XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/122

Utilização da Cinza da Casca de Arroz (CCA) como Agente Estabilizante para Solos Arenosos Finos em Palmas-TO

Janaina Lima de Araújo
Doutoranda, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil e Professora Mestre, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, Brasil janaina.araujo@uft.edu.br

Michéle Dal Toé Casagrande
Professora Doutora, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mdtcasagrande@unb.br

Marcus Vinícius Ribeiro e Souza
Professor Doutor, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, Brasil, marcussouza@uft.edu.br

Thais Freitas Zenkner
Doutoranda, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, tfzenkner@gmail.com

RESUMO: Este estudo avaliou o uso da cinza da casca de arroz (CCA) como agente estabilizante em solos arenosos finos de Palmas-TO, com foco em sua aplicação em camadas de pavimentação asfáltica. A casca de arroz, subproduto da indústria arrozeira, quando descartada inadequadamente, gera impactos ambientais relevantes. Sua incineração produz a CCA, resíduo rico em sílica amorfa e com propriedades pozolânicas, que pode ser aproveitado na construção civil. Amostras de solo e CCA foram coletadas, caracterizadas química e fisicamente, e misturadas em proporções de 3%, 5% e 7% para análise de desempenho mecânico. Os ensaios laboratoriais incluíram granulometria, limites de Atterberg, compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC). O solo natural apresentou baixa plasticidade e ISC de 17%. A adição de CCA promoveu melhorias expressivas: 3% resultou em ISC de 83% e 5% atingiu 107%, atendendo às exigências para camadas de base e sub-base. Contudo, a proporção de 7% reduziu o desempenho (ISC de 51%) e apresentou expansão superior a 1%. Os resultados demonstram que a CCA aumenta a resistência do solo por efeito de preenchimento e reatividade da sílica, configurando alternativa sustentável para pavimentação. Estudos adicionais são recomendados para confirmar reações pozolânicas e avaliar o comportamento em diferentes condições geotécnicas.

PALAVRAS-CHAVE: Cinza de casca de arroz; Estabilização de solos; impactos ambientais; Pavimentação rodoviária.

ABSTRACT: This study evaluated the use of rice husk ash (RHA) as a stabilizing agent for fine sandy soils in Palmas-TO, focusing on its application in asphalt pavement layers. Rice husk, a byproduct of the rice industry, generates significant environmental impacts when improperly discarded. Its incineration produces RHA, a residue rich in amorphous silica with pozzolanic properties, which can be utilized in civil construction. Soil and RHA samples were collected, chemically and physically characterized, and mixed in proportions of 3%, 5%, and 7% to assess mechanical performance. Laboratory tests included grain size distribution, Atterberg limits, compaction, and California Bearing Ratio (CBR). The natural soil exhibited low plasticity and a CBR of 17%. The addition of RHA led to substantial improvements: 3% RHA resulted in a CBR of 83%, and 5% reached 107%, meeting requirements for base and sub-base layers. However, the 7% mixture showed reduced performance (CBR of 51%) and expansion above 1%. The findings demonstrate that RHA enhances soil strength through filler effect and silica reactivity, representing a sustainable alternative for pavement construction. Further studies are recommended to confirm pozzolanic reactions and to evaluate performance under different geotechnical conditions.

KEYWORDS: Rice husk ash; Soil stabilization; Road paving

1 INTRODUÇÃO

A discussão sobre a melhoria de solos na construção civil não é uma discussão nova, porém, a busca de novas alternativas e/ou técnicas de melhoria em solos são fundamentais para o desenvolvimento sustentável da sociedade. Para isso, diversas áreas de conhecimento vêm estudando formas de se adequar a esta realidade, inclusive a área rodoviária.

Isto porque o solo natural, por sua complexidade e variabilidade, muitas vezes não atende às exigências geotécnicas de projetos rodoviários. E uma alternativa disponível ao engenheiro geotécnico para viabilizar técnica e economicamente a realização de obras de pavimentação rodoviária sobre solos tecnicamente de baixa qualidade ou inadequado é remover o material existente no local e substituí-lo por outro com características adequadas ou modificar e melhorar as propriedades do solo existente, de modo a criar um novo material com características de resistência e deformabilidade adequadas para ser utilizado na obra.

