energético; fácil reincorporação com a natureza podendo também com a terra, gerarem-se tecnologias apropriadas.

Por ser um material que não passa pelo processo de queima, o adobe tem baixa ou quase nenhuma resistência à água. Para melhorar a durabilidade dos blocos feito com terra é necessário estabilizar o solo. Existem várias maneiras para estabilização (Barbosa; Ghavami, 2007):

- Ação mecânica com equipamentos capazes de densificar a terra reduzindo poros e capilaridade;

- O uso de produtos químicos hidrofugantes para eliminar a absorção de água pelos grãos de solo, sendo, em geral, produtos caros;
- Envolvimento dos grãos de terra por uma fina camada de material impermeabilizante capaz de fazer o fechamento dos poros e canais capilares, como emulsões asfálticas;
- A formação de ligações químicas entre os cristais de argila e cal;
- Criação de um esqueleto sólido inerte que se opõe ao movimento dos grãos. É o caso dos agentes de ligação, tais como cimento Portland.

Além disso, a adição de fibras pode ser considerada como um método de estabilização, dando ductilidade ao material, mas não é capaz de dar resistência contra a ação da água.

Novos métodos de estabilização merecem ser pesquisados. A argila é constituída de sílica e alumina que pode estar, mesmo em pequena quantidade, na forma amorfa. Tal fato pode contribuir para a estabilização através da ativação alcalina, que é um método químico capaz de melhorar as propriedades de um solo.

A ativação alcalina também é conhecida como geopolimerização, termo sugerido por Davidovits (1991) para este tipo de reação, em virtude da semelhança com a síntese dos polímeros orgânicos por meio de condensação e utilização de materiais cimentícios suplementares (Pinto, 2004).

Na ativação alcalina, a coesão do material é devida aos componentes que reagem mineralógicamente no seu interior em um ambiente de pH alto.

Assim, as partículas de aluminossilicato sólidas em meio aquoso altamente alcalino produzem um aluminossilicato sintético dito "geopolimérico". Dessa forma suas estruturas são designadas por polisialatos onde SiO_4 e AlO_4 tetraédricos estão ligadas rotativamente por partilha de átomos de oxigênio (Davidovits, 1991). A tabela 1 sumariza tais compostos.

Tabela 1. Nomenclatura do Geopolímero (Davidovits, 1982)

Designação	Símbolo	Fórmula	Fração	
			Si:Al	$\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$
Poli-sialato	PS	-Si-O-Al-	1	2
Poli-(sialato-siloxo)	PSS	-Si-O-Al-O-Si-O-	2	4
Poli-(sialato-disiloxo)	PSDS	-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-	3	6

Estudos realizados por Davidovits (1982) mostraram, que foram sintetizados geopolímeros utilizando o precursor de caulinita, $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$, uma fonte de silício (SiO_2), e soluções de hidróxido de sódio e/ou hidróxido de potássio com diferentes concentrações, numa temperatura da síntese de 150°C. De modo geral as temperaturas de síntese utilizadas variam de 25°C a 100°C, o que influencia tanto a cinética da reação, quanto nas propriedades que determinam o tipo de aplicação do produto sintetizado (Davidovits, 1987).

Para a obtenção do geopolímero os precursores mais utilizados são metacaulinita e também resíduos industriais provenientes da mineração e das usinas termoelétricas, onde esses materiais são compostos, na sua maioria, por sílica e alumina (argila calcinada, cinzas volantes e escória de alto forno). O grande problema na síntese dos produtos geopoliméricos são as soluções alcalinas, que muitas vezes são produtos industriais, alguns com valor bastante elevado (silicato de sódio, silicato de potássio, hidróxido de sódio e hidróxido de potássio).

O presente estudo estabelece a proposta de redução de custo do ligante geopolimérico com substituição do silicato de sódio industrial por outros tipos fabricados em laboratório. Estes serão produzidos com os materiais metacaulim, sílica ativa e resíduos de cerâmica vermelha, além de hidróxido de sódio nas proporções ideais.

2 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é desenvolver um método para estabilização da terra para aplicação em adobes através da ativação alcalina, utilizando soluções produzidas em laboratório com metacaulim, sílica ativa (microssílica), resíduos de cerâmica vermelha e hidróxido de sódio, substituindo a solução industrializada.

