

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

Renata Pagliarin

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

Fabiano A. Nienov

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

Gislaine Luvizão

Professora Mestra do curso de Engenharia Civil da Universidade do Oeste de Santa Catarina
gislaine.luvizao@unoesc.edu.br

Lucas Q. Zampieri

Professor Mestre do curso de Engenharia Civil da Universidade do Oeste de Santa Catarina
lucas.zampieri@unoesc.edu.br

Resumo. *Este trabalho apresenta um estudo sobre o melhoramento de um solo siltoso da região de Irani – SC, através da adição de cal e cinza de caldeira proveniente da Celulose Irani. Foram definidos traços para o estudo com adição de cal em 8,0% e 10,0%, sendo cada um deles com as combinações de adição 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. Os traços moldados foram submetidos ao ensaio de resistência a compressão simples. Misturas com menor adição de cinza resultaram em maior Massa Específica Aparente Seca e menor absorção de água, resultando em corpos de prova com maior resistência a compressão simples. Observou-se que o tempo de cura influenciou no comportamento, obtendo-se maiores resistência em tempos de cura mais prolongados.*

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.

O presente trabalho estuda adição de cinza de carvão mineral, solo siltoso de formação residual e cal para melhoramento das condições geotécnica e dessa forma atribuir um possível destino para cinza proveniente da

queima de cavacos no processo de celulose. Atualmente, a empresa Celulose Irani faz a destinação das cinzas grossas para fabricação de briquetes de carvão, enquanto as finas são destinadas a agricultura.

Foram realizados ensaios em laboratório, como pH, caracterização dos materiais e ensaios de compactação, elaborando traços a fim de avaliar o comportamento da mistura desses materiais.

2. CINZA DE CALDEIRA

O processo da fabricação da celulose inicia-se na floresta com o corte das torras de eucalipto e restos florestais. Eles são descascados e triturados para virar cavaco, ficando cerca de um mês em espera para eliminação da lignina. Após o prazo, os cavacos são levados até a peneira classificatória que faz a seleção por tamanho, em que os cavacos que estiverem fora do tamanho padrão, são levados ao digestor para realizar a queima, gerando vapor e eletricidade necessária para o processo de celulose. Desta queima de biomassa, provem as cinzas de caldeira, sendo classificadas em cinzas grossas ou cinzas finas.

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).

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

O programa experimental adotado foi dividido em caracterização dos materiais, definição das dosagens, processo de moldagem e ensaio mecânico.

A amostra de solo foi coletada nas dependências da empresa Celulose Irani e encaminhada para o Laboratório de Materiais e Solos da Unoesc – Campus Joaçaba.

A cal utilizada foi do tipo CH III. A cinza é proveniente do processo da queima da biomassa da Celulose Irani, em que foi utilizada a parcela mais fina, a mesma que hoje é destinada a agricultura.

A cinza foi levada à estufa à 100 °C até constância de massa e posteriormente passando na peneira 0,075 mm, a fim de utilizar somente a parcela mais fina.

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 determinação da Massa Específica da cinza de caldeira, foi realizado o ensaio NBR NM 23 de 2017 – Cimento Portland e outros materiais em pó.

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.

Desta forma, iniciou separando 50,0 g de solo e porcentagens de cal de 3% a 12% sobre a massa do solo, e acrescentou-se 250 ml de água, deixando a mistura em repouso por 1h. Após este tempo, realizou-se a leitura com o pH-metro. Combinações com cinza e cal também foram analisadas, a fim de verificar se causaria alteração no valor da mistura. As porcentagens de adição sobre a massa de solo, foram de 5%, 8% e 10% de cal; e 3%, 5%, 7% e 9% de cinza.

Para o teor de Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca (γ_d), foi realizado o ensaio de compactação NBR 7182 (ABNT, 2016), compactando-se cada camada na Energia Normal (3 camadas de 12 golpes).

De posse das informações obtidas pelo ensaio de compactação foram moldados os corpos de prova para serem submetidos o ensaio de resistência à compressão simples (RCS). Moldou-se 3 corpos de prova para

cada tempo de cura de 7, 14 e 28 dias, totalizando 72 corpos de prova. A moldagem foi realizada e um cilindro com dimensões de 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura. A quantidade das misturas previamente calculada foi adicionada em um recipiente metálico e homogeneizada, conforme apresentado na Fig. 1.