A esta técnica de modificar e melhorar suas propriedades dá-se o nome de estabilização de solos, prática utilizada desde civilizações antigas. Na sua realização, na maioria das vezes, faz-se a inclusão de outros materiais no solo, como cal, cimento, asfaltos e fibras vegetais ou sintéticas, com a tentativa de aprimorar as características mecânicas da matriz do novo compósito, atribuindo-lhe resistência e rigidez, podendo ocorrer por meio de processos químicos ou físicos, que apresentam como ponto em comum, o aumento dos índices de resistência e a melhora da compressibilidade. O uso desses materiais resulta em compósitos geotécnicos de melhor desempenho, amplamente aplicados na construção civil e em rodovias.

Nesse contexto dependendo de cada região, materiais antes considerados como descartáveis hoje são considerados como alternativas viáveis para o desenvolvimento social de uma determinada população. Fato, não obstante, ocorre no estado do Tocantins cujo perfil econômico é sustentado por uma grande cadeia de produção agrícola que contribui para a geração expressiva de resíduos, dentre os resíduos gerados se insere a casca proveniente da produção de arroz.

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), o Brasil produziu cerca de 10,3 milhões de toneladas de arroz em 2023. O Estado do Tocantins, principalmente na região oeste do Estado, em municípios como Lagoa da Confusão, Formoso do Araguaia, Pium, Dueré e Cristalândia, produziu cerca de 604 mil toneladas de arroz em 2023, consolidando-se como o terceiro maior produtor do país.

A casca de arroz, consiste no principal subproduto da indústria arrozeira, correspondendo a cerca de 23% do total de arroz beneficiado, seu descarte constitui num grave e dispendioso problema ambiental, uma vez que, quando utilizadas pelas indústrias beneficiadoras em processos de cogeração de energia, ou seja, na incineração em usinas geradoras de energia elétrica por exemplo, tem-se a redução de volume deste resíduo, porém, há a geração de um novo subproduto, que são as cinzas de casca de arroz (cerca de 4%).

Não sendo apenas problema particular do Estado do Tocantins, mas a nível nacional, a geração desses resíduos encontra algumas opções comuns para seu destino final, a saber: (i) disposição a céu aberto; (ii) depósito em aterro sanitário; (iii) usina de compostagem; (iv) usina de reciclagem; e (v) usina de incineração. Entre essas opções, as mais utilizadas são a disposição a céu aberto – frequentemente realizada no próprio campo ou lavoura, como forma de adubação – e o depósito em aterros sanitários, no entanto, ambas alternativas ainda contribuem para uma alta emissão de gás metano (CH4), proveniente da casca de arroz, e altamente nocivo ambientalmente.

Pensando de maneira a reduzir esse potencial negativo surge a opção de fazer o uso da casca do arroz como biomassa pelo seu alto grau calorífico fazendo desse resíduo uma nova fonte energética. Todavia, ao queimar a casca é gerada a cinza da casca do arroz (CCA), que por sua vez vem encontrando destino final tanto na indústria agrícola como na construção civil, conforme pode-se observar nos trabalhos de Milani (2005), Santos (2015), Jaines & Arns (2016), Alcantara et al. (2017).

Em particular na construção civil o emprego da CCA decorre do comportamento pozolânico e do alto teor de dióxido de sílica (SiO2) encontrado na sua constituição (Bezerra et al., 2011). Sendo assim, neste trabalho é apresentado um estudo inicial da influência da adição da CCA a um solo típico da região de Palmas -TO quando empregado como material de pavimentação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da pesquisa adotou-se basicamente duas etapas principais, uma primeira etapa se deu na coleta da cinza e observação do processo de queima da casca de arroz e posterior caracterização

química da casca de arroz (CCA). Posterior a essa etapa se iniciou a segunda etapa (experimental) dessa pesquisa que se caracterizou por ser a etapa mais determinante para a avaliação da CCA.

No desenvolvimento do projeto, contou-se com a estrutura do Laboratório de Engenharia Geotécnica & Infraestrutura – LEGI do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Tocantins (UFT) e do Laboratório de Pesquisa em Química Ambiental e de Biocombustíveis – LAPEQ do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins (UFT), que forneceu os recursos necessários à realização dos ensaios de caracterização da CCA e das misturas de solo com CCA.

