

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA SOLO MELHORADO COM CAL

Luiz Fernando Anchar Lopes¹

Rafael Bazilio Viana²

Mayara Tacila dos Santos³

Wanessa Souza de Lima⁴

RESUMO

O melhoramento das propriedades geotécnicas do solo pode contribuir para sua maior estabilização e redução dos deslizamentos nas encostas. As técnicas de melhoramento de solos são de crucial importância para a resolução de problemas relacionados às suas características geotécnicas.

Como exemplo de uma técnica para a estabilização de solos tem-se a adição de aditivos como a cal e o cimento. De fato, a estabilização de solos com base nas reações químicas entre as partículas de solo, a água e os materiais adicionados constitui uma alteração permanente do solo natural, na medida em que este tipo de tratamento origina um novo material, com características diferentes.

O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência da adição de aditivos como a cal em um solo argiloso, verificando as melhorias nas suas características geotécnicas, com foco em sua resistência. Para alcançar tais objetivos, inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica através de artigos científicos e acadêmicos sobre as técnicas empregadas para estabilidade de encostas e materiais utilizados para melhoramento dos solos, incluindo a aplicação de cal. Em seguida, foi coletada uma amostra representativa das características geotécnicas do solo das encostas de Recife e realizado ensaios para caracterização e determinação dos parâmetros geotécnicos, antes e após a técnica de melhoramento do solo. A caracterização geotécnica e os ensaios para avaliação da resistência à compressão seguiram as normas específicas. A partir dos resultados obtidos no procedimento experimental foi possível analisar os efeitos da estabilização com cal no solo estudado, verificando a melhoria na resistência à compressão aos dezoito dias de cura na ordem de seiscentos por cento em relação à ao solo no estado natural.

Palavras-chave: Melhoramento de Solos, Resistência, Taludes.

¹ Mestrando, Universidade Estadual de Maringá-UEM, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas-PCV, luiz.anchor@hotmail.com

² Engenheiro Civil, graduado pela Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP, rafaelbazilioviana@gmail.com

³ Engenheira Civil, graduada pela Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP, maytacila.ms@gmail.com

⁴ Engenheira Civil, graduada pela Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP, Email: wanessasouzadelima@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O solo é um dos elementos mais importantes no setor da construção civil, quer no seu estado natural, quer quando utilizado como material de construção. No entanto, é frequente encontrar solos naturais sem os requisitos necessários para cumprir adequadamente a função a que estão destinados (CRUZ et al., 2010). Com o objetivo de solucionar este problema podem ser aplicadas técnicas de melhoramento do solo.

O melhoramento das propriedades geotécnicas do solo pode contribuir para uma maior estabilização do mesmo e redução dos deslizamentos nas encostas. As técnicas de melhoramento são de crucial importância para a resolução de problemas relacionados às suas características geotécnicas (LIMA, 2002).

Quanto às técnicas de melhoramento, os seguintes grupos podem ser distinguidos: técnicas de melhoramento temporárias, melhoramento permanente e melhoramento permanente com adição de materiais ao solo natural.

De modo geral, para estabilizar um solo podem ser realizados processos de natureza física (estabilização granulométrica), físico-química (uso de materiais compósitos, por exemplo; solo-cimento-fibra), química (adição de cal, cimento, betume, etc.) ou mecânica (compactação), de forma a tornar esse solo estável para os limites de sua utilização e ainda fazer com que esta estabilidade permaneça sob a ação das cargas exteriores e ações climáticas variáveis (GUEDES et al., 2014).

De fato, a estabilização de solos com base nas reações químicas entre as partículas de solo, a água e os materiais adicionados constitui uma alteração permanente do solo natural na medida em que este tipo de tratamento origina um novo material com características diferentes.

Segundo Van Impe apud Silva (2010) quando realizamos o processo de melhoramento químico em solos argilosos com predominância de argilas caulínicas observa-se um aumento do limite de liquidez e um aumento do limite de plasticidade, menor que o observado em argilas montmoriloníticas, devido às diferentes capacidades de trocas catiônicas nos tipos de argilas.

A técnica de melhoramento com a adição de materiais cimentantes ao maciço é bem empregada em solos expansivos e em solos de base e sub-base de pavimentos rodoviários. A cal é bastante estudada para essa finalidade e vem apresentando resultados satisfatórios tanto em laboratório quanto em campo. O melhoramento com a adição de cal e cimento proporciona uma melhoria na resistência do solo, mas também ajuda a controlar a expansibilidade nos que apresentam essa característica.

