

Utilização de Cinza da Casca de Arroz no Melhoramento das Propriedades Mecânicas de um Solo Não Laterítico da Formação Botucatu

Rodrigo André Klamt

Universidade Federal do Pampa, Alegrete/RS, Brasil, rodrigoklamt@outlook.com

Magnos Baroni

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, Brasil, magnos.baroni@ufsm.br

Jaelson Budny

Universidade Federal do Pampa, Alegrete/RS, Brasil, jaelsonbudny@gmail.com

Luciano Pivoto Specht

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, Brasil, luspecht@ufsm.com

RESUMO: O artigo mostra o ganho de resistência à compressão simples de um solo, não laterítico, estabilizado com adições de cal e cinza da casca de arroz (CCA). A cal é amplamente utilizada na melhoria dos solos, o diferencial é a inclusão de porcentagens de CCA que se encontra no grupo de rejeitos gerados em grande volume e são muitas vezes descartadas de forma inadequada no meio ambiente. A metodologia do trabalho consistiu em estudar e desenvolver um programa experimental de ensaios que permitiu a caracterização do solo extraído de jazida na cidade de Alegrete/RS e o melhoramento das propriedades mecânicas a partir da adição de cal e CCA. Foram realizados ensaios de caracterização, classificação MCT, compactação e resistência à compressão simples (RCS), levando-se em conta também a influência do tempo de cura em 7, 14, 28 e 56 dias das amostras de solo natural e estabilizadas. A estabilização do solo com cal e CCA mostrou-se eficaz, com valores de Resistência à Compressão Simples superiores a 2,1 MPa, viabilizando segundo a NBR 12253/92 a utilização do solo melhorado quimicamente em camadas de base e sub-base de pavimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização de Solos, Cal, Cinza de Casca de Arroz.

1 INTRODUÇÃO

A cidade de Alegrete está localizada no oeste do estado do Rio Grande do Sul, a 506 quilômetros da capital Porto Alegre. Com população de aproximadamente 78.000 habitantes e área de 7.800 quilômetros quadrados, é o maior município em área territorial do estado do Rio Grande do Sul.

O desenvolvimento econômico da cidade requer constantes investimentos em infraestrutura e obras civis, principalmente na malha viária, responsável pelo escoamento da

produção agrícola que é à base da economia da região.

A escassez de materiais locais adequados para utilização em camadas de base ou sub-base de rodovias ou camada de rolamento de estradas vicinais acabam tornando elevado o custo operacional. Dessa forma, surge como alternativa a utilização de solos locais, porém com a aplicação de soluções alternativas, onde se destacam: dimensionar considerando limitações dos solos; substituir o material por outro de melhor qualidade; ou alterar as propriedades do solo com técnicas de

estabilização que confirmam a eles as características técnicas necessárias ao projeto de pavimentação (Núñez, 1991).

A falta de solos com características geotécnicas apropriadas, exigidas pelos órgãos rodoviários para a construção de estradas, torna-se um dos grandes desafios para o setor de transportes no Brasil. Os volumes maiores de cargas são transportados, com maior frequência, a distâncias cada vez mais longas e problemáticas, exigindo que as estradas pavimentadas e não pavimentadas, sejam transitáveis em qualquer época do ano (Machado et al., 2003).

Como o tipo de solo é o grande mandatário na avaliação do parâmetro reatividade solo-estabilizante, cresce o interesse em desenvolver estudos de caráter regional para a análise das propriedades mecânicas, particularmente considerando suas aplicações no campo de estradas não pavimentadas ou florestais (Santana et al., 2003).

A principal função do agente estabilizante é o ganho de resistência (compressão/tração) e a manutenção da durabilidade ao longo do tempo; tais fatores estão ligados ao teor estabilizante adicionado, ao tipo de material estabilizado, a massa específica do material compactado e a temperatura de cura do material. O tempo de cura também exerce papel importante, principalmente nas primeiras idades, pois a troca catiônica e a floculação-aglomeração acontecem rapidamente após a adição de cal, em presença da água, sendo chamada de fase rápida (Bhattacharja et al., 2003).

