

ESTUDO DE MELHORAMENTO DE UM SOLO ARGILOSO COM USO DE RESÍDUO PROVENIENTE DA QUEIMA DE CAVACOS DA CELULOSE IRANI – SC

Fabiano A. Nienov

Professor Doutor do curso de Engenharia Civil da Universidade do Oeste de Santa Catarina
fabiano.nienov@unoesc.edu.br

Renata Pagliarin

Acadêmica do curso de Engenharia Civil da Universidade do Oeste de Santa Catarina
re_pagliarin@hotmail.com

Resumo. Este trabalho apresenta um estudo sobre o melhoramento de um solo argiloso da região de Irani – SC, através da adição de cal e cinza de caldeira proveniente da Celulose Irani. Foram definidos 8 traços para o estudo, com adição de cal de 8,0% e 10,0%, sendo cada um deles com as combinações de 3,0%, 5,0%, 7,0% e 9,0% de cinza, em tempos de cura de 7, 14 e 28 dias, visando analisar a resistência a compressão simples. Ao analisar o comportamento, observou-se que em tempos de cura mais longos obteve-se maiores ganhos de resistência. Quanto à adição da cal, foi mais eficaz para traços com percentual de 10,0%, e de cinza em menores teores de 3,0%. Misturas com menor adição de cinza resultaram em maior Massa Específica Aparente Seca, menor absorção de água e porosidade, resultando em corpos de prova com maior RCS.

Palavras-chave: Melhoramento de solo. Cinza de caldeira. Resistência.

1. INTRODUÇÃO

Em obras geotécnicas, torna-se necessário o melhoramento do solo natural quando não possui as características necessárias para desempenhar as suas funções a que são destinados. Como solução, podem-se modificar as suas propriedades, melhorando seu comportamento, sendo essa modificação o que denominamos estabilização de solos (CRUZ e JALALI, 2010).

Numerosas pesquisas com os mais diversos resíduos vêm sendo objeto de estudo, a fim de estabilizar os solos, podendo substituir parte do uso de materiais com alto custo por materiais de menor custo. Esta crescente busca de soluções visa à preservação dos recursos naturais, o aproveitamento e a aplicação de resíduos em obras geotécnicas, pois evita a disposição inadequada e redução de impactos ambientais.

Nesse sentido, a alternativa de se usar a cinza de caldeira, vem de encontro com os conceitos mencionados, visto que segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2014) o cultivo de eucalipto vem aumentando

nos últimos anos no Brasil, e juntamente com ele o excesso de cinzas produzidas pela queima da madeira.

Desta forma, o presente trabalho tem por intuito o melhoramento de um solo argiloso, adicionado cinza de carvão mineral e cal. Para isso, serão realizados ensaios em laboratório, como PH, caracterização dos materiais e ensaios de compactação, fazendo algumas misturas a fim de avaliar o comportamento dos 3 materiais juntos.

Diante do exposto, a pesquisa tem por finalidade contribuir nos estudos de melhoramentos de solos, atribuindo um possível destino às cinzas provenientes da queima de cavacos no processo de celulose, e com uma perspectiva de ganho nas propriedades mecânicas do solo estabilizado, ou na pior das hipóteses o resíduo não alterar as propriedades do solo-cal estabilizado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Solo

Solo pode ser definido, segundo Guimarães (2002), como um corpo natural, tridimensional, formado de camadas aproximadamente paralelas à superfície e constituído de elementos orgânicos e minerais. Ele possui três fases, a sólida (minerais e orgânicos); a líquida (água que preenche os espaços entre as partículas) e gasosa (que ocupa os espaços não preenchidos por água).

2.2 Solo-cal

Em misturas de solo-cal, observadas por Lopes (2011) e Branco, Pereira e Santos (2008), explicam que apresentam menor massa específica aparente máxima que o solo natural (γ_d), para uma mesma energia de compactação. À medida que o teor de cal aumenta o γ_d continua diminuindo e a umidade ótima aumenta.

Corteleti (2013) complementa que, as misturas que apresentam umidade ótima maior resultam em uma curva de compactação mais achatada.