A estabilização de solos com cal produz melhorias significativas na sua textura e estrutura, reduzindo a plasticidade e originando aumentos na resistência mecânica. Um considerável aumento da resistência em longo prazo é não só possível como provável. Por outro lado, o aumento de resistência desenvolvido na mistura solo-cal está diretamente associado à redução substancial do seu potencial de deformação (CRISTELO, 2001).

Segundo Silva (2010) após o melhoramento do solo com o uso da cal ocorre um aumento do percentual retido em algumas frações mais grossas do solo; esses grãos formados possuem uma resistência menos elevada que os grãos naturais do solo, e isso provoca uma fácil desagregação dos mesmos. Por esse fato alguns autores indicam que essa alteração na granulometria não é bem observada no ensaio comum de peneiramento, pois a premissa do ensaio é a de desagregação do material previamente. No trabalho de Barbosa (2013) foram realizados ensaios de difração a laser monomodal, que possibilitou observar esse aumento e quantificá-lo.

De acordo com Silva (2010), a estabilização de solos com cal, permite obter melhorias ao nível da resistência mecânica, da deformabilidade e da permeabilidade, possibilitando a sua utilização, por exemplo, como camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Também tem se tornado um aspecto cada vez mais importante na concepção de projetos construtivos, na medida em que permite economizar e reduzir o impacto ambiental ao utilizar o solo existente no local de implantação da obra, ao invés de substituí-lo por outros de melhor qualidade. Não só se evita a extração de matérias-primas não renováveis como se eliminam os malefícios ambientais decorrentes do transporte e deposição dos materiais envolvidos.

Segundo Guérios (2013) fica evidente o aumento da resistência à compressão máxima com o aumento dos percentuais de cal aplicados aos solos. Também fica nítido um aumento tímido até o percentual de 5%, em torno de 15%. Já para as amostras com 10% de cal, o aumento é de 100% em relação à amostra do solo em seu estado natural.

Neste sentido, esta linha de pesquisa tem como objetivo avaliar a aplicação da cal ao solo, com a finalidade de observar as melhorias nas características geotécnicas, como a resistência à compressão.

2. DESENVOLVIMENTO

A metodologia aplicada para se atingir os objetivos mencionados constou das seguintes etapas.

2.1. Coleta de Amostra

A encosta selecionada para estudo está localizada próxima a uma das principais avenidas do município de Camaragibe-PE. O qual é um dos 14 municípios que constitui a Mesorregião Metropolitana do Recife do Estado de Pernambuco e onde se verifica várias ocorrências de deslizamentos de terra. A área da encosta analisada localiza-se na Avenida Doutor Belmiro Correia, bairro Timbi, Camaragibe – PE. A escolha da área do talude para a análise de estabilidade foi influenciada por estar próxima a construção de um supermercado. A coleta da amostra seguiu as normas pertinentes.

2.2. Procedimento Experimental

O procedimento experimental foi realizado em três etapas, que estão descrita abaixo.

2.2.1. Caracterização do Solo

A caracterização física e os ensaios para avaliação da resistência do solo seguiram as normas específicas e foram realizadas no Laboratório de Geotecnia (LABGEO) do Centro de Ciência e Tecnologia da UNICAP/PE. Um resumo de todos os parâmetros determinados para a caracterização do solo está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros para caracterização geotécnica do solo

Parâmetros Avaliados	Referências (ABNT NBR)
Teor de umidade	6457/86
Massa Específica	6508/84
Análise Granulométrica	7181/88
Limite de Liquidez	6459/84
Limite de Plasticidade	7180/84
Compressão Simples	6953/94
Compactação	7182/86

Fonte: do autor – 2016

Os ensaios acima citados foram realizados tanto para o solo natural quanto para o solo após o processo de melhoramento, para assim avaliar a eficiência da técnica de melhoramento do solo com cal.

O ensaio de compactação seguiu o método do Proctor normal. O ensaio de compactação foi realizado com a finalidade de se determinar a densidade do solo e a umidade ótima tanto do solo natural quanto do solo melhorado com 10% de cal. A partir destes dados foram preparados os corpos de prova para avaliação do ensaio de resistência à compressão (compressão simples).