A cal hidratada especial comercial classificada como CH-II, foi utilizada, ela atende aos requisitos impostos pela NBR 7175/2003. Ela é de origem dolomítica com altos teores de cálcio e magnésio, obtida através da calcinação do calcário em fornos com temperaturas entre 900°C e 1000°C. Essa cal foi escolhida por ser produzida e comercializada no estado do RS, tendo um custo inferior à cal calcítica.

A CCA se encontra no grupo de rejeitos gerados em grande volume anualmente e são muitas vezes descartadas de forma inadequada no meio ambiente, sem nenhum critério técnico, ou, ainda, demandam custos elevados relativos

à estocagem e destinação final, gerando um passivo ambiental. Em paralelo, as obras de infraestrutura rodoviária consomem importantes volumes de material o que torna a possibilidade de uso bastante interessante.

A casca de arroz é o mais abundante entre os subprodutos resultantes da produção agrícola e sua deposição final, é um dos maiores problemas existentes nos países produtores. Mais de 100 milhões de toneladas de casca de arroz são geradas no mundo a cada ano. No Brasil são produzidos em torno de 10 milhões de toneladas de arroz e, o Estado do Rio Grande do Sul tem 49,5% de participação nessa produção. Segundo o Instituto Rio Grandense de Arroz (IRGA, 2015) o município de Alegrete produz em média aproximadamente 457.000 toneladas de arroz por ano. Sendo que a cada 4 toneladas de arroz produzido, 1 tonelada é de casca que após ser queimada é reduzida a 200 kg de CCA. Portanto, na cidade de Alegrete são geradas aproximadamente 114.250 toneladas de casca de arroz, reduzidas após a queima para 22.850 toneladas anuais de CCA.

Neste contexto são apresentados resultados de ensaios de caracterização e resistência à compressão simples (RCS) de um solo tipicamente arenoso, não latéutico, coletado em jazida localizada na cidade de Alegrete/RS. As principais características do solo natural são comparadas ao solo melhorado quimicamente com diferentes porcentagens de cal e cinza da casca do arroz.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O solo utilizado na pesquisa foi coletado em jazida localizada na cidade de Alegrete, Estado do Rio Grande do Sul, BR, coordenadas S29°50'15,5'' e W055°46'28,4''. O solo local apresenta coloração avermelhada, textura arenosa e baixo teor de umidade natural. Após ser seco o material coletado foi destorroado, quarteado e passado na peneira n° 40 (0,42mm) para realização dos ensaios de Limites de Atterberg e Peso Específico Real dos Grãos e na peneira n° 4 (4,8mm) para os ensaios de compactação, resistência e granulometria.

A CCA foi cedida pela Cooperativa

Agroindustrial Alegrete Ltda, (CAAL), localizada no município de Alegrete. A queima da casca de arroz no forno não possui temperatura controlada. Segundo Relatório de Ensaio, N° 26305/15.11 realizado pela Econsulting Projetos e Consultoria Ambiental, as cinzas que resultam da combustão das cascas de arroz apresentam uma composição baseada em 96% de sílica, podendo esta apresentar diferentes formas cristalinas ou amorfas. Segundo relatório, a cinza é classificada como resíduo não inerte – Classe II-A da NBR 10004/2004. A cinza é composta por 9,90% de matéria orgânica, 89,60 % de cinzas, umidade igual a 0,5% e pH igual a 8,89%. A CCA possui coloração escura, devido à quantidade de matéria orgânica, porém está livre de impurezas.

