

Influência das Propriedades do Solo Melhorado com Aglomerante Álcali-Ativado

David Lamberto Diehl Camacho

Unisinos, São Leopoldo, Brasil, david.diehl.camacho@gmail.com

Tiago Emanuel Schuck

Unisinos, São Leopoldo, Brasil, tiagoschuck@yahoo.com.br

Caroline Momoli De Carli Rosenbach

Unisinos, São Leopoldo, Brasil, carolmomoli@gmail.com

Felipe Gobbi Silveira

Unisinos, São Leopoldo, Brasil, Felipe.Gobbi@geobrugg.com

Mauricio Mancio

Unisinos, São Leopoldo, Brasil, mancio@gmail.com

RESUMO: O artigo consiste em avaliar o potencial de utilização de um aglomerante a base de aluminossilicatos ativado alcalinamente incorporado a dois tipos de solos, arenoso argiloso e arenoso siltoso, para uso em base e sub-base de pavimentos rodoviários. A mistura foi obtida através de uma solução de hidróxido de sódio, combinado com dois aluminossilicatos, a cinza volante e metacaulim separadamente, e em diferentes proporções. A metodologia utilizada envolve a análise das propriedades físicas, mecânicas dos solos e das misturas solo-aluminossilicato. Deseja-se que ao término da pesquisa, obter resultados positivos referente a aumento da resistência mecânica, da mistura solo-aluminossilicato ativado alcalinamente como agente estabilizador, uma vez que esse aglomerante, utiliza como matéria-prima um resíduo gerado em grande volume mundialmente, como a cinza volante oriunda da queima do carvão mineral em termoelétricas, ademais pretende-se sugeri-lo como um material alternativo frente a utilização do cimento Portland. Apesar de existirem várias pesquisas na área comprovando sua eficiência, o cimento Portland é considerado um dos produtos que mais geram impactos ambientais, tanto na extração da matéria-prima, quanto na sua produção com altas taxas de liberação de CO₂, o que torna seu emprego extremamente agressivo ao meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: solo-cimento, ativação alcalina, solo estabilizado, cinza volante.

1 INTRODUÇÃO

Os aglomerantes álcali-ativados, também conhecidos com geopolímero, são desenvolvidos a partir de aluminossilicatos amorfos ativados em ambiente altamente alcalino, com adequadas razões molares entre os seus óxidos reagentes. Como a produção deste tipo de ligante não exige altas temperaturas de calcinação e praticamente não geram emissão de CO₂, como na produção de cimento Portland, os aglomerantes álcali-ativados podem contribuir para o desenvolvimento sustentável. Além disso, são materiais inorgânicos, de alta resistência inicial, estável à temperatura até 1250°C, e não inflamáveis (Davidovits, 2002). Existem diversas formas de aumentar a resistência mecânica de solos, uma das mais utilizadas é a adição de um aglomerante, como o cimento Portland ou cal, neste trabalho o aglomerante álcali-ativado serve como uma opção alternativa as técnicas convencionais. Para a obtenção do ligante iremos utilizar dois materiais já conhecidos na engenharia civil como adições minerais, a Cinza Volante (CV) e o metacaulim (MC), pozolanas ricas em alumínio e sílica vítrea, o que facilita a dissolução. Mehta e Monteiro (2008) preveem que o aumento da produção de cimento para atender o mercado não ocorrerá pela incrementação na produção do clínquer, mas pelo crescimento da utilização de materiais cimentantes suplementares.

2 MATERIAIS UTILIZADOS

2.1 Solos

Foram utilizados dois tipos de solos neste trabalho, um proveniente da cidade de Ivoti/RS retirado da empresa Geobrick Produtos e Sistemas Construtivos, denominado como Solo A e a outra da cidade de Portão/RS retirado da Cerâmica Kaspary, denominada como Solo B.