Figura 1. Preparação da mistura



Para controle da umidade, as frações da mistura para cada camada eram armazenadas em potes fechados (Fig. 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.

Figura 2. Moldagem dos corpos de prova



Os corpos de prova foram identificados e armazenados em sacos plásticos, com a intenção de não permitir a perda da umidade de moldagem.

Após atingido o tempo de cura, os corpos de prova foram pesados e medidos antes de serem imersos na água. Permaneceram imersos na água por um período de 24 h. Após o tempo de 24 h, foram retirados da água, pesado e aferido as medidas novamente. Este procedimento foi realizado com o objetivo de avaliar a absorção de água nos diferentes traços durante a imersão.

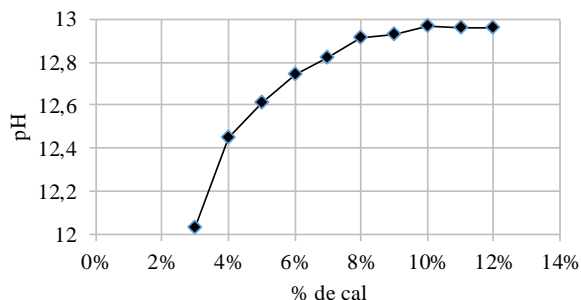
Para o rompimento foi seguida a NBR 12025/2012, em que os corpos de prova foram posicionados alinhados ao eixo vertical da máquina e aplicado o carregamento, sendo cessado após o rompimento.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos ensaios de caracterização foram obtidos 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 n° 200 > 35%. Já pelo método S.U.C.S classifica-se como Silte Elástico.

No Gráfico 1 é apresentado o ensaio de pH das misturas (solo mais cal).

Gráfico 1. Ensaio de pH com adição de cal

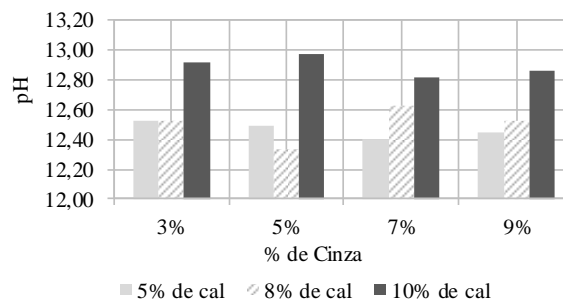


Verifica-se que com adição de 4,0% de cal a mistura atinge pH correspondente a 12,45, e a

partir de 10,0% há a estabilização do valor de pH.

No Gráfico 2, são apresentados os valores do pH das misturas (solo, cinza e cal). A adição da cinza na mistura não influenciou nos valores de pH. A adição de cal teve influência nos valores, principalmente a adição de 10% de cal.

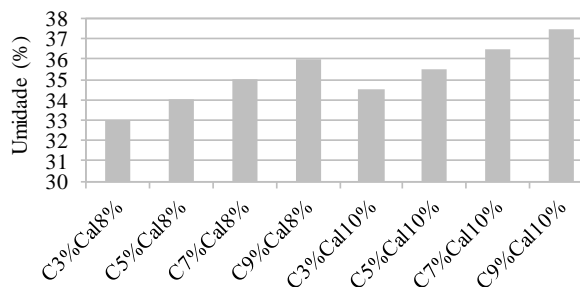
Gráfico 2. Ensaio de PH com adição de cal e cinza



As misturas com 5,0% de cal não resistiram a imersão de água e desagregaram. Desta forma, foi determinado que a quantidade de cal adicionado ao solo seriam de 8,0% e 10,0%. Quanto a quantidade de cinza, mantiveram-se os valores de 3,0%, 5,0%, 7,0% e 9,0%.