Para utilização nos ensaios, visando o aumento da resistência final da mistura solo+cal+CCA, a CCA foi moída para aumentar a área de contato com a pozolana existente no núcleo da partícula (melhorando as reações químicas) e também preenchendo de forma mais satisfatória os vazios do solo (melhoria mecânica). A moagem foi realizada no moinho de abrasão Los Angeles, no qual o material foi deixado 4 horas para perfeita moagem das partículas. Depois de moída, a CCA apresentou granulometria 100% passante na peneira #100.

2.2 Métodos

A mistura dos materiais ocorreu de forma manual. Inicialmente os aditivos (cal e CCA) foram adicionados ao solo para posteriormente ser adicionada água a mistura. As amostras de solo foram preparadas inicialmente com percentagens de 6%, 10% e 13% de cal em relação à massa seca do solo. Em uma segunda bateria de ensaios foi mantido como padrão a percentagem de adição de 10% de cal em relação à massa seca do solo e foram adicionadas as quantidades de 5%, 10% e 15% de CCA em relação à massa seca do solo mais cal – mistura seca.

Os ensaios de caracterização em todos os traços foram realizados logo após a mistura, sem a compactação. Desta maneira se evitou que os resultados tivessem influência da

compactação ou das reações químicas entre partículas. Os ensaios de compactação foram realizados com o cilindro Proctor, com adoção da energia intermediária

Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples nas amostras com 7, 14, 28 e 56 dias de cura úmida. Foram moldados 5 corpos de prova para cada mistura e para cada idade de cura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição granulométrica mostrou que o solo natural e também o solo natural acrescido de aglomerantes são misturas granulares, com menos de 2% de solo passante na peneira # 200. Tomando-se por base os valores do Coeficiente de Não Uniformidade (CNU) e do Coeficiente de Curvatura (CC) fica evidenciado que o acréscimo dos aglomerantes pouco alterou a distribuição granulométrica. A Tabela 1 apresenta os resultados de caracterização.

Verificou-se que os valores máximos de w_L e I_P , foram respectivamente de 25% e 4% e que estão de acordo com as especificações do DNIT 058/2004 - ES e DNIT 143/2010 – ES. Estes órgãos preconizam a utilização do valor de w_L máximo de 40% e I_P máximo de 18%.

Quanto à classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos), segundo norma ASTM-D2487/85, verifica-se que o solo natural e todas as misturas foram classificados como SP, ou seja, areia mal graduada. Segundo a classificação rodoviária, Highway Research Board (HRB), o solo natural e todas as misturas pertencem ao grupo A-2-4 com $IG = 0$ (Índice de Grupo), definido como areno-siltoso de baixa compressibilidade.

Os coeficientes de não uniformidade (CNU) e de curvatura (CC) foram, respectivamente, $CNU < 5$ e $CC < 1$, no solo natural e no solo natural acrescido de cal. As amostras com solo natural+cal+CCA apresentaram valores de CNU menores que 5, porém valores de CC entre 1 e 3, logo, essas misturas podem ser consideradas como solos uniformes e bem graduados.

Tabela 1. Resumo dos ensaios de caracterização

Misturas	G _s (g/cm ³)	S _r (%)	e	w _L (%)	w _P (%)	w _{ótima} (%)	γ _d (mN/m ²)	CC	CNU	# 4 (%)	# 10 (%)	# 40 (%)	# 200 (%)
Solo Natural	2.66	84.00	0.30	16.00	15.00	9.37	20.46	0.94	2.26	100	100	69	2
94% Solo + 6% Cal	2.70	79.00	0.39	19.00	18.00	11.54	19.34	0.90	2.68	100	100	59	1
90% Solo + 10% Cal	2.68	86.00	0.40	20.00	16.00	12.90	19.10	0.92	2.68	100	100	58	1
87% Solo + 13% Cal	2.68	82.00	0.41	19.00	15.00	12.58	18.98	0.94	2.26	100	100	46	1
85% Solo + 10% Cal + 5% CCA	2.65	77.00	0.44	24.00	20.00	12.77	18.41	1.03	2.56	100	100	61	1
80% Solo + 10% Cal + 10% CCA	2.66	70.00	0.54	25.00	21.00	14.03	17.32	1.01	2.73	100	100	62	2
75% Solo + 10% Cal + 15% CCA	2.62	69.00	0.55	24.00	21.00	14.34	16.92	1.13	2.68	100	100	59	1