O ensaio em questão utilizou a amostra de solo do tipo deformada, estando ela seca ao ar, destorroada. Em seguida, foi adicionado água, homogeneizou-se e compactou a amostra no molde cilíndrico em três camadas iguais, aplicando-se 26 golpes por camada, com o soquete cilíndrico de 2,5kg a uma altura de queda de 30,5cm. Posteriormente, pesou-se o conjunto solo úmido compactado e cilindro, assim como foi retirada uma amostra para determinação da umidade do solo compactado. Este processo foi repetido variando a quantidade de água misturada ao solo, com a finalidade de se obter cinco pontos para a construção da curva de compactação.

O ensaio de compactação do solo melhorado foi realizado a partir da mistura do solo já destorroado com 10%, em peso, de cal hidratada. Devido a isso, foi escolhido esse percentual para realizar os ensaios neste trabalho. A amostra de solo-cal foi deixada em repouso por uma hora, após esse período foi executado o ensaio de compactação do Proctor Normal, seguindo os mesmos procedimentos do solo natural.

2.2.2. Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova para os ensaios de compressão simples foram moldados de acordo com o método utilizado por Barbosa (2013). O solo natural e a mistura solo-cal foram moldados em um molde cilíndrico de 5x10cm compactados a uma pressão de 15kPa que proporcionou a energia necessária para o total preenchimento do cilindro em 3 camadas iguais, sendo escarificadas as superfícies a cada camada para garantir a aderência entre as interfaces das mesmas.

Os corpos de prova foram moldados na umidade ótima e peso específico máximo obtido em ensaio prévio de compactação do Proctor Normal do solo natural e do solo melhorado.

Em seguida, os corpos de prova formados pela mistura de solo-cal foram envoltos em papel alumínio e mantidos em estufa na temperatura de 55°C por diferentes períodos (48 horas, 7 dias, 14 dias e 18 dias) de forma a acelerar as reações entre o solo e a cal..

2.2.3. Determinação de resistência à compressão

Após a moldagem dos corpos de prova e passado seu período de cura pré-estabelecido foi realizado a avaliação de sua resistência através dos ensaios de compressão simples, que foi realizado em uma célula de triaxial sem confinamento com anel dinamométrico de capacidade de 50kN.

Para realização dos ensaios foi aplicada uma velocidade de carregamento de 0,48mm/s e anotadas as medidas de deslocamento de acordo com a variação do manômetro num intervalo pré-estabelecido.

3. RESULTADOS

Os resultados obtidos no estudo serão apresentados nos tópicos seguintes.

3.1. Caracterização do solo

Foram realizados ensaios de caracterização física para o solo argiloso antes e após o melhoramento.

Na Figura 1 estão apresentadas as curvas granulométricas obtidas pelos ensaios de granulometria com o solo natural e melhorado.

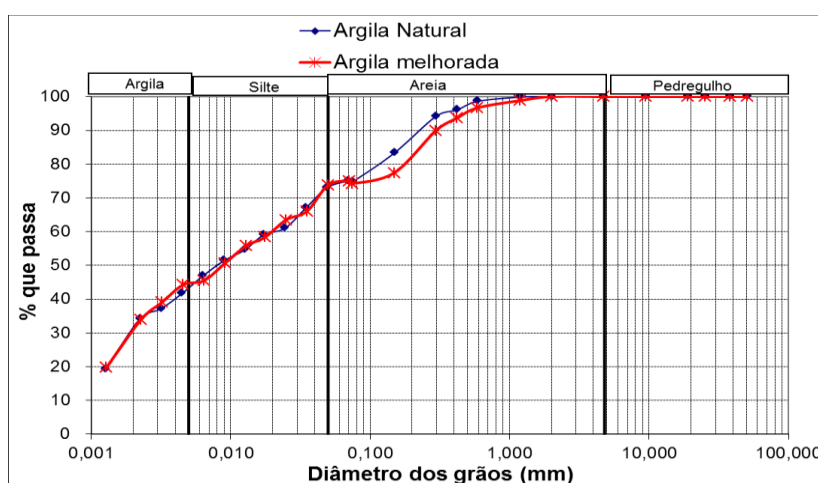


Figura 1 –Curvas granulométricas do solo natural e melhorado

Fonte: do autor - 2016

A partir da granulometria obtida foi possível verificar que o solo após o melhoramento apresentou um pequeno aumento do percentual retido nas frações mais grossas. Este aumento também foi observado por Bandeira (2003), onde foi verificado que esse aumento dos grãos se dá devido às reações de trocas catiônicas imediatas que ocorrem após a mistura e que leva o material a sofrer o efeito da floculação.