2.1 A Cinza de Casca de Arroz (CCA)

A cinza de casca de arroz (CCA) foi coletada no município de Palmas – TO, na Cerâmica Santa Fé, na Quadra 512 Sul, Plano Diretor Sul, em quantidade suficiente para análises químicas, físicas e mecânicas. Na Figura 1 é possível observar a dinâmica da produção da CCA na cerâmica e o local de coleta da CCA, do ilustrado pode-se observar que após sofrer a combustão, durante o processo de queima dos blocos cerâmicos, a CCA produzida vai se depositando em forma de pilha no piso forno, próximo a boca de alimentação do forno.



Figura 1. Detalhe do processo de queima e obtenção da CCA

Após obtenção da CCA (in natura), que foi incinerada em temperatura não controlada por cerca de 10 horas, obtida do processo de queima da cerâmica para produção de tijolos, amostras (Figura 2) foram levadas ao LAPEQ para realização da caracterização química (espectroscopia de infravermelho).



Figura 2. Aspecto da cinza de casca de arroz (CCA)

2.2 Coleta de Solo

O solo utilizado no presente estudo, foi coletado de uma vala destinada ao assentamento da rede coletora de esgoto, localizada na Quadra 307 Sul, em frente as Avenidas NS 7 e LO 8 no Plano Diretor do munícipio de Palmas – TO. As coordenadas geográficas são 10°12'13.3"S 48°20'59.2"W.

A amostra de solo foi extraída manualmente com o auxílio de pás e sacos para armazenagem. E posteriormente, o material foi levado para o LEGI, para efetivação dos processos de secagem em estufa, destorroamento e peneiramento da amostra (Figura 3). As quantidades de material das amostras para a

realização de cada ensaio foram preparadas de acordo com a NBR 6457:16 – Amostras de solos: preparação para ensaios de compactação e caracterização.



Figura 3. Amostra do solo em estudo

Para a caracterização do solo foram realizados os ensaios físicos de análise granulométrica (peneiramento e sedimentação), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e massa específica dos grãos sólidos (Gs), obedecendo as diretrizes das normas técnicas vigentes: NBR 6459:1984 – Solo: Determinação do limite de liquidez; NBR 7180:1984 – Solo: Determinação do limite de plasticidade; NBR 7181:1984 – Solo: Análise granulométrica; DNER-ME 093/04 – Solos: Determinação da densidade real. Posteriormente, por meio dos resultados obtidos, foi realizada a classificação do solo segundo HRB (*Highway Research Board*) e USCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos).

2.3 Misturas de solo mais Cinza de Casca de Arroz (CCA)

Posterior a caracterização individual dos materiais se procedeu a elaboração do compósito, misturas de solo mais CCA, nas proporções de 0% (referência), 3%, 5%, e 7% de adição de CCA por peso seco de solo. Posterior a elaboração das misturas, conforme a Figura 4, se avaliou as misturas segundo aspectos de compactação e de capacidade suporte pelo método do índice de Suporte Califórnia (ISC).



Figura 4. Procedimento de mistura do solo + CCA

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização da cinza de casca de arroz

Conforme observado na Figura 5, a seguir, o espectro de infravermelho é característico de SiO2 (sílica), que é o componente majoritário da cinza de casca de arroz (cerca de 90%). A intensidade do pico principal em torno de 1050 cm-1, e a presença de ombros em torno de 790 cm-1 são da sílica amorfa. A ausência ou a baixa intensidade de picos na região de 3000 - 4000 cm-1, e na região de 1400 - 3000 cm-1 indica que a amostra provavelmente tem um baixo teor de umidade com pouco carbono residual.

