

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.

Uso de Cal e Geogrelha na Melhoria Mecânica dos Parâmetros do Solo

Hellen Evenyn Fonseca DA SILVA^{a,1}, Caio Soares CAMARGOS^a,
Matheus Viana DE SOUZA^b e Rideci FARIAS^b

^a*Universidade Católica de Brasília*

Resumo. Os geossintéticos são materiais industrializados com polímeros sintéticos ou naturais, provenientes da indústria petroquímica, podendo ser empregados em diversas obras de engenharia, como reforço de camadas rodoviárias, drenagem de vias e de áreas especiais, ganho de estabilidade em talude, e outras, podendo desempenhar mais de uma finalidade. Este estudo visa avaliar o emprego deste tipo de material, através de comparativos, com o solo natural, solo com adição de cal hidratada, solo com geogrelha e ambos concomitantemente misturados, a fim de analisar o ganho de resistência mecânica do solo e suas possíveis aplicações de reforço, com amostras do solo laterítico de Brasília extraído da Universidade Católica de Brasília. Nas amostras com geogrelha, será analisado o posicionamento desta entre a primeira e segunda, segunda e terceira camada de compactação a fim de averiguar a localização que melhor confere resistência ao solo. Os ensaios realizados para efetivar esses estudos foram o CBR e Compressão Simples.

Palavras Chave. Geogrelha, solo-cal, melhoria de solos

1. Introdução

O pavimento é constituído de diversas camadas, cada uma possui suas especificações técnicas e desempenham diferentes funções, de modo que garantam o bom funcionamento da estrada, reduzindo problemas que são ocasionados por diversos fatores (tráfego muito pesado, variações climáticas, etc.), por conseguinte, diminuir também a quantidade de manutenção das mesmas, que em alguns casos são ineficientes e demandam bastante dinheiro. A base é a camada que deve possuir maior resistência; por ser a mais próxima da superfície, deve suportar as tensões causadas pelo tráfego dos veículos, assegurando a qualidade da estrada e tráfego seguro.

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006, P.83)[1] “Cal Hidráulica é o aglomerante que resulta da calcinação e posterior pulverização por processos de imersão ou suspensão em água, de calcários argilosos a uma temperatura inferior à da fabricação dos cimentos”. Dentre os principais materiais utilizados para o reforço do solo, está a cal. Quando a mistura solo-cal entra em contato com a água, provoca uma reação química, que resulta em uma melhor estabilização do solo, reduzindo a expansão e proporcionando aumento na resistência do mesmo. Em obras geotécnicas é bastante comum o uso de geossintéticos, por se tratar de uma classe de materiais com muita variedade, podendo ser empregados para diversas finalidades. Para o reforço do solo, a geogrelha é bastante

¹Hellen Evenyn Fonseca da Silva, Caio Soares Camargos, Matheus Viana de Souza, Rideci Farias;
E-mail: caiocamargos1996@gmail.com.

utilizada como solução técnica, por possuir características que provocam o melhoramento das propriedades mecânicas do solo, ocasionando o aumento de sua resistência.

Visando um estudo para aplicação em sub-base de pavimentos, optou-se por combinar a estabilização química e mecânica, para tanto, a metodologia consiste em realizar um estudo comparativo dos parâmetros de resistência do solo natural, solo misturado com cal, e ambos com a geogrelha posicionada entre a primeira e segunda camada, e segunda e terceira camada de solo compactado. Com o intuito de classificar o solo. Serão realizados ensaios de caracterização, além dos ensaios de compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e resistência à compressão simples, para determinar a tensão de ruptura e coesão dos corpos de prova, todos os ensaios previstos neste estudo foram realizados conforme as respectivas normas regulamentadoras.

2. Materiais e Métodos

Os ensaios laboratoriais realizados para este estudo consistem nas determinações das características físicas e mecânicas do solo e das misturas de solo-cais. Para isso, amostras deformadas de solo foram coletadas na Universidade Católica de Brasília, cujo procedimento da coleta se deu conforme o estabelecido pela NBR 9604/1986[2]. A cal hidratada CHI utilizada, seguiu os padrões normatizados pela NBR 7175/2002[3], segundo a informação do fabricante.

2.1. Cal hidratada cálcica

A cal é um aglomerante inorgânico, produzido a partir de rochas carbonáticas, composto basicamente por cálcio e magnésio, cujo endurecimento ocorre por reação com o CO₂ (Cincotto et al 2010)[4]. A cal hidratada CHI é denominada como gorda, por deviar de calcários quase puros e com teores de carbotanto não inferior a 99% (Coutinho, 1988)[5].