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), antes do melhoramento o solo foi classificado como Argila Inorgânica de plasticidade média. Após o melhoramento passou a apresentar características de Silte Inorgânico. Esta mudança está condicionada pela alteração no limite de liquidez e índice de plasticidade do solo após o melhoramento.

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados de umidade, peso específico dos grãos e limites de Attenberg.

Com base nesses resultados é possível constatar que não houve considerável mudança no peso específico dos grãos no estado natural para o estado melhorado, assim como para a umidade.

Quanto aos limites de Attenberg verifica-se que houve um maior aumento do limite de plasticidade em comparação do limite de liquidez, provocando assim uma redução do índice de plasticidade ficando de acordo com o observado por Van Impe apud Silva (2010).

Tabela 2 – Umidade, peso específico e limites de consistência para o solo natural e melhorado

Amostra	Natural	10%
Umidade	3,01%	3,62%
Peso específico dos grãos	2,437 g/m ³	2,343 g/m ³
Limite de Liquidez	34,40%	37,90%
Limite de Plasticidade	19,84%	24,78%
Índice de Plasticidade	14,56%	13,12%

Fonte: do autor – 2016

O solo estudado não apresenta características expansivas de acordo com a avaliação do percentual argiloso e o índice de plasticidade, reforçando a presença predominante de argila caulínica.

Na Tabela 3 estão especificadas a massa específica máxima e umidade ótima encontradas para cada amostra de solo através das curvas de compactação.

Tabela 3 – Umidade ótima e massa específica máxima para o solo natural e melhorado

Amostras	Umidade Ótima	Massa específica máxima
Solo Natural	17,50%	1,68 g/cm ³
Solo Melhorado	22,50%	1,575 g/cm ³

Fonte: do autor – 2016

Com base nestes ensaios foi verificado uma redução da massa específica máxima e um aumento da umidade ótima para o solo melhorado em comparação ao solo natural. Este comportamento seguiu o padrão já observado nos estudos anteriores de Silva (2010), Guérios (2013) e Barbosa (2013).

3.2. Rompimento à compressão simples

Na Figura 3 estão apresentadas as amostras de solos após os ensaios de compressão simples para determinação da máxima tensão de compressão, tanto para o solo natural quanto para o solo melhorado.

Os corpos de prova no estado natural apresentaram ruptura dúctil, permitindo a coleta de todos os resultados após o início da ruptura até a estabilização (Figura 3a). Os corpos de prova com 48 horas apresentaram resistência à compressão bem superior aos no estado natural e apresentaram ruptura frágil, porém foi possível coletar dados até a estabilização (Figura 3b). Os corpos de prova

no estado melhorado após 7 dias apresentaram ruptura brusca, impossibilitando a coleta de resultados após o rompimento (Figura 3c). Já os corpos de prova com 14 e 18 dias apresentaram resistência 114% superior ao de 7 dias, e 665% maior que no estado natural, também apresentando ruptura brusca, impossibilitando a coleta de dados após o início da ruptura (Figura 3d).