* G_s - Densidade real dos grãos; S_r - Grau de saturação; e - Índice de vazios; w_L - Limite de Liquidez; w_P - Limite de Plasticidade; γ_d - Massa Específica Aparente Seca; CC - Coeficiente de Curvatura; CNU - Coeficiente de Não Uniformidade; w_{ótima} - Umidade Ótima

Estudos conduzidos por Villibor et al. (2009) mostraram que as classificações tradicionais não são adequadas para diferenciar solos tropicais. Portanto, se torna necessária a caracterização local do solo, e o desenvolvimento de sistemas de classificação regionais, adaptadas as características dos solos locais. A classificação MCT (Miniatura, Compactada, Tropical) tem uma abrangência mais ampla e mais realística, quando aplicada no Brasil, em relação à classificação tradicional ainda em uso.

Com a metodologia MCT, proposta por Nogami, & Villibor (1981), o solo foi classificado como composto por areais siltosas e areias argilosas não lateríticas (NA'). Os solos com adições não puderam ser ensaiados, pois, não seria possível realizar o procedimento das misturas com adições, visto que, o procedimento de classificação considera a curva de densificação em diferentes umidades de compactação e a resistência ao desprendimento do solo imerso em água. Como a resistência do solo com adições tende a mudar ao longo do tempo de cura, por meio de transformações químicas e físicas, teríamos, portanto, resultados que não representariam a real condição da mistura.

Percebe-se na Tabela 1 que a densidade real dos grãos (G_s) apresentou pouca variação dos resultados, ficando entre 2,62 e 2,70 g/cm³. Os menores valores de densidade são das amostras com percentagens de CCA, justificada pelo seu baixo peso específico. As amostras contendo apenas solo e cal apresentaram as maiores densidades.

O índice de vazios aumentou conforme se adicionou cal e CCA, logo, o solo natural era mais compacto se comparado com as misturas estabilizadas. Os resultados comprovam a tendência apresentada pela TRB (1987), a qual afirma que as partículas de solo se tornam mais

floculadas, quando adicionados os novos materiais cimentantes ao solo, logo, o índice de vazios aumenta.

O grau de saturação foi calculado em função da massa específica máxima e da umidade ótima de cada traço estudado. O grau de saturação variou de 79% a 86% para as misturas solo+cal. Já com a adição de CCA percebe-se uma redução no grau de saturação, variando de 69% até 77%, ou seja, a presença da cinza fez com que a mistura apresentasse um menor grau de saturação e que as curvas de compactação não apresentem pico, tendo as umidades ótimas próximas.

Os valores de γ_d e umidade ótima das misturas solo+cal e solo+cal+CCA (Tabela 1) comprovam a tendência apresentada pelo TRB (1987), a qual afirma que a relação teor de umidade - massa específica é alterada na presença de cal no solo, onde o teor de umidade ótima (w_{ótima}) aumenta e a massa específica aparente seca máxima (γ_d) diminui para uma mesma energia de compactação (Figura 1).