A porcentagem de cal estabelecida para este estudo é de 3%. Segundo Balbo (2007)[6], os critérios de dosagem do solo-cal variam de acordo com o uso pretendido para mistura.

De acordo com Departamento de Estradas de Rodagem (2006)[7], a porcentagem mínima de cal hidratada deve ser de 3% em massa seca de cal em relação a massa seca de solo, e a mistura deve atender aos requisitos de resistência de $CBR \geq 30\%$ e expansão $\leq 1,0\%$ na energia intermediária, conforme NBR 9895/1987[8], ou os definidos em projeto para sub-base do pavimento.

As especificações da cal utilizada neste estudo estão em conformidade com o estabelecido pelo DER ET-DE-P00/005[7].

2.2. Geogrelha

A geogrelha utilizada neste estudo possui capacidade de 50 kN/m.

2.3. Preparação das amostras de solo

As amostras deformadas de solo preparadas para o ensaio de caracterização foram realizadas conforme o especificado pela ABNT NBR 6457/1986[9].

2.4. *Análise granulométrica*

O solo utilizado foi submetido a uma análise granulométrica, para se obter o conhecimento da distribuição dos grãos do solo. Através deste ensaio se determinou a curva de distribuição granulométrica, para classificação do solo por combinação de peneiramento e sedimentação. Os procedimentos de ensaios foram realizados em concordância com a ABNT NBR 7181/84[10].

2.5. *Massa específica*

A massa é dada pela relação entre a massa da parte sólida e volume de sólidos. A massa específica aparente do solo úmido é dada pela relação entre massa de solo úmido e volume ocupado por esta; e a massa específica aparente do solo seco é dado pela relação entre massa de sólidos e volume total, Senço (2007)[11]. O ensaio de massa específica foi realizado conforme os procedimentos de ensaios explicitados pela ABNT NBR 6508/84[12].

2.6. *Limites de Atterberg*

Segundo Alves (2010)[13], plasticidade é a maior ou menor capacidade dos solos de serem moldados, sob certas condições de umidade, sem variação do volume. Os ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) foram realizados conforme a NBR 6459/1984[14] e NBR 7180/1984[15], respectivamente. O Limite de Liquidez se estabelece como limite entre o estado líquido, cuja umidade do solo se encontra elevada e apresentando-se como um fluido denso, Caputo (1988)[16]. Ademais, o Limite de Plasticidade é a umidade para a qual o solo passa do estado semi-sólido para o estado plástico, e Índice de Plasticidade é a quantidade de água necessária para que o solo passe do estado plástico para o líquido. A classificação se dá por intervalos estabelecidos na tabela de Jekins.

2.7. *Compactação*

A sensibilidade à compactação pode ser avaliada com o ensaio Proctor, desenvolvido pela engenharia civil. Este teste determina a umidade adequada para se adquirir a máxima compactação do solo na construção de estradas (Vargas, 1977)[17].

As compactações foram feitas nas amostras abordadas sob energia Proctor intermediária. Os procedimentos de ensaios foram realizados em conformidade com a ABNT NBR 7182/86[18].

2.8. *Índice de Suporte Califórnia*

A resistência no ensaio de ISC combina indiretamente a coesão com o ângulo de atrito do material, sendo o ISC expresso em porcentagem. Definido como a relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo-de-provar e a pressão necessária para produzir a mesma penetração no material padrão referencial, Bernucci et al (2006)[19].

O ISC foi realizado nas amostras de solo natural; solo com 3% de cal; amostras de solo natural com geogrelha posicionada entre a 1° e 2° camada de compactação; e

amostras de solo natural com a geogrelha entre a 2ª e 3ª camada de compactação. Nas amostras de solo-cal, a geogrelha também ficou posicionada entre a 1ª e 2ª camada de compactada e em amostras de solo-cal posicionada entre 2ª e 3ª. O posicionamento das geogrelhas estão ilustrados na Figura 1.

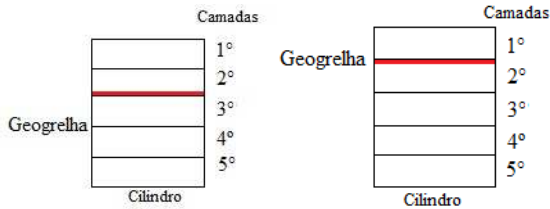


Figura 1. Esquema ilustrativo do posicionamento da geogrelha entre a 1ª e 2ª, e 2ª e 3ª camada de compactação.