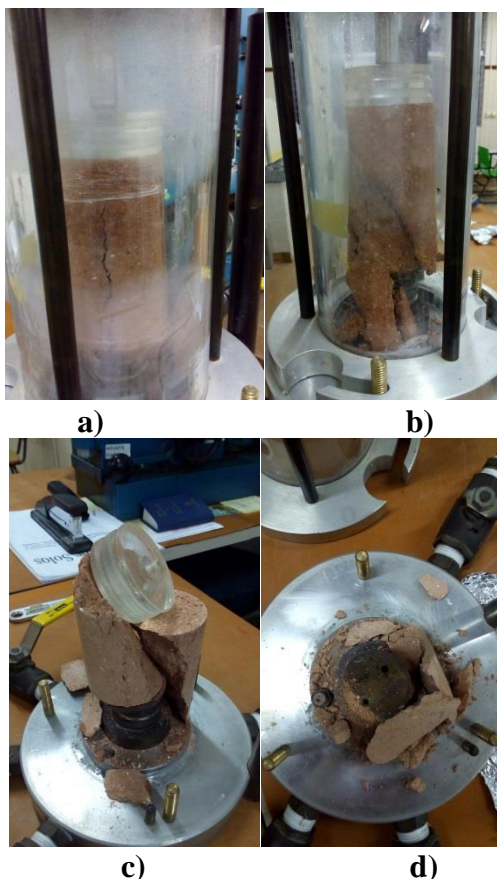


Figura 2. Corpos de prova após o ensaio. a) solo natural b) corpos de prova com 48 horas c) solo com 7 dias d) solo com 14 e 18 dias.

Fonte: do autor – 2016

Na Figura 4 estão apresentados os resultados da evolução da resistência à compressão obtidos com o ensaio de compressão simples das amostras de solo natural e melhorado, para avaliação resistência. Na Tabela 4 estão descritas as tensões máximas obtidas no ensaio de compressão simples.

Conforme observado nas figuras 3 e 4 e na tabela 4 houve um aumento expressivo na resistência à compressão com a idade do corpo de prova. Isso se dá devido às ligações instantâneas e as tardias. As instantâneas ocorrem devido às trocas catiônicas, já as tardias ocorrem devido às reações pozolânicas.

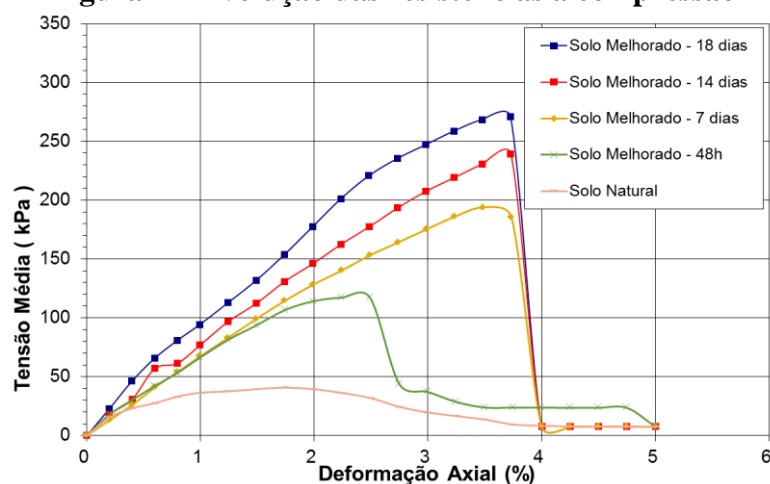
Tabela 4 – Máximos valores da resistência à compressão para cada idade de cura

Amostras	Resistência à Compressão Máxima
Solo Natural	40,68 kPa
Solo 10% - 48 horas	117,17 kPa
Solo 10% - 7 dias	210,15 kPa
Solo 10% - 14 dias	239,37 kPa
Solo 10% - 18 dias	270,75 kPa

Fonte: do autor – 2016

Os resultados de resistência à compressão que foram obtidos ficaram de acordo com o observado por Johann et al (2014), Guérrios (2013), Silva (2010) e Neves (2009).

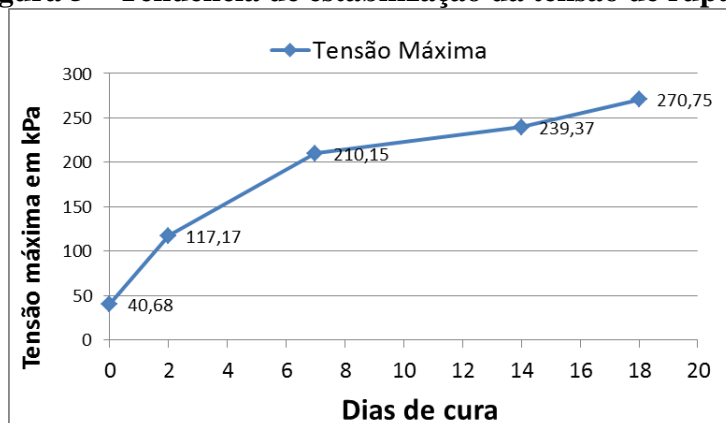
Figura 4 – Evolução das resistências à compressão



Fonte: do autor – 2016

Em relação ao solo natural houve um aumento de 665% da resistência aos 18 dias, 588% aos 14 dias, 517% aos 7 dias e 288% aos 2 dias. Observou-se um aumento maior nas primeiras idades devido às reações químicas que ocorrem, porém, com o passar das idades o aumento continua, devido às reações pozolânicas que ocorrem pela sílica e a cal presentes na mistura que provocam a formação de CSH (Silicato de cálcio hidratado), subproduto igual ao formado em reações de cimento portland.