3 METODOLOGIA

Os materiais utilizados nesse estudo foram: solo local, metacaulim (MK), sílica ativa (microssílica) (MS), resíduo da cerâmica vermelha moído (RCV), silicato de sódio industrializado (Na_2OSiO_3), hidróxido de sódio (NaOH), água da rede de distribuição pública e água destilada. Os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

3.1 Caracterização do solo

A caracterização do solo no seu estado natural é indicada na tabela 2.

Tabela 2. Caracterização do solo no estado natural

Granulometria do solo in natura (%)	
Areia (0,06 mm a 2,0 mm)	60
Silte (0,002 mm a 0,06 mm)	27
Argila (< 0,002 mm)	13
Limites Atterberg (%)	
Limite de liquidez	28,2
Limite de plasticidade	19,7
Índice de plasticidade	11,3

3.2 Precursores geopoliméricos

Para utilizar a ativação alcalina como estabilizante em adobe foram utilizados dois precursores geopoliméricos, metacaulim e resíduos da cerâmica vermelha, a fim de verificar o desempenho na resistência à água e à compressão. A composição química dos precursores, indicado na tabela 3, foi determinada por ensaio de fluorescência de raios X (FRX).

Tabela 3. Composição química dos precursores utilizados

Composto químico	Metacaulim (%)	Cerâmica vermelha (%)
SiO_2	54,003	60,101
Al_2O_3	38,584	24,398
Fe_2O_3	3,585	6,814
K_2O	0,723	2,809
CaO	0,380	1,649
Na_2O	0,171	0,171
MgO	1,236	1,815
Outros	1,318	2,243

O metacaulim é um dos precursores mais utilizados para a obtenção do geopolímero devido a sua composição ser rica em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) reativa. Os resíduos da cerâmica vermelha foram utilizados por questões ambientais e serem ricos naqueles óxidos.

3.3 Água

Para se obter a plasticidade necessária para as misturas, foi utilizada água potável ($H_2O_{pot.}$) e para a fabricação das soluções alcalinas (silicato de sódio (MK, MS e RCV) foi feito o uso de água destilada ($H_2O_{dest.}$).

3.4 Soluções alcalinas (silicato de sódio)

O silicato de sódio industrializado utilizado apresentou relação $SiO_2/Na_2O = 2,17$ em peso e pH de aproximadamente 13.

As soluções alcalinas proposta nesse trabalho para substituir o silicato industrializado foram obtidos através da relação da massa atômica dos compostos encontrado na sílica ativa (microsílica), metacaulim, resíduo da cerâmica vermelha e hidróxido de sódio. O balanceamento estequiométrico realizado com esses composto fornecia as proporções exata de cada material.

3.5 Misturas

Para a produção do ligante geopolimérico o método abordado foi o sugerido por Davidovits (1982), para gerar os compostos do tipo NaPSS (polissialatosiloxo de sódio). Este método consiste em preparar uma mistura de alumino-silicatos 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	
Na_2O/SiO_2	0,20 a 0,28
SiO_2/Al_2O_3	3,50 a 4,50
H_2O/Na_2O	15,00 a 17,50
Na_2O/Al_2O_3	0,80 a 1,20

Para a moldagem dos corpos de prova foram elaborado misturas com percentagens do ligante ativado alcalinamente de 0%, 1%, 2% e 3% em relação ao peso do solo. Os materiais foram misturados manualmente, as amostras para teste de absorção de água eram cilíndrico de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Os elaborados para resistência à compressão foram obtidos através de um molde cúbico com 5 cm de aresta, como pode ser visto na figura 1.



Figura 1. Mistura manual dos materiais e molde cúbico para elaboração dos corpos de prova

Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos eram colocados em um saco plástico para ajudar a conservar a água da mistura e só era retirado após 3 dias. Em seguida eram

levados a estufa para a cura em temperatura de 65°C e retirados para o ensaio de resistência à compressão (figura 2).



Figura 2. Amostras em cura em saco plastico até o terceiro dia após remoção

As proporções dos materiais para o ligante alcalino podem ser verificadas na tabela 5.

Tabela 5. Proporções utilizadas na ativação do solo

Solo %	Ativador alcalino %	% Ativador alcalino				% H ₂ O _{pot.}
		Precursor (MK ou RCV)	Na ₂ O.2SiO ₃	NaOH	Água destilada	
100	0%	-	-	-	-	18,5
100	1%	0,37	0,36	0,04	0,22	12,0
100	2%	0,74	0,73	0,08	0,44	10,4
100	3%	1,12	1,10	0,12	0,66	10,4

As etapas do processo de mistura são definidas na figura 3.