No entanto, há estudos de (CARRARO – 1972; FOPPA – 2005, apud CORRÊA, 2008), que comprovam que o teor de umidade que proporciona a máxima resistência e durabilidade não é necessariamente igual ao teor de umidade que gera a maior massa específica aparente seca, e si um valor levemente inferior ao teor ótimo.

Quando adicionado cal as partículas do solo se tornam mais floculadas. Desta forma, a quantidade de vazios e o tamanho dos vazios no solo aumentam, reduzindo o γ_d do solo (CORTELETI, 2013).

2.3 Cinza de caldeira

De acordo com American Coal Ash Association (2003, apud PEREIRA, 2012), o aproveitamento de cinzas vem ganhando espaço no campo de pesquisa em todo o mundo. Elas possuem propriedades que permitem a estabilização química e/ou mecânica, alterando a densidade, aumentando a resistência mecânica, controle de expansão e retração e controle de umidade.

A madeira de eucalipto usada para produção da celulose é constituída de elementos anatômicos ou contendo fibras, logo as cinzas são compostas por material fibroso (FOELKEL, 2007).

A cinza de cavaco de eucalipto, no Brasil e no mundo, possui destinação incerta, sendo objeto de estudo para muitos pesquisadores, já que as cinzas possuem alto teor de óxido de silício em grande parte amorfo, podendo ser usados como pozolanas (DA SILVA, 2017).

2.4 Pesquisas utilizando cinza de caldeira

Genovasi ([20--]), ao desenvolver misturas de cal com cinza volante de carvão mineral,

proveniente de termoeletricas, realizou ensaios em laboratório para melhoramento de um solo argiloso da cidade do Rio de Janeiro. Melhores resultados apresentou solo com adição de 15,0% de cinza, e também a combinação de 3,0% de cal e 12,0% de cinza. Os melhores traços foram com menores adições cinza, concluindo que as reações pozolânicas se comportam melhor em menores adições.

Meliande e Casagrande (2016), utilizando solo argiloso e arenoso do município de Capivari de Baixo, estado de Santa Catarina, adotando teores de cinza volante e cal, alcançaram os melhores resultados para solo argiloso em 3,0% e 12,0% de cinza. No entanto, ao observar a amostra de areia, apresentaram resultados iguais ou inferiores à amostra, o que pode ter ocorrido em função da inibição das reações pozolânicas entre a cinza e cal devido à presença do sal.

Em relação às misturas, Nardi (1975), explica que poderão ser preparadas com um baixo teor cal (2%) e cinza volante (8%), ou com um alto teor de cal (9%) e cinza volante (36%). Nesses dois intervalos, uma série de combinações será possível, variando a cal desde 2 a 9% e a cinza de volante de 8 a 36%.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia experimental adotada foi dividida em caracterização dos materiais, definição das dosagens, processo de moldagem e ensaio mecânico.

3.1 Materiais

A amostra de solo foi coletada no estado de Santa Catarina na cidade de Irani –SC e encaminhada para o Laboratório de Materiais e Solos da Unoesc – Campus Joaçaba.

A cal utilizada foi a disponível no laboratório. A cinza é proveniente do processo da queima da biomassa da Celulose Irani AS,

em que será utilizada a parcela mais fina, a mesma que hoje é destinada a agricultura.

O material foi levado à estufa até constância de massa e posteriormente passando na peneira 0,075 mm, a fim de utilizar somente a parcela mais fina.

3.2 Ensaio de caracterização

Os ensaios realizados para caracterização do solo foram regidos pelas seguintes normas:

- a) NBR 7181 (ABNT, 2016) - Solo: Análise Granulométrica;
- b) NBR 6459 (ABNT, 2016) – Solo: Determinação do Limite de Liquidez;
- c) NBR 7180 (ABNT, 2016) – Solo: Determinação do Limite de Plasticidade;
- d) DNER-ME 093/1994 – Solo – Determinação da densidade real.