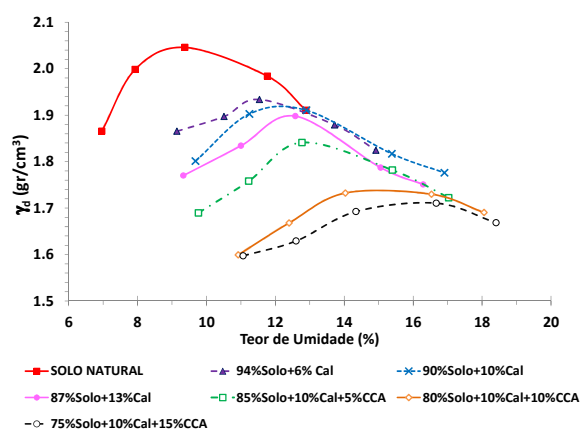


Figura 1. Curvas de Compactação obtidas

A adição de cal e CCA proporcionaram uma redução no peso específico aparente seco máximo e um aumento na umidade ótima de compactação, se comparada com o solo natural.

Fenômeno creditado as partículas de solo, que se tornam mais floculadas, quando adicionados os novos materiais ao solo. O índice de vazios aumenta, o peso específico aparente seco máximo diminui e a nova estrutura floculada se torna mais resistente devido ao efeito do aglomerante.

Na Figura 2 são apresentados os valores médios da resistência à compressão simples (RCS) do solo natural e misturas de solo+cal e solo+cal+CCA curadas por tempos de cura de 7, 14, 28 e 56 dias. Em conjunto com os valores médios é mostrada a respectiva barra de erros com os valores máximos e mínimos encontrados para cada traço. Observa-se que

todas as amostras ensaiadas apresentaram valores bem próximos da média, o que representa uma boa confiabilidade nos resultados obtidos. É ressaltado que para cada traço e idade de cura foram moldados 5 CP's.

A RCS é uma característica muito importante na análise da estabilização de um solo com a cal, logo, também pode ser aplicada para verificar o comportamento do solo quando adicionadas porcentagens de cal e CCA. Os valores de RCS são utilizados na análise de possíveis materiais estabilizados empregados em camadas de pavimentos pelo DNIT.

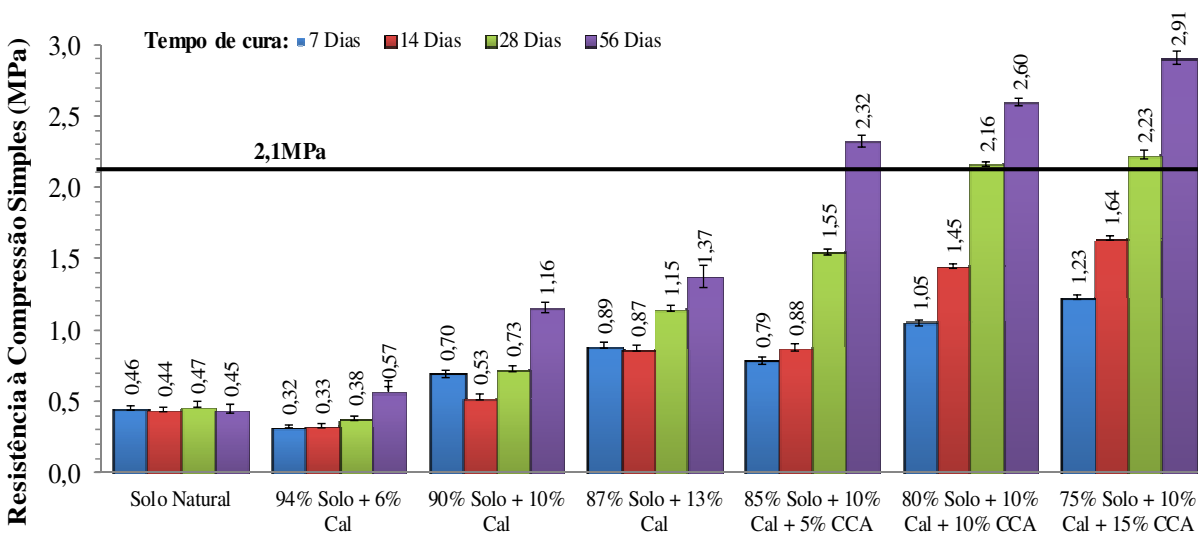


Figura 2. Resistência à Compressão Simples (MPa)