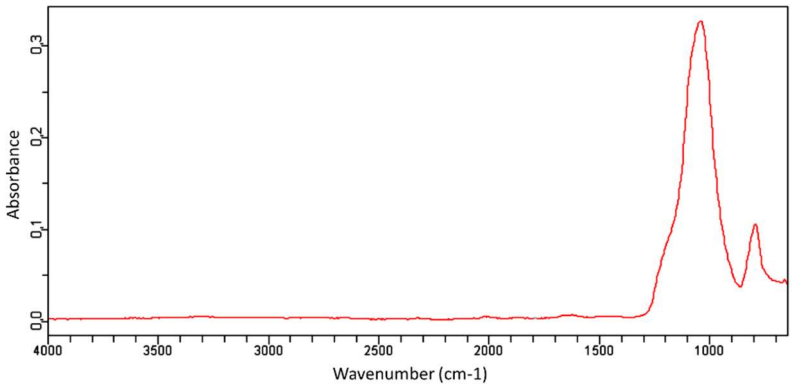


Figura 5. Espectro de infravermelho das cinzas de casca de arroz

Observa-se no espectro que, pico intenso e largo entre 1.000 e 1.100 cm-1 característico do grupo siloxano (Si-O-Si) indica alta concentração de sílica amorfa. E pico em torno de 790-810 cm-1 característico de estiramento simétrico da ligação Si-O-Si, novamente, indicando a presença de sílica em elevada concentração). Por sua vez, pico em torno de 460-470 cm-1 característico de vibração angular da ligação Si-O-Si, novamente, indicando a presença de sílica) e ainda bandas de estiramento das ligações C=O e C=C próximo de 1.610-1680 cm-1 e 1.460 cm-1 característico de -CH3 (indicando presença de carbono residual não queimado).

A combustão da casca de arroz promove a eliminação da matéria orgânica e, na maioria dos casos, resulta em uma cinza com elevado teor de sílica. Entre os resíduos agrícolas mais comuns, a casca de arroz destaca-se por gerar a maior quantidade de cinza, cerca de 20% de seu peso, e por apresentar o mais alto teor de sílica, aproximadamente 83%. Esse elevado conteúdo de sílica confere à cinza propriedades pozolânicas, tornando-a um material de grande potencial para aplicações na construção civil (Del Carpio, 2009).

3.2 Caracterização do solo

As amostras do solo foram objeto de estudo nos seguintes ensaios: Massa Específica dos Grãos do Solo; Limites de Atterberg; Granulometria com e sem defloculante. Dessa maneira, a seguir são apresentados na Tabela 1 os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica e índices físicos para o solo.

Tabela 1. Resumo dos resultados da caracterização do solo e índices físicos

Profundidade da amostra (m)	Peso específico dos grãos γ_s (kN/m³)	Limites de consistência (%)		
		w_P	w_L	IP
1,00	27,0	18,0	22,0	4,0

A análise de granulometria conjunta, foi realizada no processo da sedimentação sem defloculante. Não sendo possível observar a agregação das partículas sem a presença de um agente químico desagregador. Na Tabela 2, são apresentados os valores da composição granulométrica obtidos relacionados à caracterização deste solo.

Tabela 2. Análise granulométrica do solo

Composição granulométrica	Profundidade 1,00 m
	Sem defloculante
Pedregulho	3%
Areia grossa	13%
Areia média	28%
Areia fina	33%
Silte	23%
Argila	0%

Todavia, a partir da curva granulométrica do solo sem defloculante e dos parâmetros de consistência do solo pode-se determinar que o solo é constituído por um material com a predominância da fração arenosa, mas com a presença de frações finas com baixa plasticidade.

Assim, segundo a USCS (*Unified Soil Classification System*) o solo pode ser classificado como sendo um solo tipo SW-SH e segunda a AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials)* como sendo um solo tipo A-2-4. Dessa forma, ao apresentar um baixo Índice de Plasticidade (IP) o solo acaba por garantir uma boa aptidão para seu uso em obras de pavimentação. Aptidão comprovada para a maioria dos solos encontrados no município de Palmas/TO, conforme carta geotécnica proposta por Santos (2000).

3.3 Ensaio compactação e Índice Suporte Califórnia

Para os ensaios de compactação do solo foram elaboradas cinco amostras com umidade crescentes a fim de definir na energia normal, os valores de umidade ótima e peso específico seco máxima. Com os dados umidade e peso específico encontrados de 13,2% e 18,7 kN/m^3, ver Figura 6, foi definido o teor ótimo a ser utilizado como referência para elaboração das misturas Solo+CCA.