Para cinza de caldeira, foi realizado o ensaio NBR NM 23 de 2017 – Cimento Portland e outros materiais em pó

3.3 Resultados dos ensaios de caracterização

A partir dos ensaios de caracterização foram encontrados os seguintes resultados: Massa Específica do solo 2,832 g/cm³ e da cinza de caldeira 1,882 g/cm³. O Limite de Liquidez do solo 60,0% e o Limite de Plasticidade 46,0%, resultando em Índice de Plasticidade de 14,0%. Classificando o solo pelo método H.B.R enquadra-se no grupo A7-5, tendo porcentagem passante na peneira nº 200 > 35%. Já pelo método S.U.C.S classifica-se como Silte Elástico

3.4 Definição das dosagens

As dosagens foram definidas pelo ensaio de pH, proposto por Eades e Grim (1966). O método prevê a quantidade de adição necessária na mistura para que atinja valor de PH de 12,40, valor este em que há tendência da formação dos compostos cimentícios proporcionando as reações pozolânicas. Combinações com cinza e cal também foram analisadas, a fim de verificar se causaria alteração no valor da mistura.

Para o teor de Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca (γ_d), foi realizado o ensaio de compactação NBR 7182 (ABNT, 2016). As dosagens encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Dosagens

Traço	Teor ótimo	γ_d (g/cm ³)
3% Cin8% Cal	33,00%	1,370
5% Cin8% Cal	34,00%	1,346
7% Cin8% Cal	35,00%	1,320
9% Cin8% Cal	36,00%	1,300
3% Cin10% Cal	34,50%	1,350
5% Cin10% Cal	35,50%	1,327
7% Cin10% Cal	36,50%	1,304
9% Cin10% Cal	37,50%	1,280

3.5 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados 3 corpos de prova para cada tempo de cura de 7, 14 e 28 dias, totalizando 72, em um cilindro com dimensões de 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura. A quantidade de material previamente calculada, era colocada em uma forma metálica e homogeneizados os 3 materiais, conforme a Fotografia 1.

Fotografia 1. Preparação da mistura



Para controle da umidade, as frações da mistura para cada camada eram armazenadas em potes fechados (Fot. 2). Cada corpo de prova foi compactado em três camadas na prensa, aferido o peso e medidas, e deixado em cura pelo tempo já pré-determinado.

Fotografia 2. Moldagem dos corpos de prova



3.6 Ensaio mecânico

Após o tempo de cura, os corpos de prova foram pesados e medidos antes de serem colocados na água. Em seguida, eles foram imersos na água por um período de 24 h e após o tempo, foi retirado, pesado e aferido às medidas novamente.

Para o rompimento foi seguida a NBR 12025/2012, em que os corpos de prova foram posicionados alinhados ao eixo vertical da máquina e aplicado o carregamento, sendo cessado após o rompimento.

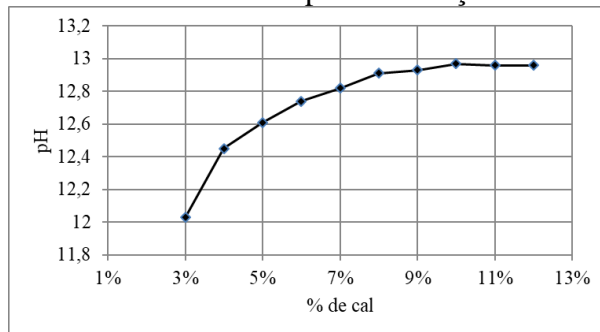
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Definição das dosagens

A partir do ensaio de pH (Gráf. 1), verificou-se que com 4,0% de cal a mistura atinge pH correspondente a 12,45, e a partir de 10,0% há a estabilização do valor de pH.

No entanto, ao ter conhecimento que com teor de 5,0%, este mesmo solo não obteve cimentação, foi optado por adicionar a quantidade de 8,0% e 10,0% de cal, e fazer a combinação com teores de cinza.

Gráfico 1. Ensaio de pH com adição de cal



No ensaio de compactação, nota-se no Gráfico 2, que traços com maior adição tiveram Umidade Ótima maior, e no Gráfico 3, verifica-se o inverso, a maior adição provocou redução da Massa Específica Aparente Seca.