2.2 Hidróxido de Sódio (NaOH).

Para ativação alcalina, foi utilizado hidróxido de sódio (NaOH), conhecido comercialmente como soda cáustica, o hidróxido de sódio escolhido

foi em micro pérola P.A, da empresa neon comercial de produtos químicos.

2.3 Cinza Volante

Segundo Silva et al. (1999) denomina-se cinza volante (CV) o material finamente particulado, proveniente da queima de carvão mineral que tem como objetivo gerar energia em usinas termoelétricas. A cinza volante utilizada neste trabalho é da Usina termoelétrica de Candiota, localizada no Rio Grande do Sul.

2.4 Metacaulim

Os autores Mehta & Monteiro (2008), definem que o metacaulim (MC) é uma adição mineral aluminossilíca obtida normalmente de calcinação entre temperatura (600°C e 900°C) de alguns tipos de argilas, como as cauliniticas e os caulins. O metacaulim utilizado foi vendido comercialmente pela empresa HP Ultra.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização Física

Foram obtidos os Índices Físicos, Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade, Peso Específico Real dos Grãos, Análise Granulométrica.

3.2 Caracterização Química

Foram realizados ensaios quantitativos de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX). Esta técnica é não destrutiva sendo utilizada para determinar os elementos químicos presentes nos solos, e assim analisar qual elemento químico irá reagir mais com o NaOH.

3.3 Ensaio de Compactação

Para a dosagem dos componentes foi realizado o ensaio de compactação conforme a NBR 7182/1986 para obtenção dos teores de umidade ótima dos solos A e B, da cinza volante, e do metacaulim, na figura 1 temos um exemplo do corpo de prova sendo desmoldado.



Figura 1. Moldagem dos corpos de prova.

As classificações dos solos estão de acordo com a AASHTO e HBR. A escolha do teores de cinza volante e metacaulim a serem colocados, seguem recomendações da NBR12253/2012 que sugere, três diferentes teores de adição, assim ficou definido teores em 5%, 10% e 15% sobre o peso do solo, as quantidades de água ou ativador a ser colocado em cada uma das amostras leva em consideração as umidades ótimas dos solos e adições. Para os solos A e B foram estabelecidas misturas e nomenclaturas.

Tabela 1- Nomenclaturas Utilizadas Para Cada Mistura

Identificação	Mistura
NAT	Solo+água
ATIV	Solo + NaOH 12mol/L
CV5%	Solo + 5% CV + NaOH 12mol/L
CV10%	Solo + 10%CV + NaOH 12mol/L
CV15%	Solo +15% CV + NaOH 12mol/L
MC5%	Solo + 5% MC + NaOH 12mol/L
MC10%	Solo + 10% MC + NaOH 12mol/L
MC15%	Solo + 15% MC + NaOH 12mol/L

As quantidades de solução ativadora estão descritas na Tabela 2, elas foram baseadas nos valores da umidade ótima de cada solo encontrado, e a partir disso calculado a quantidade ideal para ser adicionado o ativador e as pozolanas. A partir disso todas as misturas foram moldadas e colocadas em cura de acordo com a NBR 12023/2012.

Tabela 2. Teores de Ativador Alcalino (ml).

Tipo de mistura	Solo B	Solo A
NAT	277,06	202,20
ATIV	277,06	202,20
CV5%	306,21	231,35
CV10%	335,36	260,50
CV15%	364,51	289,65
MC5%	312,06	237,20
MC10%	347,06	272,20
MC15%	382,06	307,20

3.4 Ativador Alcalino

Vargas (2006), pesquisou cimentos álcali-ativados a partir da ativação das cinzas volantes, avaliando a influência das reações molares $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ na resistência à compressão e determinação das concentrações do ativador NaOH com o objetivo de promover um melhor desempenho mecânico e estabilidade ao cimento álcali-ativado. Os resultados mostraram que concentrações mais elevadas do ativador alcalino (NaOH), contribuíram para elevar a resistência final à compressão das amostras ativadas.

