

Estabilização de solo laterítico utilizando cinza do bagaço da cana de açúcar e cal hidratada

Stabilization of lateritic soil using sugar cane and hydrated calculation

Ricardo Paganelli de Lima¹, Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila Jacintho²,
Nádia Cazarim da Silva Forti², Lia Lorena Pimentel²

¹Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos, UNIFEB, Engenharia Civil, Av. Prof. Roberto Frade Monte, 389, CEP: 14783-226, Barretos, SP, Brasil.

²PUC Campinas, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, CEATEC, Rua Maria Silvestre Adade, 2, CEP: 13086-099, Barão Geraldo, Campinas, SP, Brazil.

Email: ricardo.lima@unifeb.edu.br, anajacintho@puc-campinas.edu.br, nadia.cazarim@puc-campinas.edu.br; lialp@puc-campinas.edu.br

RESUMO

O Estado de São Paulo é referência global no cultivo e na produção de derivados de cana-de-açúcar, nas quais são utilizadas rodovias vicinais, muitas delas não pavimentadas, para o escoamento da safra entre a área da colheita e as usinas de processamento de açúcar e álcool. Para escoar a produção da usina até os centros de distribuição, o transporte rodoviário tem sido o principal meio logístico, tanto do Estado de São Paulo como do Brasil, sendo que apenas 12,4% das rodovias do país são pavimentadas. Além disso, o solo laterítico é o solo mais encontrado em todo o país, sendo frequentemente estabilizados para compor bases e sub-bases de pavimentos, o que eleva os custos das pavimentações. O objetivo desta pesquisa foi estudar a estabilização de um solo laterítico (LA) areia com pouca argila laterítica, utilizando as cinzas da queima do bagaço da cana de açúcar, visando possibilitar sua utilização em camadas de pavimentos. A pesquisa realizada coletou amostras do solo e das cinzas, em usina situada na região de Barretos. Foram realizados ensaios normatizados para caracterização e classificação do solo e da cinza. Foram feitas algumas misturas de solo e cinza – cal, para avaliar a estabilização. Os ensaios realizados mostraram um ganho de resistência CBR (Califórnia Bearing Ratio) do solo natural, que inicialmente tinha CBR 40% e após incorporação de 5% de cinza e 2% de cal atingiu CBR 82%, viabilizando desta forma sua utilização em camadas de base de pavimentação.

Palavras-chave: Estabilização, Solo Laterítico, Bagaço de Cana de Açúcar.

ABSTRACT

Sao Paulo State is a global reference in the cultivation and production of sugar cane derivatives, and side roads, many of them dirt ones, are used to move the crop between the harvesting area and the sugar and alcohol processing plants. To transport the production from the plants to distribution centers, roads have been the main logistics means, not only in Sao Paulo State but also all over Brazil. However, only 12.4% of the roads in the country are paved. Moreover, the lateritic soil is the most common in the country, and it needs to be stabilized to compose bases and sub-bases of pavements, which makes the costs of having roads paved even higher. The objective of this research is to study the stabilization of lateritic soil, using the ashes of the sugarcane bagasse burning, in order to enable its use in layers of pavements. The research carried out collected samples of the soil and the ashes, in a plant located in the region of Barretos. Normative tests were carried out to characterize and classify soil and ash. The gray - lime soil mixture was used to evaluate the stabilization. The results showed a CBR (California Bearing Ratio) gain of the natural soil, which initially had CBR 40% and after incorporation of ash and lime reached CBR 82%, thus making feasible the use in base layers of paving.

Keywords: Stabilization, Lateritic Soil, Sugarcane Bagasse.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma malha viária de 1,72 milhões de quilômetros de rodovias, sendo pavimentadas aproximadamente 213 mil, que corresponde a um percentual de 12,4% de rodovias pavimentadas (CNT, 2018) [15].

A utilização do transporte rodoviário no Brasil, como principal meio logístico para locomoção de produtos e pessoas, torna-se substancial às manutenções e construções de novas vias e nem sempre isso é possível, devido às dificuldades econômicas e soluções técnicas em determinadas regiões.