As geogrelhas tiveram 3 cm de sobra do diâmetro para ancoragem na camada superior, conforme apresentado pela Figura 2.



Figura 2. Posicionamento da geogrelha no cilindro.

2.9. Resistência à compressão simples

Segundo Bernucci et al (2006)[19], a propriedade de resistência ao cisalhamento é determinada aplicando-se um carregamento crescente de compressão axial, sem tensão de confinamento, em corpos-de-prova cilíndricos, para determinar algumas propriedades mecânicas de materiais para sub-base de pavimentos, especialmente no caso de materiais cimentados quimicamente, como o caso da cal empregado deste estudo.

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado conforme dito nas amostras de ISC. Contudo, devido a dimensão do cilindro empregado neste ensaio, as geogrelhas foram posicionadas entre a 1ª e 2ª, e 2ª e 3ª camada compactada, conforme ilustrado pela Figuras 3.

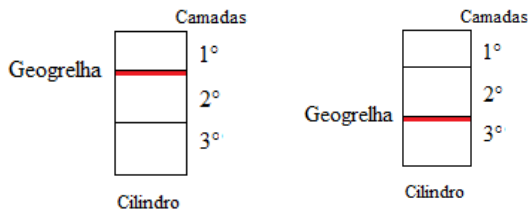


Figura 3. Esquema ilustrativo do posicionamento da geogrelha entre a 1ª e 2ª, e 2ª e 3ª camada de compactação.

Folgas de 3 cm foram deixados pelas geogrelhas a fim de garantir ancoragem das mesmas nas camadas superiores. Os procedimentos deste ensaio se deram conforme o

DNER-IE 004/94[20], e a norma americana ASTM D5102-96[21] para as misturas de solo cal.

3. Resultados e Discussão

3.1. Caracterização do solo

A Tabela 1 apresenta a caracterização do solo. De acordo com Das e Sobhan (2014)[22], em relação ao sistema de classificação AASHTO, é possível classificar o solo como A-7-6(23), sendo um grupo de solos argilosos. Já pela classificação SUCS, identifica-se que o solo é um Silte elástico, como mostra Das e Sobhan (2014)[22].

Tabela 1. Resultados de caracterização do solo.

| Ensaio: | Resultado: |
|----------------------------|-----------------------|
| Limite de liquidez | 52% |
| Limite de plasticidade | 29,12% |
| Índice de plasticidade | 22,88% |
| Massa específica dos grãos | 2,82g/cm ³ |

De acordo com a Tabela de Jenkins, o solo é classificado como muito plástico.

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006)[1], para sub-base o IG = 0. Por ser tratar de um solo laterítico argiloso, o presente solo apresenta um IG diferente de zero. Todavia, segundo DNIT-ES 139 (2010)[23], solos lateríticos podem apresentar IG \neq 0.

As análises granulométricas são mostradas na Figura 4, dos ensaios feitos sem e com defloculante (curva vermelha e preta).; O defloculante desagrega as partículas que se encontram aderidas, por isso a melhor distribuição dos grãos.

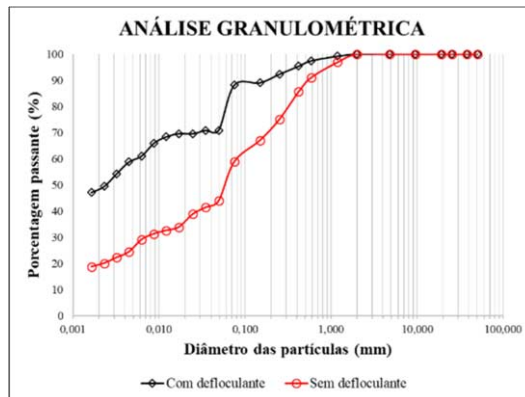


Figura 4. Análise granulométrica.

3.2. Compactação

A umidade ótima e massa específica seca foram obtidos das curvas de compactação, realizadas nas amostras de solo natural e solo-cal. A compactação não foi realizada nas amostras com geogrelha por se tratar de um material inerte. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos do ensaio.

Tabela 2. Resultados da Compactação.

| Amostras | Wót (%) | Mass. Esp.(g/cm ³) |
|---------------|---------|--------------------------------|
| Solo natural | 28,15 | 1,424 |
| Solo + 3% CHI | 28,9 | 1,411 |

Percebe-se que a adição de cal no solo provoca o aumento da umidade ótima e diminuição da massa específica seca. Isso pode ter ocorrido devido as interações químicas da com com o solo.