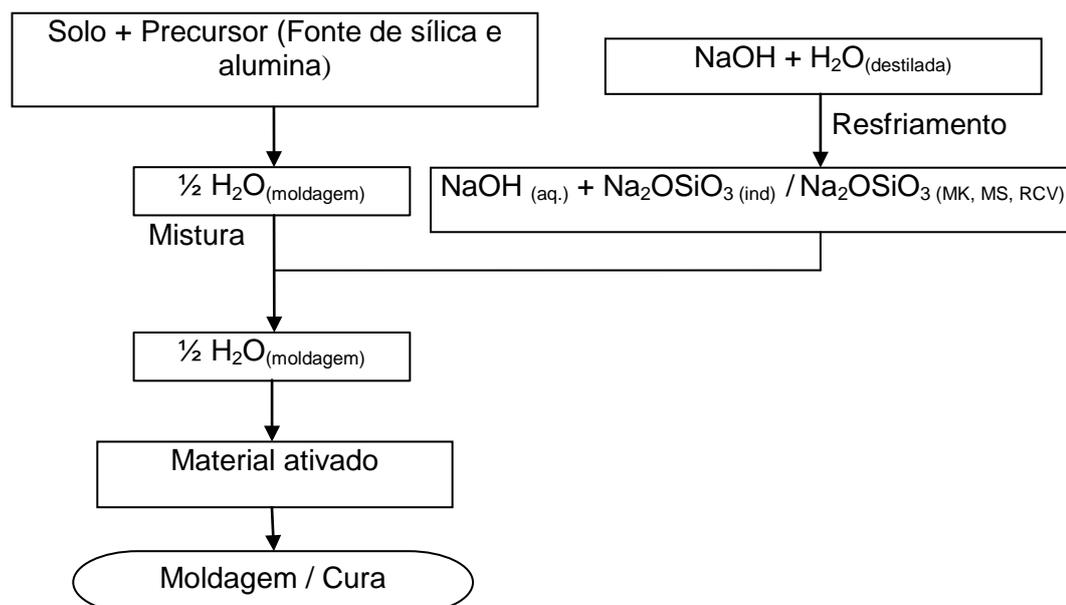


Figura 3. Processo de moldagem dos corpos de prova

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

Os ensaios de resistência e absorção de água foram feitos considerando-se uma adaptação da norma NBR 8492/84 Tijolo maciço de solo-cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água. A absorção dos corpos de prova foi determinada de acordo com a equação 1, nas amostras nas quais que 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 seco (g)

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

$$M = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100 \quad (2)$$

Onde: M: Perda de massa (%)

P_1 . Massa antes do ensaio (g)

P_2 . Massa depois do ensaio (g)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resistência e absorção de água

As amostras que foram estabilizadas através da ativação alcalina com as soluções propostas resistiram à ação da água, exceto as elaboradas com teor de 1% do silicato de (MK, MS e RCV). Além da resistência à água, os blocos alcalinamente ativados tiveram valores de absorção que variaram de 10% à 12%, com as amostras de 3% de silicato industrializado e o MK como precursor e 3% de silicato RCV com o resíduo cerâmico como precursor respectivamente. Na figura 3 vêem-se os corpos de prova imersos em água.



Figura 4. Amostras submetidas ao ensaio de absorção e resistência à água

Os corpos de prova que mostraram o melhor resultado de absorção entre as soluções proposta nesse estudo foi o 3% de silicato de MK e precursor de MK com teor de 11% e a amostra com 3% de silicato de MK e precursor de RCV com 10,7% de absorção, porém esse último apresentou uma perda de massa de 1,5%. Os valores de todos os corpos de prova são visto nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5. Resultado do ensaio de resistência à água e absorção de água com precursor de metacaulin

Tipo da Amostra	Peso (g)	Resistência à água	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da água (g)	Absorção de água (%)	Perda de massa (g)	Perda de massa (%)
Silicato IND. 1%	250	SIM	278,8	249,3	28,8	11,5	0,7	0,38
Silicato IND. 2%	250	SIM	276	249,4	26	10,4	0,6	0,30
Silicato IND. 3%	250	SIM	275	249,2	25	10,0	0,8	0,41
Silicato MK. 1%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato MK. 2%	250	SIM	279,3	249	29,3	11,7	1,0	0,55
Silicato MK. 3%	250	SIM	277,5	249,1	27,5	11,0	0,9	0,48
Silicato RCV. 1%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato RCV. 2%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato RCV. 3%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato MS. 1%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato MS. 2%	250	SIM	278,5	249,1	28,5	11,4	0,9	0,48
Silicato MS. 3%	250	SIM	278	248,1	28	11,2	1,2	1,04