Gráfico 2. Traço x Umidade ótima

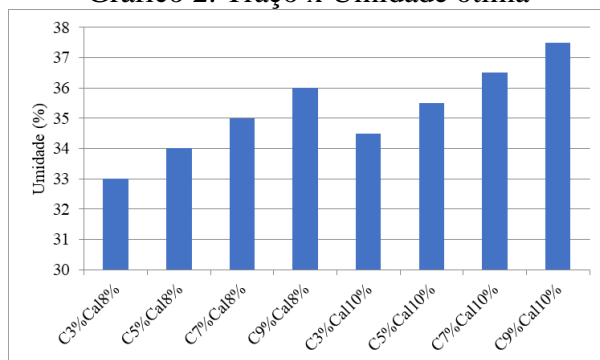
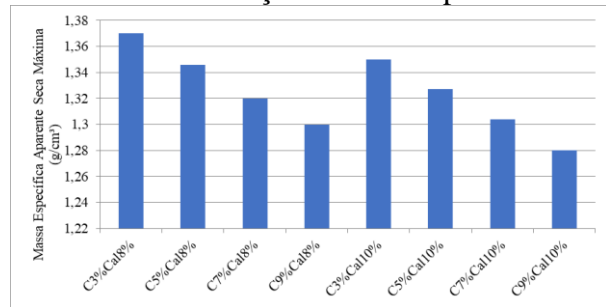


Gráfico 3. Traço x Massa Específica

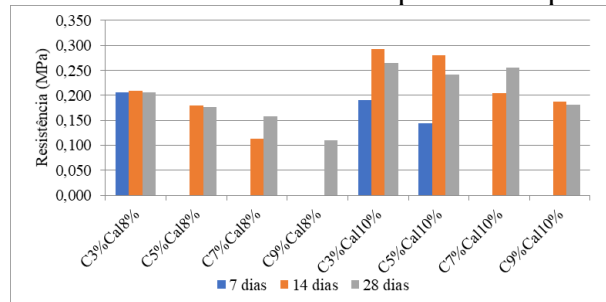


Este comportamento pode ser justificado devido que, a adição de um material com Massa Específica menor que a do solo, tendeu a uma mistura com Massa Específica menor, e conseqüentemente Teor de Umidade maior.

4.2 Resistência a compressão simples

O Gráfico 4 apresenta os resultados do ensaio de compressão simples nos 3 tempos de cura analisados.

Gráfico 4. Resistência a compressão simples



Analisando os resultados, conclui-se que traços com 10,0% de cal apresentaram melhores resultados, sendo que com adição de 3,0% de cinza teve o melhor desempenho. Para 10,0% de cal em tempo de cura 14 dias, verifica-se melhor desempenho com 3,0% e 5,0% de cinza quando comparado com os 28 dias

Em relação aos corpos de prova moldados aos 7 dias, pode-se considerar que em alguns traços não houve a troca catiônica das partículas do solo, fazendo com que não

houvesse a floculação e a formação da matriz resistente do solo. Este processo é fundamental para que as partículas do solo aumentem de tamanho e ocorram as reações de cimentação para favorecimento da ação pozolânica e ganho de resistência.

Outro aspecto a ser observado, é que este solo pode apresentar pouca quantidade de sílica e alumina, não havendo as reações de cimentação, ou ainda presença de matéria orgânica.

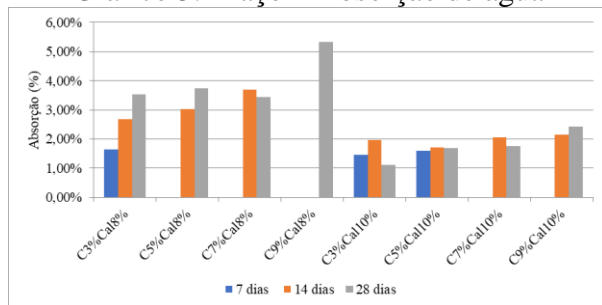
4.3 Absorção de água

No Gráfico 5, observa-se que na maioria dos traços com 8,0% de cal, em períodos de cura mais longo resultou em corpos de prova com maior absorção de água, além de o aumento da adição de cinza contribuir para a maior absorção.