De acordo com as normas NBR 12253/92 e DNIT 143/2010 - ES elaboradas para solo-cimento, a resistência mínima aceitável para utilização deste material como base de pavimentos é 2,1 MPa com 7 dias de cura. A Figura 2 mostra que nos ensaios realizados essa resistência não foi alcançada em nenhum traço aos 7 dias. Porém nas misturas com porcentagens de cal+CCA a RCS aumenta consideravelmente com o tempo e aos 56 dias possui resistência superior a 2,1 MPa. Salienta-se que não existe nenhuma normativa para mistura solo+cal, ou solo+cal+CCA e que é de conhecimento geral que a cal precisa de um maior tempo de cura.

Nas misturas de solo+cal o aumento da RCS não teve um bom desempenho se comparado

com as misturas de solo+cal+CCA. A mistura com 13% de cal apresentou o melhor comportamento, RCS = 1,37 MPa aos 56 dias.

Em contrapartida, nas misturas solo+cal+CCA houve uma taxa de ganho de RCS considerável. A mistura composta por 75% de solo + 10% de cal + 15% de CCA, obteve aos 56 dias o valor de RCS = 2,89 MPa, ou seja, uma resistência 2,10 vezes superior à resistência apresentada pela mistura composta por 87% de solo + 13% de cal. Se comparada com a mistura composta por 90% de solo + 10% de cal, a resistência é em torno de 2,5 vezes superior.

Foi observada uma queda de resistência nos teores de 10% e 13% de cal dos 7 para os 14 dias, voltando a aumentar nos 28 e 56 dias.

Uma das hipóteses que se pode levantar para explicar esse fato baseia-se na possível formação de etringita e taumasita, devido à presença de sulfato no solo, aliados a carbonatação, o que poderia ter inibido a formação dos silicatos e aluminatos hidratados (Sivapullaiah et al., 2000 e Bhattacharja et al., 2003). De acordo com os autores, as reações pozolânicas são modificadas na presença de sulfatos, por meio da combinação do ataque de sulfatos e da carbonatação, além da presença da alumina reativa. Outra hipótese, também levantada por Bhattacharja et al., (2003) é a possível presença de CaCO_3 nas misturas, que contribui para formação de compostos expansivos, prejudicando o ganho de resistência.

Na Figura 3, se comparados os resultados de resistência à compressão simples, aos 56 dias, com os valores de índice de vazios encontrados para o solo natural e para as misturas solo+cal e solo+cal+CCA.

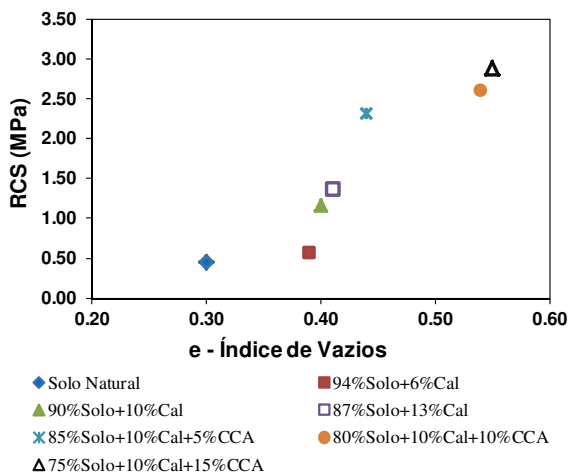


Figura 3. Resistência à Compressão Simples (RCS) vs. Índice de Vazios (e).

Percebe-se que o índice de vazios aumentou conforme se adicionou cal e CCA, tornando as partículas mais floculadas. Com o acréscimo das porcentagens de cal o índice de vazios passou de 0,30 (solo natural) para 0,41, já a RCS aumentou em até 14,60%. As amostras com porcentagens de Cal+CCA o índice de vazios passou de 0,30 para 0,55, assim, apesar do aumento do índice de vazios, há um ganho de resistência muito significativo, de 59,51 %, devido à cimentação entre as partículas.