3.3. Índice de Suporte Califórnia

A Tabela 3 apresenta os resultados do ISC e expansão de cada amostra.

Tabela 3. Resultados da Compactação.

| Amostras | ISC (%) | Expansão(%) |
|---|---------|-------------|
| Solo natural | 23,26 | 0,44 |
| Solo + Geogrelha entre a 2ª e 3ª camada | 20,09 | 0,39 |
| Solo + Geogrelha entre a 1ª e 2ª camada | 26,60 | 0,35 |
| Solo + Cal 3% CHI | 35,91 | 0,09 |
| Solo + Cal + Geogrelha entre a 2ª e 3ª camada | 34,88 | 0,13 |
| Solo + Cal + Geogrelha entre a 1ª e 2ª camada | 38,49 | 0,13 |

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006)[1], os materiais de sub-base devem apresentar o $ISC \geq 20\%$ e expansão $\leq 1\%$, dessa forma, todas as amostras atendem a essa especificação. Como análise comparativa dos parâmetros de resistência do uso da estabilização mecânica, química e mecânica + química, nota-se que a combinação química e mecânica são as que apresentam maior propriedade resistente ao solo. Contudo, as amostras de solo com geogrelha posicionada entre a 2ª e 3ª camada de compactação, apresentaram ISC menor que o solo natural. Em contra partida, amostras com a geogrelha posicionada entre a 1ª e 2ª camada de compactação apresentam ISC maior que a do solo natural. O mesmo pode ser observado nas amostras com solo-cal e solo-cal e geogrelha.

É possível perceber também que a amostra de solo com 3% de CHI e geogrelha posicionada entre a 1ª e 2ª camada, apresenta maior resistência ao solo em comparação com as demais amostras. O ganho de resistência é de 65,48% em relação ao solo natural. O valor pode ser justificado pela a combinação de dois elementos de reforços potencializar a melhoria resistente empregada ao solo. O mesmo desempenho foi observado no trabalho de Pereira et al. (2017)[24], que analisara o estudo comparativo do reforço de solo com a geogrelha posicionada entre as 4 camadas de compactação.

Nas análise das expansões das amostras, nota-se que o acréscimo de cal no solo a reduz significativamente. Motivo esse que a cal é recomendada para melhoria das propriedades dos solos argilosos ou muito siltosos, que possuam alta plasticidade e expansão, além de baixa capacidade de suporte (Lima, 1984)[25].

3.4. Resistência á compressão simples

Na Tabela 4 os resultados nas amostras do ensaio de resistência à compressão e coesão, são apresentados. A coesão foi obtida segundo DNER-IE 004/94[20], conforme apresentado na Equação (1).

$$c = R/2 \quad (1)$$

Tabela 4. Resultados de Compressão Simples e Coesão.

| Amostras | Compressão Simples (kN/m ²) | Coesão (kN/m ²) |
|---|---|-----------------------------|
| Solo natural | 26,78 | 13,39 |
| Solo + Geogrelha entre a 2 ^a e 3 ^a camada | 34,65 | 17,325 |
| Solo + Geogrelha entre a 1 ^a e 2 ^a camada | 39,32 | 19,66 |
| Solo + Cal 3% CHI | 34,77 | 17,385 |
| Solo + Cal + Geogrelha entre a 2 ^a e 3 ^a camada | 36,06 | 18,03 |
| Solo + Cal + Geogrelha entre a 1 ^a e 2 ^a camada | 42,24 | 21,12 |

Analisando os resultados, observa-se que o aumento na resistência à compressão na amostra solo-cal e geogrelha, entre a 1^a e 2^a camada de compactação é 57,73% em comparação ao solo natural. Tal desempenho pôde ser semelhantemente observado no ensaio de ISC. Essa analogia serve para fomentar o melhor posicionamento da geogrelha nas camadas de compactação avaliada neste estudo, bem como a potencialização do reforço mecânico atribuído ao solo pela adição concomitante da melhoria mecânica e química atribuída pela cal e geogrelha.

Nas amostras somente com reforço mecânico, percebe-se um maior aumento na resistência à compressão e coesão, nas amostras cuja geogrelha está posicionada entre a 1^a e 2^a camada de compactação.

É possível verificar também, que não só a resistência à compressão simples foi maior nas amostras de solo-cal e geogrelha posicionada entre a 1^a e 2^a camada de compactação, em relação as demais amostras avaliadas, mas também apresentou o maior valor na coesão.