Quando analisado traços com 10,0% de cal, houve redução considerável na absorção de água, indo de encontro com estudos realizados por Branco, Pereira e Santos (2008).

Em geral, a variação de volume entre os tempos de cura de um mesmo traço, não obtiveram grande variação.

Gráfico 5. Traço x Absorção de água

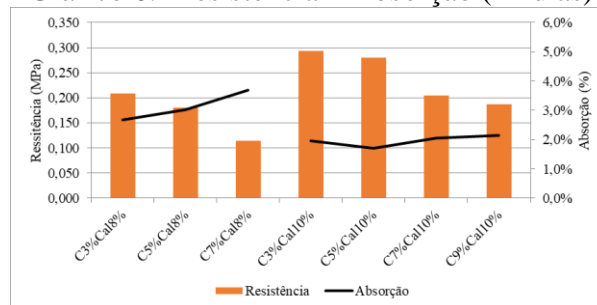


Ao relacionar a resistência com absorção para o tempo de cura de 14 dias (Gráf. 6), nota-se que os traços com 8,0% de cal tiveram maior absorção de água quando houve menor

resistência. No entanto os traços com 10,0% de cal não seguiram o mesmo comportamento.

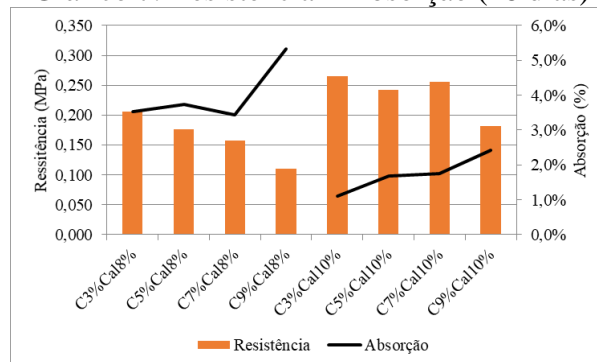
Ao comparar a adição de 3,0% com 9,0% de cinza, houve queda de resistência de 35,84% no entanto a variação de absorção foi de 0,18%. Outra comparação pode ser feita com a adição de 3,0% com a de 7,0% de cinza, em que a resistência diminuiu 30,0% e a absorção também não houve variação de absorção considerável.

Gráfico 6. Resistência x Absorção (14 dias)



No Gráfico 7 mostra o resultado dos corpos de prova em tempo de cura de 28 dias. Verifica-se que a mistura com 9%cinza8%cal apresentou pico máximo de absorção e queda de resistência. Já a mistura com 3%cinza10%cal, apresentou queda na absorção de água e conseqüentemente maior resistência.

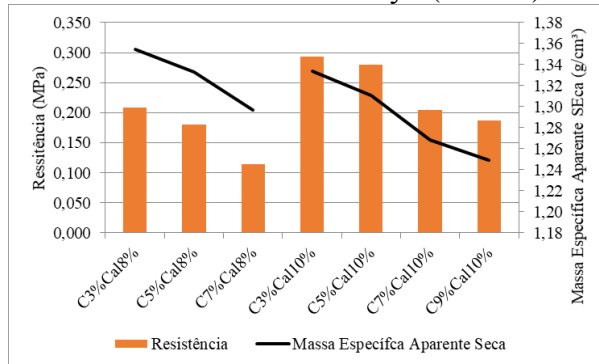
Gráfico 7. Resistência x Absorção (28 dias)



4.4 Massa Específica

Com o intuito de avaliar a influência da Massa Específica Aparente Seca de moldagem nos resultados dos corpos de prova, foram elaborados os gráficos abaixo para os diferentes tempos de cura.

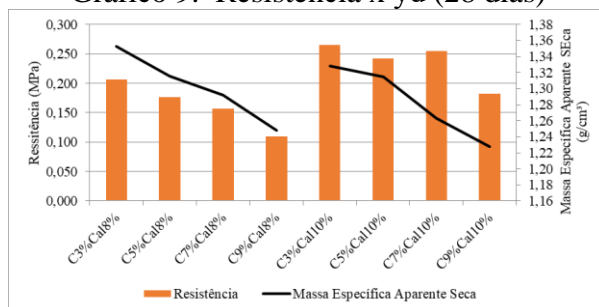
Gráfico 8. Resistência x γ_d (14 dias)



Em geral, os traços no tempo de cura de 14 dias tiveram o aumento de resistência quando a Massa Específica de moldagem foi maior, como verificado em estudos já realizados por Corteleti (2013), pois há maior contato entre os grãos ocasionando redução do número de vazios.