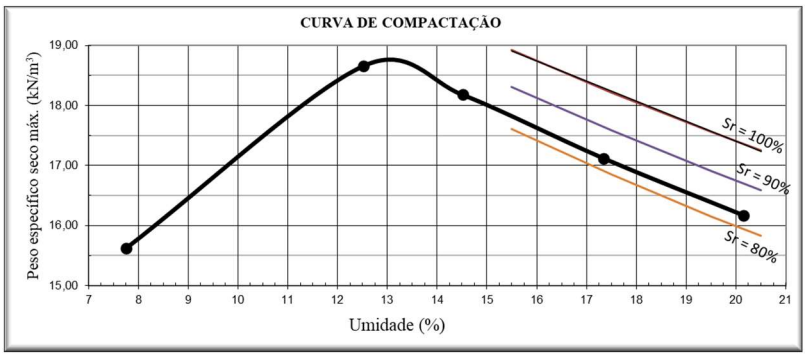


Figura 6 - Curva de compactação do solo natural na energia do Proctor Normal

Ensaios de ISC no solo e nas misturas de solo mais CCA

Ensaios realizados conforme a metodologia estabelecida pela NBR 9895:1987. Para determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e a determinação das percentagens de expansão do solo, com o intuito de verificar se o solo é apto como material para camadas de pavimentação rodoviária.

Primeiramente, foram ensaiados dois corpos de prova (CP's) com o solo em estudo, compactados na energia de compactação normal e com a umidade ótima encontrada no Proctor Normal. Após a compactação os CP's foram submersos no tanque d'água durante 96 horas conforme normativa, para medir a percentagem de expansão.

Na segunda etapa do ensaio foram compactados um conjunto de CP's. Sendo um com o solo em estudo apenas e outros 3 conjuntos do compósito solo + CCA, nas porcentagens em peso de 3%, 5% e 7% de cinza de casca de arroz (CCA). Estes corpos de prova foram compactados na energia de modificada fazendo o uso dos parâmetros de compactação na energia normal na busca pelos melhores resultados que o solo poderia apresentar, por se tratar de solo de características lateríticas, as normativas DER/SP M 196 e DER/PR ES-P 08/05 ressaltam como condições especificas para a utilização de um solo arenoso fino laterítico em camadas de pavimentos a utilização de energias de compactação intermediarias e modificadas para sub-bases e modificadas para base.

Em função disso se adotou a energia de compactação modificada para avaliar o comportamento do solo natural e da mistura solo + CCA quando exposto a condições elevadas de esforço. Após a compactação, os CP's foram colocados em imersão no tanque d'água para medir a porcentagem de expansão do solo e da mistura solo + CCA. Além das 96 horas atendendo a norma, foi adotado um tempo de cura de 7 dias, onde após 96 horas, os CP's ficaram no tanque por mais 3 dias. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

Resultados de expansão

Os resultados apresentados nas Tabela 3 e Tabela 4 mostra os valores de expansão encontrados para o solo com e sem adição da CCA, respectivamente. Na Tabela 4 o solo natural teve expansão inferior a 1%, solo + 3% de CCA e solo + 5% de CCA também tiveram expansão inferior a 1%, atendendo normativas do DNIT, cumprindo assim requisitos em termos de porcentagem de expansão para sub-base e base de pavimentos. Apenas a mistura solo + 7% de CCA foi a única que não atendeu, ficando com expansão > 1%, resultados que devem ser analisados para buscar possíveis alterações que permitam aumentar a porcentagem de CCA na mistura.

Tabela 3 - Tabela do solo compactado com energia de compactação normal, em dois corpos de prova.

Ensaios	**Valores de expansão (%) após 96 horas submerso**
1	0,87
2	0,84
Σ Média	0,86

Tabela 4 - Resultados de expansão do solo natural e solo + CCA com percentagens de 3%, 5% e 7 % de CCA, compactados com energia de compactação modificada.

Ensaio	**Valores de expansão (%) após 7 dias submerso**
Solo	0,70
Solo + 3% CCA	0,17
Solo + 5% CCA	0,79
Solo + 7% CCA	1,29

Resultados do ISC

A seguir são descritos os resultados obtidos para os ensaios de Índice de Suporte Califórnia para amostras de solo com e sem CCA. Após a estabilização com CCA observa-se um acréscimo e/ou uma melhora no desempenho das misturas, como pode ser observado comparativamente entre a Tabela 5 e Tabela 6 os valores de ISC para o solo sem adição passaram de 4,5% para 83% e 107% quando adicionados 3% e 5% CCA, respectivamente. No entanto, para a mistura com adições de 7% de cinza é observado um decréscimo no ISC, que provavelmente indique um teor máximo para adição das CCA para estabilização de solos.