Figura 5 – Tendência de estabilização da tensão de ruptura



Fonte: do autor – 2016

4. CONCLUSÃO

A partir dos ensaios de caracterização física e ensaios mecânicos foi possível avaliar o comportamento do solo natural e do solo melhorado com 10% de cal, verificando a eficiência do processo de melhoramento, principalmente quanto ao aumento da resistência do solo.

Com relação à granulometria observou-se um pequeno aumento na fração mais grossa. A umidade variou devido à umidade da cal adicionada à mistura e o peso específico dos grãos sofreu uma variação pequena.

O solo estudado apresentou um aumento no limite de liquidez e no limite de plasticidade e uma diminuição no índice de plasticidade.

O aumento da resistência observado melhora a capacidade mecânica do solo e faz com que o mesmo apresente melhor resposta quando submetido a esforços solicitantes.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508 (1984)**: Normas para os ensaios de caracterização do solo.

_____. **NBR 6457 (1986)**: Determinação da Massa Específica.

_____. **NBR 6459 (1984)**: Amostra de Solo

_____. **NBR 7180 (1984)**: Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização.

_____. **NBR 7181 (1984)**: Determinação do Limite de Liquidez.

_____. **NBR 7181 (1984)**: Determinação do Limite de Plasticidade.

_____. **NBR 6953 (1994)**: Análise Granulométrica.

_____. **NBR 12770 (1992)**: Ensaio de compressão uniaxial.

BANDEIRA, A. P. N. **Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no município de Camaragibe-PE**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da UFPE, 2003.

BARBOSA, V. **Estudo do Comportamento Geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo estabilizado com cal**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da UFPE, 2013.

BARBOSA, V.; DE PAIVA, S. C.; PESSOA, V. J. H.; HORTE, V. M.; FERREIRA, S. R. DE M. **Solo expansivo de Cabrobó – PE: caracterização da expansividade antes e após o tratamento com cal – XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Goiana/GO, 2014.

CRISTELO, N. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho. Portugal, 2001.

Cruz, M., Jalali, S. **Melhoramento do desempenho de misturas solo-cimento**. 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães, pgs. 639-648, 2010.

DIAS, J. J. F. M. S. **Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – perfil construção. Universidade Nova de Lisboa. 117 p, 2012.

GUEDES, S. B.; COUTINHO, R. Q.; FONSECA, A. J. P. V. **Comportamento de Um Solo Melhorado por Processos Mecânico (Compactação), Químico (Cimento), Físico (Fibras) e Químico-Físico (Cimento-Fibra) para Aplicação como Material Contra Erosão para as Estradas de Terra Existentes no PMAHC/Cabo de Santo Agostinho**. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiana/GO, 2014.

GUÉRRIOS, E. M. **Estudo do melhoramento de solo com adição de cal hidratada para uso em pavimento urbano**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

JOHANN, A. D. R.; CONSOLI, N. C.; DA FONSECA, A. J. P. V. **Análise da influência de parâmetros-**



Avenida Colombo, 5790 (UEM)

Bloco C67 (DEC) – Sala 102A

(44) 3011-5865

chave sobre a resistência e a rigidez da mistura solo-cal. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiana/GO, 2014.

LIMA, A. F. **Comportamento geomecânico e análise de estabilidade de uma encosta da formação barreiras na área urbana da cidade do Recife.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da UFPE, 2002.

NEVES, E. N. DE A. C. **Estudo laboratorial de solos tratados com cal, modelos de comportamento.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto. Portugal, 2009.

SILVA, M. F. **Estudo comparativo de dois solos estabilizados com cal.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa. Portugal, 2010.

Soares, J. M. D.; Conterato, T. M. **Caracterização de um solo expansivo de Santa Maria-RS.** XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiana/GO, 2014.