

Estudo do Melhoramento das Características Geotécnicas do Solo com Adição de Cal Hidratada

Luiz Fernando Anchar Lopes

Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil, luiz.anchor@hotmail.com

Cecilia Maria Mota Silva Lins

Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil, cecilia.lins@gmail.com

Analice França Lima Amorim

Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, Brasil, analicelima@hotmail.com

RESUMO: 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 seguiram as normas específicas, sendo realizadas no Laboratório de Geotecnia (LABGEO) do Centro de Ciência e Tecnologia da UNICAP/PE. A partir dos resultados obtidos no procedimento experimental foi possível analisar os efeitos da estabilização com cal no solo estudado, verificando a melhoria das características geotécnicas do solo, como a resistência a compressão.

PALAVRAS-CHAVE: Cal, Melhoramento de Solos, Resistência, Taludes.

1.0 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.

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).

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.

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.

2.0 METODOLOGIA

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

2.1 Coleta de amostra

Para o desenvolvimento da pesquisa, uma amostra de solo foi coletada na área de Camaragibe-PE, sendo esta área escolhida por representar as características geotécnicas das encostas da Região Metropolitana do Recife. A coleta foi realizada a partir de uma visita de campo na área selecionada, onde foram retiradas amostras deformadas e indeformadas para caracterização física dos solos e ensaios mecânicos.

2.2 Procedimento Experimental

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. Principais determinações para caracterização geotécnica do solo.

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

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.

Também foi realizado o ensaio de compactação do solo seguindo 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 compressão simples.

O ensaio de compactação do solo natural foi realizado de acordo com a NBR 7182/86. 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. Segundo Guérios (2013), adicionados 10% de cal à massa de solo é verificada uma melhoria de suas características em torno de 100% quando comparado aos resultados do solo natural. 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 do corpo de prova

Os corpos de prova para os ensaios de compressão simples foram moldados de acordo com o método utilizados 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 proporcionasse 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 Ensaio de Compressão simples

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, conforme apresentado na Figura 1.

O ensaio de compressão simples foi realizado em uma célula de triaxial sem confinamento com anel dinamométrico de capacidade de 50kN.



Figura 1. Preparação e ensaio de compressão simples

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.

3.0 RESULTADOS

Os resultados obtidos no estudo serão apresentados abaixo.

3.1 Coleta de amostra

A encosta selecionada para estudo está localizada próxima a uma das principais avenidas do município de Camaragibe-PE. Camaragibe 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, neste trabalho, 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.

Para a coleta da amostra indeformada os seguintes passos foram realizados: nivelou-se a superfície do terreno e marcou-se o contorno da amostra a ser extraída. Em seguida, foi escavada uma vala em volta da marcação, afundando a escavação e cortando os lados, para assim separar a amostra do terreno, e por fim, retirar a amostra cuidadosamente. Tomou-se o cuidado de proteger a amostra evitando possíveis perturbações e alterações, cobrindo a mesma com papel filme, papel alumínio, tecido de algodão, parafina e serragem, evitando a perda de umidade e rupturas.

Na Figura 2 abaixo estão apresentadas as etapas para coleta da amostra indeformada.



Figura 2. Coleta de amostra no município de Camaragibe: a) escavação do bloco indeformado, b) Cobertura do bloco com papel filme, papel alumínio, tecido de algodão e c) armazenamento do bloco para transporte.

3.2 Caracterização do Solo

Foram realizados ensaios de caracterização física para o solo argiloso antes e após o melhoramento, sendo os resultados

apresentados a seguir.

Na Figura 3 estão apresentadas as curvas granulométricas obtidas pelos ensaios de granulometria com o solo natural e melhorado.

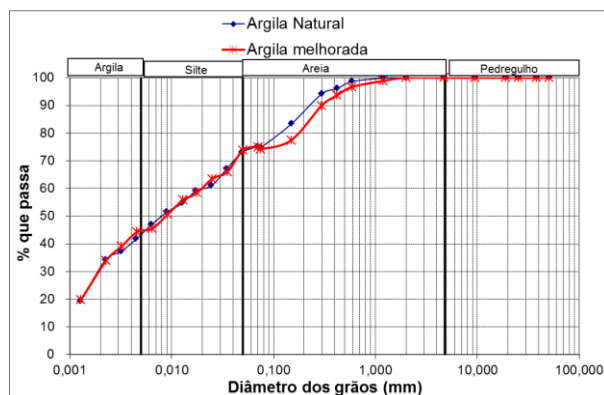


Figura 3. Curvas granulométricas do solo antes e após o melhoramento.