4. Considerações Finais

A melhoria e estabilização de solos é realizada a muitos anos na engenharia geotécnica, como solução econômica e ambiental, a fim de melhorar as propriedades mecânicas resistentes dos solos que não atendam as especificações de projeto. No presente estudo, a análise da melhoria química, mecânica + química, e mecânica, foram avaliadas por meio da adição de cal e geogrelha, materiais esses já empregados, individualmente, nas práticas geotécnicas de melhoria de solos. Os resultados da combinação desses materiais, estando a geogrelha posicionada entre a 1^a e 2^a camada de compactação, foram as que apresentaram maior incremento na resistência mecânica do solo. Tais resultados puderam ser observados nos ensaios de ISC e resistência à Compressão Simples, tornando-se a solução viável para reforço de solos, para obras que não atendam as especificações resistentes, como reforço de sub-base em obras de pavimentação.

Por se tratar de um material analisado em grande escala, acredita-se que o emprego da geogrelha como elemento de reforço ofereça maior capacidade resistente ao solo quando analisada em recipientes maiores do que os utilizados. Ademais, para as condições deste estudo, a geogrelha posicionada entre a 1^a e 2^a camada de compactação ofereceu um reforço de 14,36% em relação ao solo natural e de 65,48% quando combinada com a cal nos ensaios de ISC, e um aumento na resistência à compressão simples de 46,83% em relação ao solo natural e de 57,73% quando combinada com a cal, contribuindo também no aumento dos valores de coesão no solo.

Referências

- [1] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. (2006). *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986). NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2003). NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro.
- [4] CINCOTTO, Maria Alba; QUARCIONI, Valdecir Ângelo; JOHN, Vanderley Moacyr. (2010). Cal na Construção Civil. In: ISAlA, Geraldo Cechella. (Org.). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON. Volume 1. p. 695 - 726.
- [5] Coutinho, Joana de Sousa. (2002). *Ciência dos Materiais*. Documento Provisório, 1ª Parte. Disponível em: <http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano1/CienciaDosMateriais/apontamentos/teorica_20022003/JSC_031a043.pdf>. Acesso em: 01 de mai. 2018
- [6] Balbo, J.T. (2007). *Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, p. 558.
- [7] DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. (2006). DER ET-DE-P00/005: Sub-base ou base de solo-cal.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). NBR 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986). NBR 6457: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.
- [11] Senço, W. De. (2007). *Manual de Técnicas de Pavimentação: volume1.2. ed.* São Paulo: Pini, 1 v671p.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica.
- [13] Alves, Lucas Máximo. (2010). *Plasticidade e Consistência dos Solos*. Disponível em: <<https://lucasmaximalves.files.wordpress.com/2010/03/mecsolosi-aula4-plasticidadeeconsistenciadosolo.pdf>>. Acesso em 01 de mai. 2018
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984). NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.
- [16] Caputo, J.P. (1988). *Mecânica Dos Solos e suas Aplicações*. Rio de Janeiro: LTC, 234 p.
- [17] VARGAS, M. (1977). *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo: USP.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986). NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.
- [19] Bernucci, L.B. et al. (2006). *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, P. 351-504.
- [20] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. (1994). DNER-IE 004: Solos coesivos - determinação da compressão simples de amostras indeformadas.
- [21] American Society for Testing Materials. ASTM D 5102. (1996). *Standart Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures*.
- [22] DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. (2014). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 8ª edição, São Paulo: Cengage Learning.
- [23] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. (2010). DNIT-ES 139: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR. p.3. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit139_2010_es.pdf>. Acesso em: 24 de abr. 2018
- [24] Pereira, Ítalo de Lima; Oliveira, Francisco Heber Lacerda de; Aguiar, Marcos Fábio de. (2017). *Estudo de Camadas Granulares de Pimentos Rodoviários Refrçados com Geogrelha*. In: 20ª Reunião de Pavimentação Urbana. Anais. Disponível em: <[file:///C:/Users/Usu%C3%A1rio/Downloads/ArtigoCompleto_ITALODELIMAPEREIRA%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Usu%C3%A1rio/Downloads/ArtigoCompleto_ITALODELIMAPEREIRA%20(1).pdf)>. Acesso em: 01 de mai. 2018
- [25] LIMA, D. C. (1984). *Estabilização Solo-Cal*. In: 19ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Rio de Janeiro. Anais... p.67-82.