Tabela 6. Resultado do ensaio de resistência à água e absorção de água com precursor de resíduo cerâmico

Tipo da Amostra	Peso (g)	Resistência à água	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da água (g)	Absorção de água (%)	Perda de massa (g)	Perda de massa (%)
Silicato IND. 1%	250	SIM	278	248,58	28	11,2	1,4	0,60
Silicato IND. 2%	250	SIM	276	249,2	26	10,4	0,8	0,30
Silicato IND. 3%	250	SIM	276,4	249,3	26,4	10,5	0,7	0,30
Silicato MK. 1%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato MK. 2%	250	SIM	278,3	248,1	28,3	11,3	1,9	0,80
Silicato MK. 3%	250	SIM	276,7	246,3	26,7	10,7	3,7	1,50
Silicato RCV. 1%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato RCV. 2%	250	SIM	269	234,4	19	7,6	15,7	6,30
Silicato RCV. 3%	250	SIM	277,9	246,8	27,9	11,2	3,2	1,30
Silicato MS. 1%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato MS. 2%	250	SIM	277,9	247,5	27,9	11,1	2,6	1,00
Silicato MS. 3%	250	SIM	281	248,4	31	12,4	1,6	0,60

O corpo de prova com silicato de RCV com precursor de RCV teve um baixo valor de absorção de água, mas esse resultado foi obtido devido à grande perda de massa que o mesmo obteve.

Os testes feito com amostras não submetidas a cura em estufa a temperatura de 65°C não apresentaram resistência a ação da água, exceto as que tiveram silicato industrializado na sua composição.

4.2 Ensaio de resistência à compressão

Nos ensaios de resistência à compressão as amostras que obtiveram melhor desempenho foram as com silicato industrializado, chegando a valores de 6,1 MPa. Porém todos os corpos de provas com o silicato proposto tiveram resistência à compressão com valores superiores aos da norma NBR 7171/2005 - Bloco cerâmico para alvenaria, para blocos não portantes classe A e B que são 1,5 MPa e 2,5 MPa, respectivamente. A grande maioria das misturas usadas também superaram a resistência requerida pela norma que trata de blocos maciços de solo cimento, NBR 8491/12 – Tijolo de solo-cimento. Especificações.

Dentre as amostra elaboradas com os silicatos propostos a que obteve melhor resultado foi a com composição de 2% de silicato de MK com ambos os precursores, como visto nas figuras 5 e 6.