A partir deste ensaio 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.

Segundo Silva (2010) 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 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 abaixo estão apresentados os resultados de umidade, peso específico dos

grãos, limites de Attenberg para o solo natural e melhorado.

Com base nos resultados abaixo, 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.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de caracterização física

Amostras	Solo Natural	Solo com 10% _s
Umidade	3,01%	3,62%
Massa Específica dos Grãos	2,44 g/cm ³	2,34 g/cm ³
Limite de Liquidez	34,40%	37,90%
Limite de Plasticidade	19,84%	24,78%
Índice de Plasticidade	14,56%	13,12%

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. Segundo Van Impe *apud* Silva (2010) em solos argilosos com predominância de argilas cauliníticas 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.

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 caulinítica.

Na Figura 4 estão apresentados os resultados dos ensaios de compactação para o solo natural e melhorado. Na Tabela 3 estão especificadas a massa específica máxima e umidade ótima encontrada para cada amostra de solo.

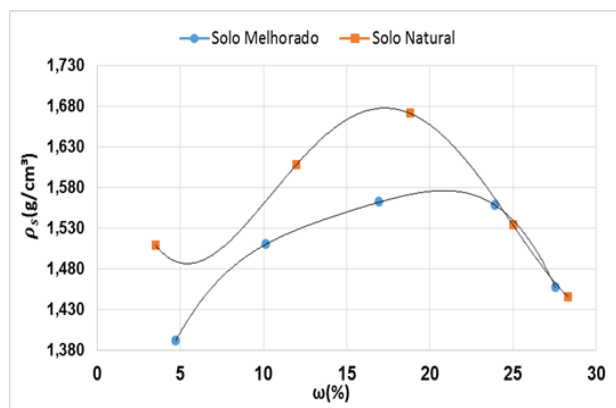


Figura 4. Curva de compactação do solo natural

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), Guérrios (2013) e Barbosa (2013).

Tabela 3. Resultados do ensaio de compactação

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

Na Figura 5 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.

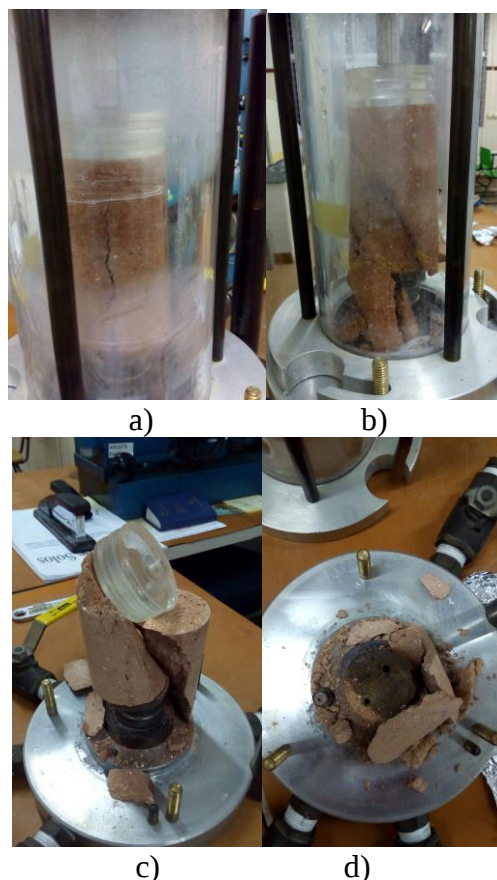


Figura 5. Corpos de prova após o ensaio. a) solo natural b) corpos de prova com 48 horas c) solo com 7 dias d) solo com 14 e 18 dias.