O ativador alcalino (NaOH) foi produzido em solução de aproximadamente 12mol/L em água deionizada, a mistura foi feita para maior precisão em balão volumétrico, com agitação em equipamento de ultrassom para uma mistura mais homogênea, conforme demonstrado na Figura 2.



Figura 2. Solução em Banho Ultrassônico.

3.5 Compressão Simples

Os ensaios de compressão simples foram realizados aos 7 dias de cura, em uma prensa EMIC DL 20000 no laboratório de engenharia civil da UNISINOS, na figura 3 pode-se observar o corpo de prova na posição de ensaio. O ensaio foi realizado conforme indicado na norma NBR 12025/2012.

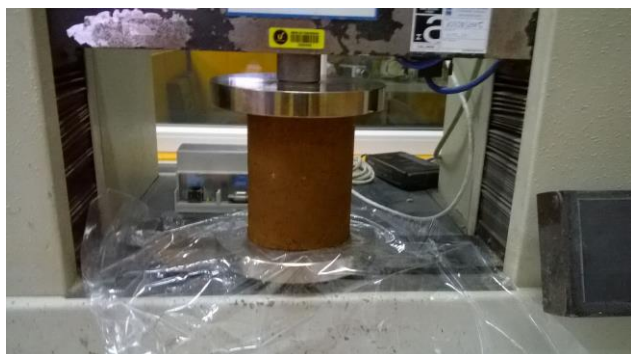


Figura 3. Corpo de prova na prensa EMIC

4 RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta os índices físicos dos solos.

Tabela 3. Índices Físicos

Local	Solo A	Solo B
ω (%)	12,04	20,49
γ (kN/m ³)	16,85	18,20
γ_d (kN/m ³)	15,04	15,11
γ_s (kN/m ³)	27,12	27,94
e	0,803	0,849
η (%)	44,53	45,93
S (%)	40,68	67,41

A Figura 4 apresenta a curva granulométrica dos solos, onde o solo A corresponde a uma areia siltosa e o solo B corresponde a uma areia argilosa.

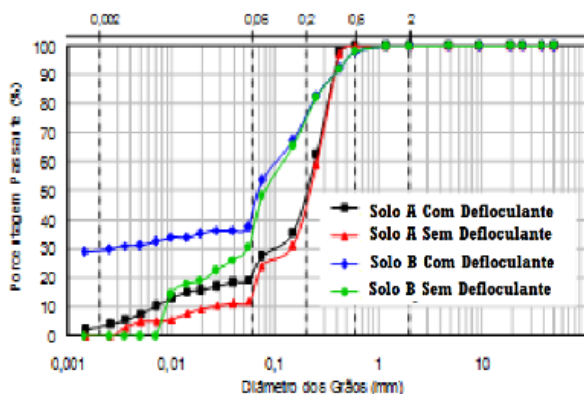


Figura 4. Curva Granulométrica dos Solos.

A Tabela 4 consta a composição granulométrica de cada solo.

Tabela 4. Composição Granulométrica.

	Solo A		Solo B	
	Com Defloculante	Sem Defloculante	Com Defloculante	Sem Defloculante
Argila	3,11	0	29,48	0
Silte	17,68	14,19	12,13	34,76
Areia Fina	28,16	30,96	33,44	39,07
Areia Média	51,04	54,84	22,95	24,24
Areia Grossa	0,01	0,01	1,98	1,91
Pedregulho	0	0	0,02	0,02

Na Tabela 5 constam os resultados do ensaio de FRX.

Tabela 5. Análise Química

Composição química	Solo A	Solo B
Na ₂ O	0.041 %	0.206 %
MgO	0.193 %	0.258 %
Al ₂ O ₃	11.755 %	16.926 %
SiO ₂	76.143 %	53.065 %
P ₂ O ₅	0.196 %	0.204 %
SO ₃	0.167 %	ND %
K ₂ O	7.216 %	0.253 %
CaO	0.097 %	ND %
TiO ₂	0.142 %	0.900 %
MnO	0.017 %	0.009 %
Fe ₂ O ₃	1.011 %	21.275 %
L. I. O.	3.022 %	6.904 %

Percebe-se no solo A o SiO₂, como elemento químico de maior porcentagem, característico em solos arenosos.