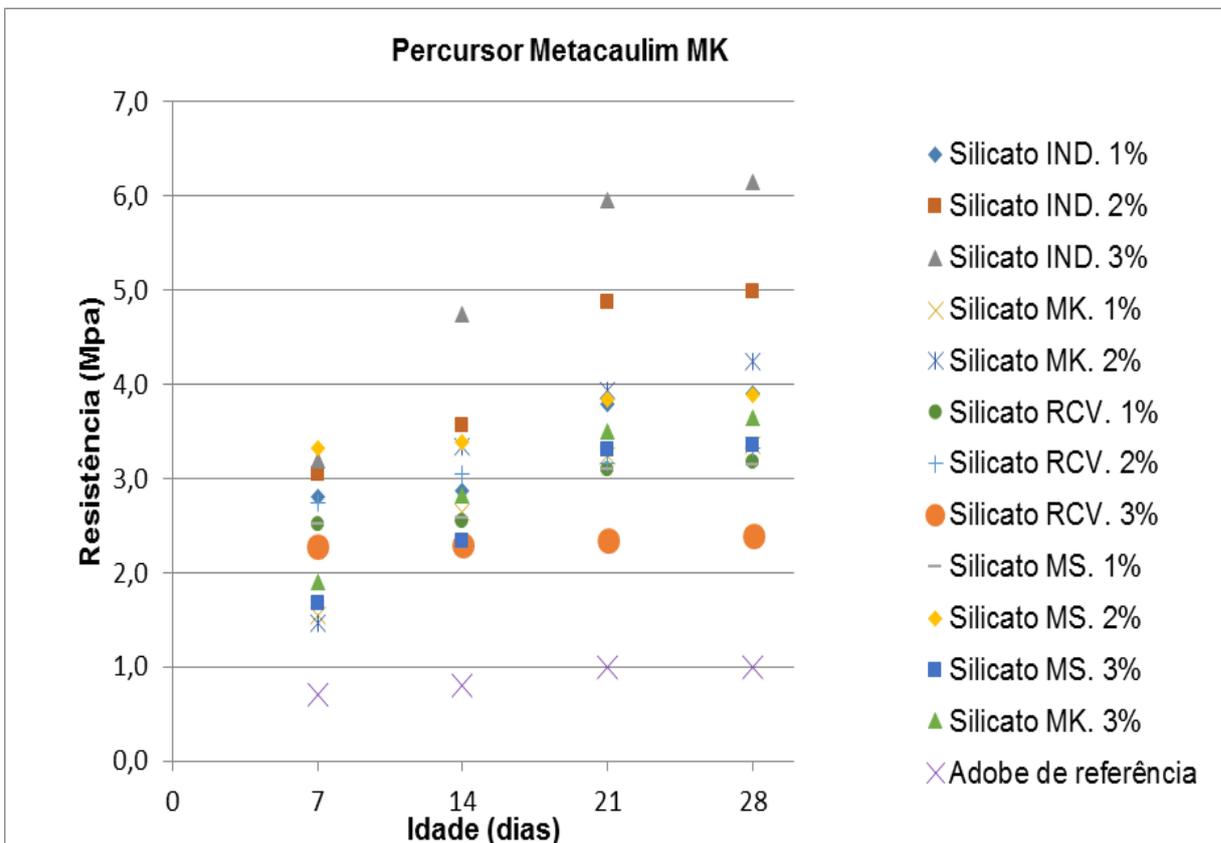


Figura 5. Resistência à compressão com as amostras do precursor de MK (média de 3 corpos de prova)