• Rompimento à compressão simples

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 5a). Os corpos de prova com 48 horas apresentaram resistência bem superior aos no estado natural e apresentaram ruptura frágil, porém foi possível coletar dados até a estabilização (Figura 5b). Os corpos de prova no estado melhorado após 7 dias apresentaram ruptura brusca, impossibilitando a coleta de resultados após o rompimento (Figura 5c). 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 5d).

Na Figura 6 estão apresentados os resultados da evolução da tensão 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 6 e 7 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.

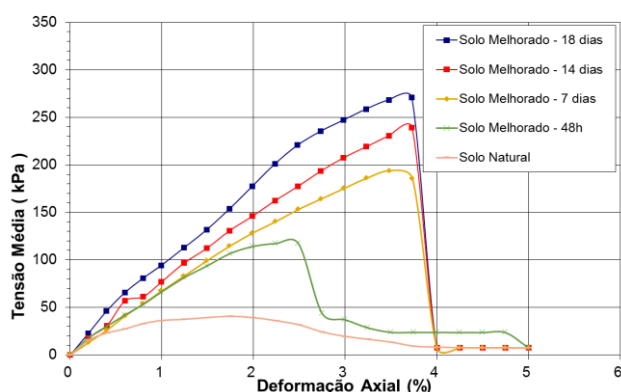


Figura 6. Evolução das tensões no ensaio de compressão simples

Tabela 4. Tensões Máximas obtidas no ensaio de compressão simples

Amostras	Tensão 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

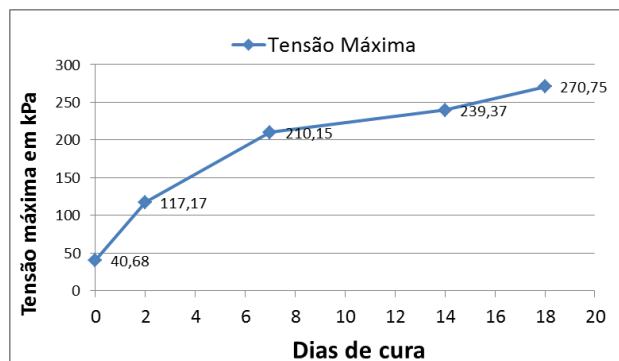


Figura 7. Crescimento de tensões com a idade de cura do corpo de prova

Segundo Silva (2010) a resistência diminui conforme a densidade diminui, porém, quando é adicionada cal à mistura, as reações químicas que ocorrem compensam com excelência essa perda e proporcionam um aumento expressivo com a idade.

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.

Segundo Guérios (2013) fica evidente o aumento da tensão 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 foi de 100% em relação à amostra do solo em seu estado natural.

4.0 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, assim como observado na revisão dos trabalhos

anteriores. 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.

Os resultados do ensaio de compactação ficaram de acordo com o que foi observado nos trabalhos de Silva (2010), Guérrios (2013) e Barbosa (2013), apresentando menor peso específico para o solo melhorado e maior umidade ótima.

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). 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.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Normas para os ensaios de caracterização do solo. NBR 6508 (1984) – Determinação da Massa Específica. NBR 6457 (1986) – Amostra de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. NBR 6459 (1984) – Solo – Determinação do Limite de Liquidez. NBR 7180 (1984) – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. NBR 7181 (1984) – Análise Granulométrica. NBR 6953/94 – Ensaio de compressão uniaxial.

BANDEIRA, A. P. N. (2003). *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.

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

BARBOSA, V.; de PAIVA, S. C.; PESSOA, V. J. H.; HORTE, V. M.; FERREIRA, S. R. de M. (2014). *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.

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

(<http://repositorium.sdum.uminho.pt>).

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

DIAS, J. J. F. M. S. (2012). *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.

GUEDES, S. B.; COUTINHO, R. Q.; FONSECA, A. J. P. V. (2014). *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.

GUÉRRIOS, E. M. (2013). *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.

JOHANN, A. D. R.; CONSOLI, N. C.; da FONSECA, A. J. P. V. (2014). *Análise da influência de parâmetros-chave sobre a resistência e a rigidez da mistura solo-cal*. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiana/GO.

LIMA, A. F. (2002). *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.

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

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

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