Entretanto o solo B possui uma porcentagem maior de elementos químicos como, Al₂O₃ e Fe₂O₃, característicos em solos argilosos. Esses elementos são fundamentais para analisar os resultados de compressão simples posteriormente.

A Tabela 6 consta os Limites de Atterberg obtidos dos solos ensaiados.

Tabela 6. Limites de Atterberg.

	Solo A	Solo B
LP (%)	(-)	33,24
LL (%)	21,53	29,42
IP (%)	NP	3,82

A Figura 5 e 6 apresentam as curvas de compactação do Solo A e do Solo B respectivamente, onde a umidade ótima e peso específico máximo constam na Tabela 7.

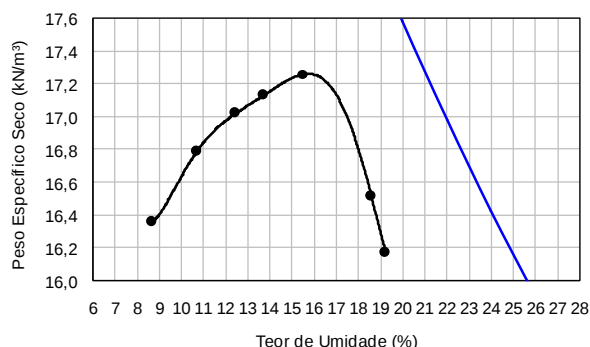


Figura 5. Curva de Compactação do Solo A.

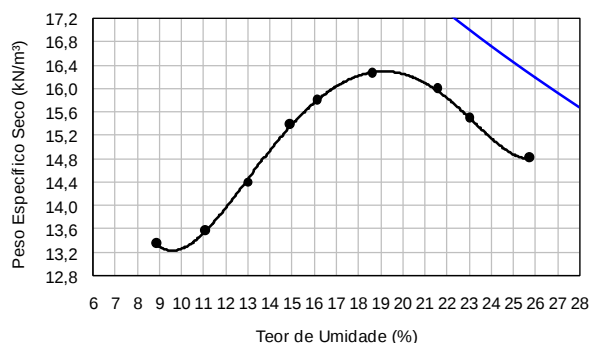


Figura 6. Curva de Compactação do Solo B.

Tabela 7. Umidade Ótima e Peso Específico Seco Máximo

	Solo A	Solo B
Umidade Ótima (%)	15,70	19,20
Peso Específico Seco Máximo (kN/m³)	17,265	16,285

Para visualizar melhor as curvas, a Figura 7 apresenta todos os materiais moldados e suas respectivas curvas de compactação.

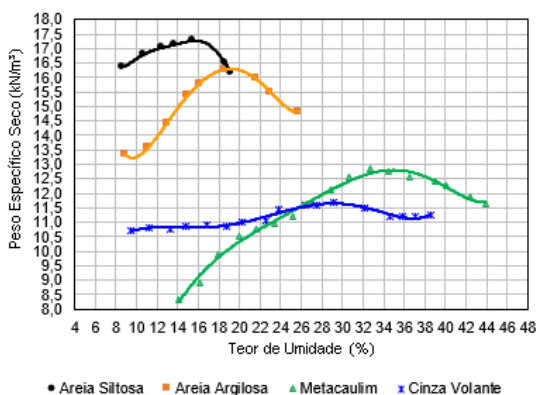


Figura 7. Comparação Curvas de Compactação

Os resultados de compressão axial estão representados nas Figuras 9, 10.