Na Tabela 5 são apresentados os valores de ISC obtidos nos corpos de prova compactados na energia de compactação normal.

Tabela 5 - Valores de ISC em energia normal

Ensaio	**ISC (%) após 96 horas submerso**
1	5
2	4
Σ Média	4,5

A Tabela 6 mostra os valores de ISC obtidos nos corpos de prova compactados na energia de compactação modificada, que passaram por um processo de cura de 7 dias submersos.

Tabela 6 - Valores de ISC em energia modificada

Ensaio	**ISC (%) após 7 dias de cura**
Solo	17
Solo + 3% de CCA	83
Solo + 5% de CCA	107
Solo + 7 % de CCA	51

4 CONCLUSÃO

Este estudo analisou os resíduos da indústria de beneficiamento de arroz, destacando o potencial da cinza de casca de arroz (CCA) como material estabilizante para solos arenosos finos da região de Palmas no Tocantins. Os ensaios mostraram que o solo natural apresenta baixo Índice de Suporte Califórnia (ISC), sendo adequado apenas para subleito. Entretanto, a adição de CCA em diferentes proporções promoveu ganhos significativos de resistência, evidenciando seu potencial para aplicação em pavimentação rodoviária.

Os resultados indicaram que a mistura solo + 3% de CCA atende às normas para uso em bases de pavimento, enquanto a proporção de 5% é adequada para sub-bases e a de 7% apenas para reforço de subleito. Embora a mistura com 5% de CCA tenha apresentado o maior Índice de Suporte Califórnia (ISC), sua classificação normativa para aplicação em pavimentação considera não apenas a resistência mecânica, mas também os critérios de expansão. Nesse sentido, a dosagem de 5% apresentou valores de expansão superiores ao limite estabelecido para camadas de base, restringindo sua utilização a sub-bases. Essa decisão técnica assegura a compatibilidade com os parâmetros normativos, garantindo desempenho adequado da estrutura do pavimento e prevenindo patologias associadas à expansão excessiva.

Apesar da ausência de análises químicas detalhadas que confirmem reações pozolânicas, o aumento da resistência pode ser atribuído ao efeito filler e à reatividade da cinza. Assim, a CCA mostra-se como alternativa promissora para obras de baixo custo, embora sejam necessários estudos complementares para validar seu uso em diferentes condições geotécnicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcantara, M. A. M.; Santos, L. P. dos; Souza, A.; Lima, D. C. de (2017). *Efeito da cinza de casca de arroz na plasticidade e compactação de uma mistura solo-ca*l. Matéria (Rio J.) [online]. 2017, vol.22, n.3, e11875.

Bezerra, I. M. T.; Souza, J.; Carvalho, J. B. Q. de; Neves, G. A. (2011). *Aplicação da cinza de casca do arroz em argamassa de assentamento.* In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.15, n.6, p.639-645, 2011. Campina Grande, PB. UAEA/UFCG. 2011.

Del Carpio, J. A. V. (2009) *Estudo da influência da adição da cinza de casca de arroz nas propriedades do CCR (concreto compactado com rolo) para seu uso em pavimentos compostos.* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC. Florianópolis, SC. PPGEC/UFSC. 2009.

Della, V. P.; Kuhn, I.; Hotza, D. (2001). *Caracterização da cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratário de sílica.* Química Nova, v.24, n.6, p.778-782, 2001.

Freitas, J.E. (2018). *Uso de Cinza da casca de arroz na Estabilização de solos para uso em Pavimento Rodoviário.* Dissertação de Mestrado, Publicação nº 302/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF

Jaines, L.; Arns, P. (2016). *Estabilização de um solo com cinza da casca de arroz para a utilização em camadas de pavimento.* 2016. Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016.

Milani, A. P. S. (2005). *Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento de solo-cal adicionados de casca de arroz*. 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

Santos, S. H. T. (2015). *Análise do comportamento de misturas de solos com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e cinzas de casca de arroz.* Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Santos, L. F. dos. (2000) *Cartografia Geotécnica Regional do Município de Palmas/TO: Área a Oeste do Meridiano 48º W*. Gr.. 2000. 176 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2000.