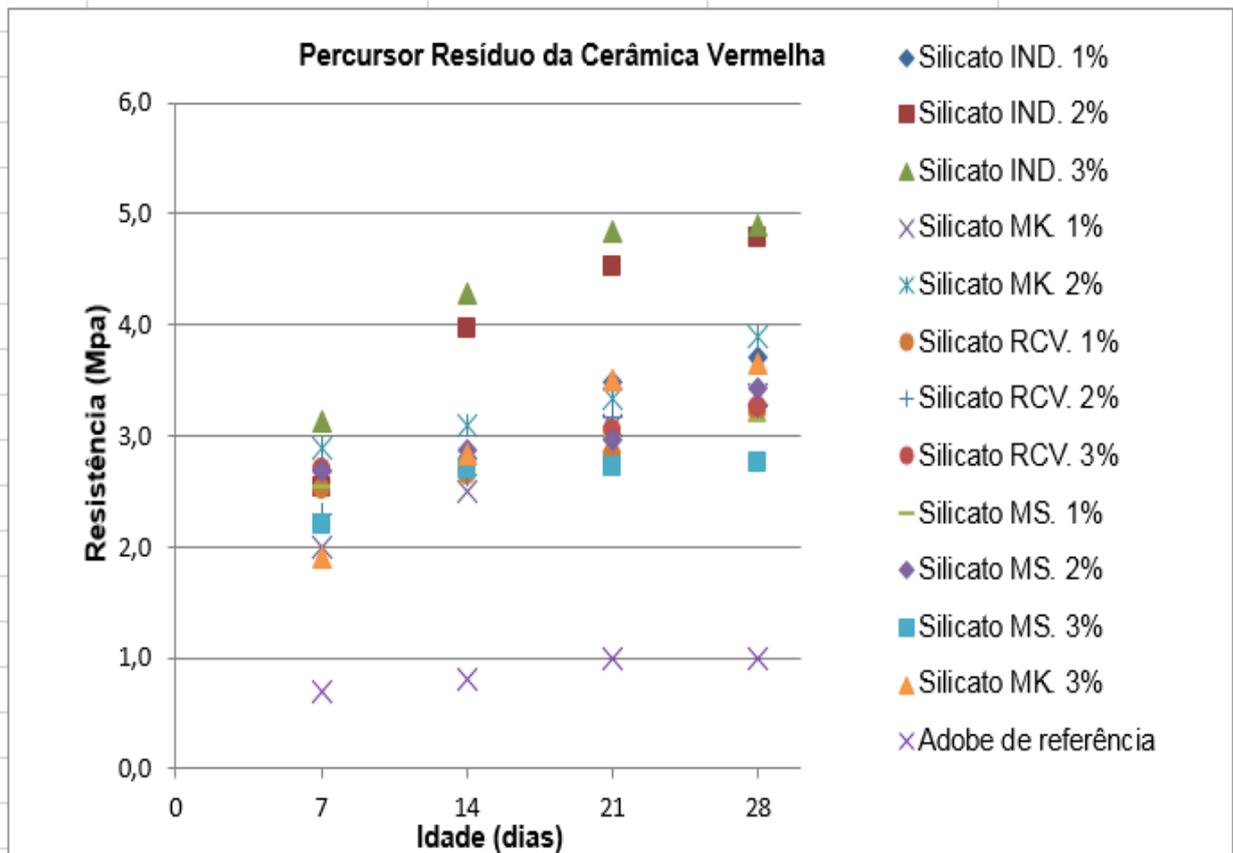


Figura 6. Resistência à compressão das amostras do precursor de RCV (média de 3 corpos de prova) Mesmo as amostra que não resistiram à ação da água tiveram resistência adequada. Os resultados dos blocos estabilizados com o precursor da cerâmica vermelha foram inferiores aos que utilizaram o metacaulim, o que era de se esperar por conta da maior percentagem de sílica e alumina cristalina nos resíduos.

5 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo mostraram que é viável a substituição da solução alcalina industrializada pelo silicato de (MK, MS e RCV) na produção de adobes.

Como foi visto no estudo realizado por Oliveira et al (2014), a estabilização do solo através da ativação alcalina mostrou um bom desempenho para a fabricação de adobes.

A estabilização de adobe utilizando soluções alcalinas produzidas com resíduos minerais e hidróxido de sódio em substituição do silicato de sódio industrializado apresentou resultados interessantes quanto a resistência à compressão e os corpos de prova com teores de 2% e 3% resistiram a ação da água.

A temperatura usada para ativar as reações químicas podem ser conseguidas envolvendo-se os adobes produzidos em sacos plásticos expostos ao sol. O desenvolvimento de um sistema de cura com energia solar viável ecologicamente é o próximo passo deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR – 7171. Bloco Cerâmico para Alvenaria –, 2005. Disponível em: < <http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=53938> > Acesso em 10 de jun de 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR – 8492: tijolo maciço de solo-cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água, 2012. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=193718>> Acesso em: 02 de set de 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR – 8491:Tijolo de solo cimento, especificações. 2012. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=193718>> Acesso em: 02 de set de 2015.

Barbosa N. P, Ghavami K. (2007). Terra crua para edificações. São Paulo: IBRACON, 2007, v. 2, p. 1505-1538. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/riem/volumes.asp> Acesso em 10 de jun de 2015.

Barbosa, N. P.; Mattone, R. (2002). Construção com terra crua. I Seminário Ibero-americano de Construção com Terra. Salvador, BA, Anais Proterra/Cyted. Set 2002. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/2106795/2-terra-cap-ibracon/11>> Acesso em 10 de jun de 2015.

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>> Acesso em: 25 de jun de 2015.

Davidovits, J. (1987) Ancient and modern concretes: Whats is the real difference? Concrete Internacional, v.9, n.12, p.23-35, Dez 1987. Disponível em: <<http://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal?m=details&i=2380>> Acesso em 15 de jun de 2015.

Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. Thermal Analysis 37: p.1633-1656. Disponível em: < <http://www.scopus.com> > Acesso em 20 de mar de 2015.

Oliveira, L.S.; Barbosa, N.P.; Carvalho, C.M.; Santos F.S. (2014). Stabilization of raw earth through alkaline activation. Key Engineering Materials, v.600, p.215-224, Mar. 2014. Disponível em: < <http://www.scientific.net/KEM.600.215> > Acesso em 20 de mar de 2015.

Pinto, A.T. (2004). Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina do metacaulino. Tese Doutorado, Universidade do Minho, Portugal. 2004. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/671>> Acesso em: 15 de jun de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos técnicos do Laboratório de Ensaios 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>.

Pablo Raphael de Lacerda Ferreira, estudante de arquitetura e urbanismo da Universidade Federal da Paraíba. Currículo completo em: <http://lattes.cnpq.br/1643429325282759>.

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, professor aposentado da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, professor emérito da Universidade Federal da Paraíba. Currículo completo em: <http://lattes.cnpq.br/1427567976681355>.