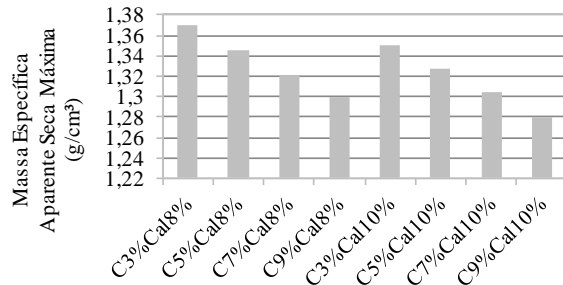
Referente ao ensaio de compactação, apresentado no Gráfico 3, observa-se que os traços que apresentam maior teor de adição de cal e cinza, tiveram umidade ótima mais elevada.

Gráfico 3. Umidade ótima



No Gráfico 4, verifica-se o inverso, a maior adição provocou redução da Massa Específica Aparente Seca.

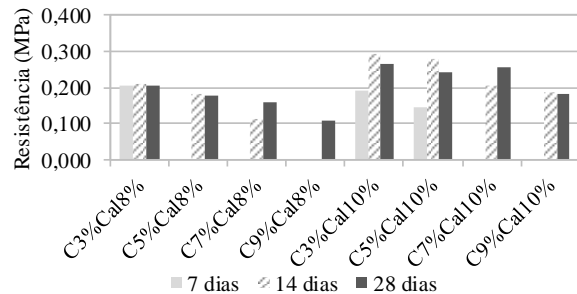
Gráfico 4. Massa Específica



Este comportamento se justifica, pois, a adição de um material com Massa Específica menor que a do solo, resultou em misturas com Massa Específica menor.

O Gráfico 5 apresenta os resultados do ensaio de compressão simples nos 3 tempos de cura analisados.

Gráfico 5. Resistência a compressão simples



Observa-se de uma forma geral, que traços com 10,0% de cal apresentaram RCS superiores aos traços com 8,0% de cal. Em relação a quantidade de cinza, teores menores foram mais eficientes, sendo que corpos de prova com adição de 9,0% não resistiram a submersão em água por 24 h, em tempos de cura de 7 e 14 dias.

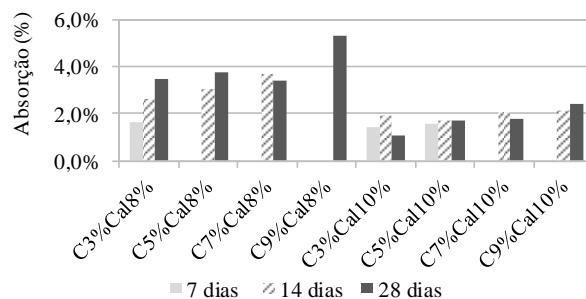
Ao observar 2 traços com maior valor de RCS, verifica-se evolução no ganho de resistência dos 7 aos 14 dias de 54,21% para o traço 3%cinza10%cal, e de 94,44% para o traço 5%cinza10%cal.

Em geral, os traços tiveram redução de resistência com o aumento do teor de cinza, indo em desconforto com estudos já realizados, como por exemplo, por Mishra (2012, apud DA SILVA, 2017), obteve teor ótimo de cinza de 30,0% e Genovasi ([20--]) que seu melhor traço foi com 3,0% de cal e 12,0% de cinza.

Quanto os corpos de prova moldados aos 7 dias que não resistiram a imersão a água, justifica-se pelo curto espaço de tempo de cura, uma vez que, a cal provocar as reações de cimentação entre as partículas do solo de forma lenta. Em tempos de cura mais longos ocorre a cimentação entre as partículas do solo garantindo resistência mais elevada.

Referente a absorção apresentado no Gráfico 6, observa-se que a absorção foi mais pronunciada no traço que continha 8,0% de cal. A concentração maior de cinza na mistura também contribuiu para o efeito de maior absorção de água. No traço com 8,0% de adição de cal, a absorção de água foi maior em corpos de prova sujeitos a tempos de cura mais longos.

Gráfico 6. Absorção de água



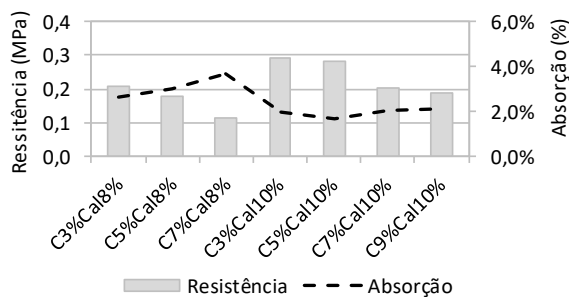
Para traços com 10,0% de cal, ocorreu redução da absorção de água.