No Gráfico 9, ao analisar os traços com tempo de cura de 28 dias, em geral obteve-se o mesmo comportamento que aos 14 dias.

Gráfico 9. Resistência x γ_d (28 dias)



4.5 Porosidade

Os Gráficos 10 e 11 a seguir relacionam a resistência com porosidade nos diferentes tempos de cura. Em geral, nota-se que os traços com menor resistência apresentam maior porosidade.

Gráfico 10. Porosidade (14 dias)

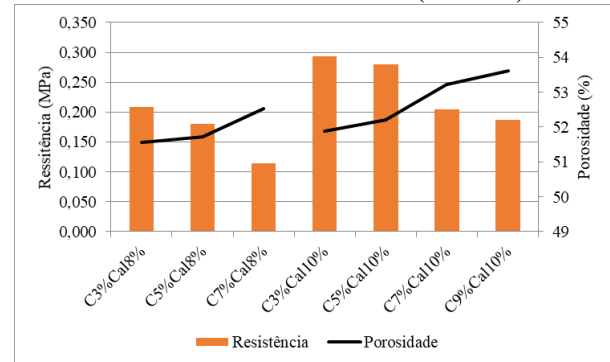
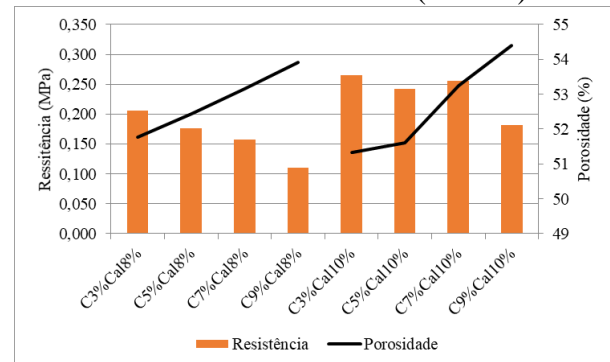


Gráfico 11 - Porosidade (28 dias)



A porosidade é a porcentagem de vazios que há em uma amostra de solo, logo quanto maior a quantidade de partículas cimentantes em um corpo de prova compactado, menos vazios terá em seu interior, elevando a resistência em traços que apresentaram menor porosidade.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos nos ensaios executados da amostra do solo com adição de cal e cinza, juntamente com o embasamento teórico elaborado no decorrer do trabalho, este relatório atingiu aos objetivos propostos.

Ao utilizar o método do pH para o percentual de adição ao solo, observou-se que a partir de 10,0% de cal há estabilização do valor do pH, e quanto a adição de cinza, conclui-se que seu acréscimo não influenciou nos valores quando comparado com a adição somente da cal.

A adição de cinza nas misturas no ensaio de compactação conduziu ao aumento do teor de umidade ótimo em 3,0%, quando analisado o incremento de 3,0% a 9,0% de cinza ao solo, visto que foi necessária maior quantidade de água para hidratar a adição de finos. Em consequência, a massa específica aparente seca tendeu a diminuir para misturas com maior teor de adição, resultando em distribuição granulométrica mais dispersa.

Em relação aos corpos de prova analisados com tempo de cura de 7 dias, alguns traços não obtiveram cimentação, possivelmente devido a inibição da reação pozolânica entre o solo, cal e cinza, pois a reação tende a ocorrer a longo prazo. Dos traços que resistiram, apresentaram baixo valor de RCS, no entanto ao analisar o seu comportamento em tempos de cura mais longos, obteve percentuais de evolução de resistência de até 94,44% para o traço 5%cinza10%cal.