No Brasil são encontrados diversos tipos de solos, como os arenosos, argilosos, siltosos, mas dentre eles se destacam predominantemente os solos lateríticos. Importante ressaltar que estes solos, muitas vezes, não se enquadram quanto as especificações técnicas para uso em obras [33].

Na busca de soluções para construção de pavimentos de baixo custo, VILLIBOR e NOGAMI [39] desenvolveram técnicas para que se pudesse utilizar o solo natural do próprio local ou misturado com pequena quantidade de agregado, fazendo a base do pavimento e diminuindo seu custo em relação aos custos verificados nas bases tradicionais: macadame hidráulico, brita graduada, solo cimento, etc.

Segundo TEIXEIRA [37] os solos usados em camadas estruturais de pavimentos são extraídos fora do local de construção, causando impactos ao meio ambiente na sua extração e inviabilizando algumas vezes a execução de obras devido à distância, causando aumento significativo nos custos.

Encontrar soluções técnicas e econômicas para diminuir os impactos causados na construção de vias se torna tarefa difícil pois na engenharia, a variedade de solos encontrados é enorme, variando de blocos de pedra dura, densa, grande; a pedregulhos, areias, siltes, argilas, até depósitos orgânicos de turfas compressíveis e moles [38].

Nos livros de NOGAMI e VILLIBOR [39], a estabilização de solos classificados como impróprios para uso em camadas de pavimento é feita utilizando Cal e Cimento como principal estabilizante juntamente com o emprego de estabilização mecânica.

MACHADO *et al.* [28], afirma que a estabilização de solo é feita utilizando técnicas para torná-lo mais resistente aos esforços do tráfego, fazendo com que sua capacidade de suporte aumente e conseqüentemente a durabilidade.

Entretanto, a escassez de materiais naturais e as restrições ambientais trazem uma nova vertente de estudos para melhorar as características dos solos, para seu uso em camadas de pavimento, com o uso de materiais alternativos que possam ser misturados ao solo visando o aumento de sua resistência, seja por reações químicas ou por arranjos granulométricos [28].

O uso das cinzas do bagaço de cana de açúcar vem sendo estudado em diversas áreas da engenharia, buscando substituição total ou parcial de materiais naturais, como confecção de concretos, argamassas, blocos, pavimentos, entre outros.

A adição e mistura da cinza do bagaço de cana de açúcar visa uma substituição parcial da cal, prevalecendo a inserção de maior quantidade de material alternativo, a cinza, para estabilização, para que se possa diminuir o uso desse. O objetivo desta pesquisa foi estudar a estabilização de um solo laterítico (LA) areia com pouca argila laterítica, utilizando as cinzas da queima do bagaço da cana de açúcar, visando possibilitar sua utilização em camadas de pavimentos.

1.1 Características de Solos Para Pavimentos

Os solos, para serem utilizados em camadas de pavimentos, são selecionados por meio de suas propriedades, que são: deformabilidade, permeabilidade e aumento da capacidade de suporte, quando compactados [14].

A Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT através da NBR-9895:2016 [8], diz que o valor do CBR é dado em porcentagem (%), pois reflete a resistência equivalente do solo compactado em relação à rocha de origem (brita).

O solo, para ser utilizado como camada de pavimento, necessita de uma resistência mínima exigida.

O DNIT [21] padronizou a classificação dos solos para uso em camadas de pavimentação, adotando um valor mínimo de CBR. Sendo assim, para que o solo possa compor a camada de subleito, necessita de CBR mínimo entre 2% e 3%; para reforço do subleito deve ter CBR maior que 3%; para sub-base ter CBR mínimo de 20%, sendo recomendado valores maiores que 40%. Para a base, deve ter CBR mínimo de 80%.

Quando o solo natural não atende as exigências mínimas, surge a técnica de estabilização de solo, para que através de misturas de outros materiais, se possa melhorar sua qualidade e desempenho [16].

1.2 Estabilização de Solo

Para HOUBEN e GUILLAUD [27], a estabilização do solo é um processo natural ou artificial que altera as características originais do solo, tornando-o mais resistente à deformações, modificando seu comportamento interno entre as partículas de sólidos e a água, ocasionando ainda a diminuição dos índices de vazios.