Ao relacionar a resistência com absorção para o tempo de cura de 14 dias (Gráf. 7), observa-se que os traços com 8,0% de cal obtiveram maior absorção de água e menores resistências. Já os traços com 10,0% de cal não seguiram o mesmo comportamento, uma

vez que a absorção e RCS não foram grandezas inversas.

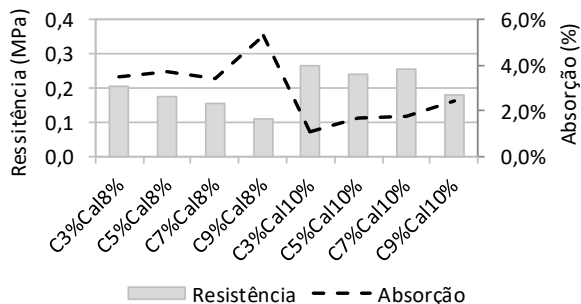
Desta forma, ao comparar os traços com 10,0% de cal, a adição de 3,0% com 9,0% de cinza, houve queda de resistência de 35,84%, no entanto a variação de absorção foi de 0,18%. Outra comparação pode ser feita com a adição de 3,0% com a de 7,0% de cinza, em que a resistência diminui 30,0% e a absorção também não houve variação de absorção considerável.

Gráfico 7. RCS x Absorção aos 14 dias



No Gráfico 8 é apresentado o resultado dos corpos de prova em tempo de cura de 28 dias. Para misturas com 8,0% de adição de cal o comportamento foi similar aos 14 dias de cura, quanto maior a absorção de água menor a RCS. O mesmo comportamento foi registrado na adição de 10% de cal nas misturas. Maior concentração de cinza gera aumento de absorção e redução da RCS.

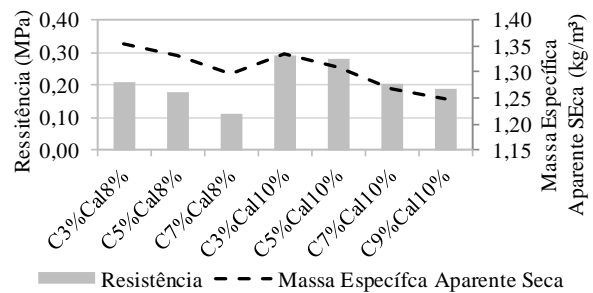
Gráfico 8. RCS x Absorção aos 28 dias



Com o intuito de avaliar a influência da Massa Específica Aparente Seca de moldagem nos resultados dos corpos de prova, foi

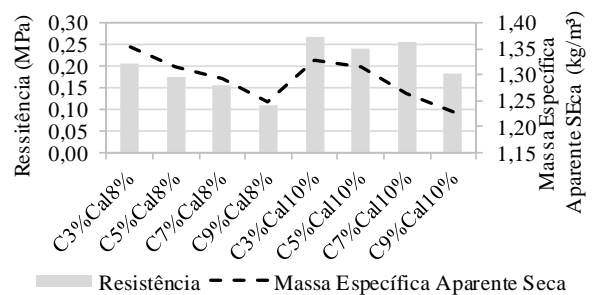
elaborado o Gráfico 9 para tempo de cura de 14 dias.

Gráfico 9. RCS x γ_d aos 14 dias



Os traços no tempo de cura de 14 dias obtiveram aumento de resistência quando a Massa Específica de moldagem foi maior, esse mesmo comportamento pode ser observado no Gráfico 10, ao analisar os traços com tempo de cura de 28 dias.

Gráfico 10. Resistência x γ_d (28 dias)



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos nos ensaios executados da amostra do solo com adição de cal e cinza gerada pela queima de cavaco (cinza de caldeira) pode de concluir que:

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.

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.

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

Agradeço a Celulose Irani pela doação do material para o desenvolvimento da pesquisa, e o Engenheiro Ricardo Bernasconi pelas informações e esclarecimentos no decorrer da pesquisa.

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.

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

DA SILVA, Mateus Justino. **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.

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.

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.

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.