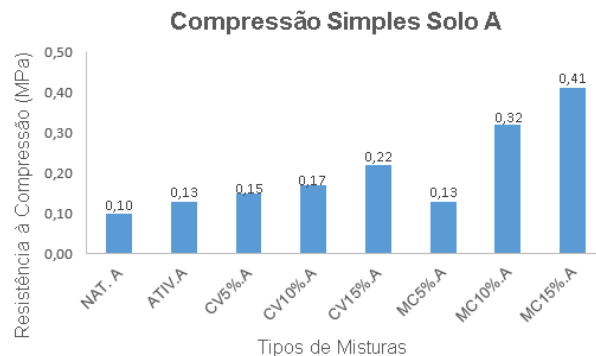


Figura 9. Valores de Rompimento Solo A

Para o solo A a resistência à compressão sempre foi aumentando a partir do incremento dos materiais no solo Cinza Volante e Metacaulim, exceto no MC5%.A, que diminui chegando ao mesmo valor do ATIV.A. Acredita-se que o a quantidade de metacaulim 5% não foi suficiente para ocorrer a reação química com o solo, e com isso aumentar a resistência.



Figura 10. Valores de Rompimento Solo B

Para o solo B percebe-se no gráfico um o aumento gradual de resistência em cada tipo de material e mistura. A maior resistência obtida foi de 1,29Mpa, quando misturado com 15% de metacaulim.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados se conclui que o solo A teve um desempenho inferior em relação ao solo B, um dos fatores que devem ter contribuído para este resultado é a granulometria, e que as misturas feitas com metacaulim obtiveram melhores resultados. O valor máximo de compressão do solo B foi de 1,29 MPa denominado com MC15%.A. Com isso acredita-se que o solo B por ser mais coesivo e possuir uma quantidade maior de argila (finos), pode ter criado um ambiente mais favorável as reações com o aglomerante geopolímero melhorando consideravelmente o ganho de resistência em relação ao solo A no melhor caso. Já o solo A obteve a maior resistência de 0,41 MPa denominado como MC15%.A, melhorando em 0,31 MPa em relação ao solo natural (NAT.A). Entende-se também que o metacaulim foi mais eficiente no ganho de resistência em ambos os solos, pois comprovadamente é mais reativo que a cinza volante em testes preliminares por ser mais fina, por ser pozolana e ter origem de argila caulínicas.

Analisando apenas o solo natural e o solo com ativador no gráfico, percebe-se que no Solo A houve apenas 0,03MPa de melhora quando colocado ativador, indicando que o hidróxido de sódio não reage tão bem com solos arenosos e com elevado teor de SiO_2 . Já no solo B houve uma melhora considerável de 0,58MPa, indicando que o hidróxido de sódio reage melhor com solos argilosos e que possuem Al_2O_3 e Fe_2O_3 em sua composição. Apesar de não ter atingindo em ambos os solos o mínimo esperado de resistência pela norma de 2,1 MPa, percebe-se que houve um aumento considerável de resistência à compressão no solo estabilizado, em relação ao solo natural, indicando que há influência de melhoras nas propriedades físicas e químicas do solo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Cerâmica Kasparly por ter cedido o solo da cidade de Portão/RS, a Geobrick Produtos e Sistemas Construtivos o solo da cidade de Ivoti/RS e ao Laboratório de Mecânica dos Solos da UNISINOS.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 7181:1988 - Análise Granulométrica
- ABNT NBR 7182:1986 - Ensaio de Compactação
- ABNT NBR 12023:2012 - Solo-cimento - Ensaio de compactação
- ABNT NBR 12024:2012 - Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento
- ABNT NBR 12253:2012 - Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento- Procedimento
- Davidovits, J. (2002) 30 Years of Successes and Failures in Geopolymers Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. Geopolymer 2002 Conference, Melbourne, Austrália.
- Mehta & Monteiro (2008) Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Ibracon, (pág 354 -360)
- Silva, N.I.W. et al. (1999) Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico. Cerâmica, São Paulo, v.45, n296, p. 184-187.
- Vargas, A.S. (2006) Cimento Ecológico: Um Compromisso da Indústria da Construção Civil para com as Gerações Futuras. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.