4 CONCLUSÕES

A análise dos resultados apresentados permite concluir que nenhum dos teores alcançou aos 7 dias a resistência à compressão simples mínima exigida pelas normas NBR 12253/92 e DNIT 143/2010 - ES ($\text{RCS} \geq 2,1\text{MPa}$) para a utilização como camada de base em pavimentos brasileiros. Porém, com o passar do tempo houve um acréscimo na resistência e com 28 dias de cura traços das misturas (solo+cal+CCA) já poderiam ser utilizadas.

A aplicação das porcentagens sugeridas de cal não aumentaram consideravelmente os valores de RCS. Traços com adições de CCA+cal ao solo tiveram resultados mais satisfatórios.

Comprova-se que o emprego de cinza de casca de arroz, em conjunto com a cal, na estabilização de solos arenosos, propiciará significativa melhora nas malhas rodoviárias de regiões produtoras de arroz, logo, se concretiza como uma técnica sócio e economicamente viável, a qual contribuirá para o meio ambiente, empregando um resíduo abundante e reduzindo a exploração de jazidas de recursos não-renováveis, como solos e rochas.

REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials (ASTM). *ASTM D 2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. Philadelphia, 1985.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7175: Cal Hidratada para Argamassas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 2003.
- _____. *NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 2004.
- _____. *NBR 12253: Solo-Cimento – Dosagem para o Emprego como Camada de Pavimento - Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 1992.
- Bhattacharja, S.; Bhatta, J. I.; Todres, H. A. (2003). *Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime – A Critical Review of Literature*. PCA R&D Serial N° 2066, Portland Cement Association, 60 p., Skokie, Illinois, USA.
- Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte - DNIT 058 - ES. *Pavimento Rígido. Execução de Sub-base de Solo-Cimento – Especificações de Serviço*.

- Rio de Janeiro, 2004.
- _____. - DNIT 143 – ES. *Pavimentação. Base de Solo-Cimento – Especificações de Serviço*. Rio de Janeiro, 2010
- Econsulting. Projetos e Consultoria Ambiental Sociedade Simples Ltda. *Relatório de Ensaio N° 26305/15.11*. Viamão/RS, 2011.
- IRGA - Instituto Rio Grandense do Arroz. *Produtividades municipais – Safra 2013/2014*. <Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/conteudo/4215/safras>>, 3 p., 2015. Acessado em 03 jun. 2015.
- Machado, C.C.; Pereira, R.S.; Pires, J.M.M. (2003). *Influência do tratamento térmico do resíduo sólido industrial (grits) na resistência mecânica de um latossolo para pavimentos de estradas florestais*. Revista Árvore, v. 27, n. 4, p. 543-550.
- Nogami, J.S.; Villibor, D.F. (1981). *Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias*. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. Rio de Janeiro - RJ. v.1, pp. 30-41.
- Núñez, W.P. (1991). *Estabilização Físico-Química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC-UFRGS, 150 p., Porto Alegre.
- Sant'anna, G.L. et al. (2003). *Módulo de resiliência de um solo arenoso e de suas misturas com alcatrão fracionado e cal*. Rev. Árvore [online]. Vol.27, n.4, pp. 527-534. ISSN 0100-6762.
- Sivapullaiah, P.V.; Sridharan, A. Ramesh, H. N. (2000). *Strength behavior of lime-treated soil in the presence of sulphate*. Canadian Geotechnical Journal, n.37, p. 1358-1367.
- Transportation Research Board. (1987) *Lime Stabilization, Reactions, Properties, Design and Construction*. Washington, D.C.: TRB, 58 p. (State of the Art Report, 5).
- Villibor, D. et al. (2009). *Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas - 2ª edição*, São Paulo: Arte & Ciência. 196 p.