Os resultados evidenciam que maior porcentagem de cal contribui para menor absorção de água. Quanto à adição de cinza, teores menores foram mais eficazes, uma vez que os traços 9%cinza8%cal e 9%cinza10%cal tiveram pico máximo de absorção, ocasionando desta forma a perda de resistência.

Em outra análise, verificou-se que a Massa Específica influenciou diretamente nos resultados de RCS, haja vista que quanto maior a densidade da mistura, maior a redução do número de vazios devido o maior contato entre os grãos, proporcionando aumento de resistência, como o traço 3%cinza10%cal com 0,293 MPa.

Diante dos resultados, verificou que a RCS não resultou em valores elevados, no entanto é possível utilizar a cinza de caldeira para o melhoramento do solo em estudo, visto que é possível fazer o descarte de grandes volumes do material sem que prejudique a resistência do solo melhorado. A sua destinação pode vir a ser feita em obras que não exijam grandes cargas, tendo assim uma nova finalidade para a Celulose Irani, além do uso na agricultura e reflorestamento.

Agradecimentos

À Deus, pela vida e por estar sempre presente.

Ao professor Fabiano pela orientação e por estar sempre ajudando no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de laboratório Guilherme, Silvestre, Marina, Letícia, Rafael, Mateus, Regina. Aos estagiários do laboratório e o Fernando.

A minha família.

A todos que, de uma forma ou de outra, colaboraram para que este trabalho fosse concluído.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459 – Solo: Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7180 – Solo: Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181 – Solo: Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7182 – Solo: Ensaio de Compactação.** Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 12025: Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos** — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L. P. **Pavimentos Rodoviários.** Coimbra: Almedina, 2008. 388 p.

CORRÊA, F. J. **Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CORTELETI, E. J. B. **Melhoramento do solo residual de lajeado com a adição de cal.** 2013. 57 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas do Centro Universitário, Lajeado, 2013.

CRUZ, M. Lurdes; JALALI, S. **Melhoramento do desempenho de misturas de solo-cimento,** Revista Luso-Brasileira de Geotecnia 2010. ISSN 0379-9522. 120, P. 49-64

DA SILVA, M. J. **Reforço de solos utilizando em base e sub-base de pavimentos rodoviários com cinza com alto teor de cálcio.** 2017. 127 p. Tese (Doutorado

em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, Ouro Preto, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 093 – Solo – Determinação da densidade real.** Rio de Janeiro, 1994.

EADES, J. L; GRIM, R. E. **A quicktest to determine Lime Requirements for Lime Stabilization.** Highway Research Record, Washington, D. C., n. 139, p. 61-72. 1966.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Cultivo de Eucalipto.** Disponível em: <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducao6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_column-id=column-2&p_p_col_count=1&p_r_p-76293187_sistemaProducaoId=7811&p_r_p-996514994_topicoId=8509>. Acesso em: 18 ago. 2018.

FOELKEL, C. **Resíduos sólidos industriais da produção de celulose kraft de eucalipto; Parte 1: Resíduos orgânicos fibrosos,** 2007. 78 p.

GENOVESI, J. F. **Análise do comportamento de misturas de solos com cinza volante de carvão mineral e cal.** Departamento de Engenharia Civil. [20--]. 20 p.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil.** 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.

LOPES JUNIOR, L. S. **Metodologia de previsão do comportamento mecânico de solos tratados com cal.** 2011. 227 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade

Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,
2011.

MELIANDE, A. M.C.; CASAGRANDE, M.
D.. T. **Análise do comportamento de
misturas de areia e solo argiloso com cinza
volante de carvão mineral para aplicações
geotécnicas.** XVIII Congresso Brasileiro de
Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica,
Pontifícia Universidade Católica, Rio de
Janeiro, 2016.

NARDI, José Vidal. **Estabilização de areia
com cinza volante e cal; Efeito do cimento
como aditivo e de brita na mistura.** 1975.
179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia
Civil) – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, Rio de Janeiro, 1975.

PEREIRA, Kiev Luiz de Araújo.
**Estabilização de um solo com cimento e
cinza de lodo para uso em pavimento.** 2012.
125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia
Civil) – Universidade Federal do Rio Grande
do Norte, Natal, 2012.