A estabilização é um método utilizado frequentemente na engenharia para melhorar as propriedades e características do solo, dividindo-se em: estabilização mecânica; estabilização granulométrica e estabilização (química), com aditivos. [16].

A estabilização, conforme citada por diversos autores como: WINTERKORN e PAMUKCU [40], GUIMARÃES [26], FRANÇA VILLIBOR e NOGAMI [39], DALLA [17], COELHO *et al.* [16], MACHADO *et al.* [28], MOGROVEJO [30], ROCHA e REZENDE [35], PEREIRA *et al.* [32], SANTOS [36], entre outros, busca a utilização do solo local de forma que possa diminuir os impactos ambientais e o custo final do pavimento, com resistência e qualidade.

De acordo com os autores citados, o uso de materiais alternativos pode contribuir para diminuição do uso de recursos naturais para estabilização de solo, mostrando a gama de materiais que podemos utilizar.

1.3 Estabilização de Solo com Materiais alternativos

MOGROVEJO [30], utilizou papel kraft, resíduo reciclado de sacos de cimento, beneficiado em forma de fibra e que foi misturado a um solo argiloso e outro arenoso da região de Campinas – SP, para obter sua estabilização. A análise de seus resultados ele avaliou as resistências dos solos em seus estados naturais e após adição da fibra. Os resultados obtidos mostraram aumento da resistência ao cisalhamento em todas as misturas, principalmente no solo argiloso. O autor concluiu que a utilização do papel Kraft em estabilização de solo é viável.

OGUNRIBIDO [31], utilizou em sua pesquisa a cinza de cana de açúcar, que foi incorporada ao solo como estabilizante. Nas suas misturas ao incorporar cinza ao solo, o CBR do solo, que em média foi de 8%, chegou a ter diminuição de 4% entre as amostras, dificultando o emprego de mais de 4% de cinza do bagaço de cana de açúcar a mistura do solo. Na análise de seus resultados, concluiu-se que a cinza da cana de açúcar é um bom estabilizador quando adicionado teores abaixo de 4%, pois não apresentou características pozolânicas. Isso dificultou o aumento do CBR do solo, no entanto ao incorporar cinza a solos lateríticos ocorreu a melhoria de suas características geotécnicas.

DALLA [17], em seus estudos optou por estabilizar solos com cinza volantes e cal, analisando seu comportamento a resistências a compressão simples. Ao analisar seus resultados observou que as misturas de solo - cinza – cal tem uma boa interação, sendo vistos que as misturas foram deixadas em cura, por 28, 60 e 90 dias, tendo um aumento linear das resistências à compressão simples, viabilizando suas misturas.

MISHRA [29], utilizou para estabilização de solos a cinza volante em seus estudos, misturada com a cal hidratada. Nos estudos, foram adicionados 3% de cal hidratada e 30% de cinza volante em relação à massa de solo, atingindo um CBR de 56%. Ao adicionar 2% de cal hidratada e 30% de cinza volante conseguiu-se um CBR de 48%. Apesar da diminuição do CBR, o ganho de resistência em relação ao solo natural foi de 21 vezes, uma vez que o CBR do solo natural era de apenas 2,3%. Isto possibilitou o uso em sub-bases de pavimentação.

YADAV *et al.* [41], utilizou em seus estudos de estabilização de solo para uso em subleito de estradas, as cinzas da casca de arroz, cinza do bagaço de cana de açúcar e cinza de esterco animal. Para análise de viabilidade foram adicionados à massa de solo porcentagens de 2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 12% das cinzas, individualmente. Concluíram em seus estudos, que as cinzas, principalmente as de casca de arroz e bagaço de cana de açúcar, quando submetidas a melhorias estruturais, como finura e queima adequada, apresentam características cimentantes se tornando bons estabilizadores de solos para subleitos. Já a cinza de esterco não foi considerada um bom estabilizante, mas não se descartou seu uso como estabilizante, recomendando que a ela seja misturado algum aditivo.

Nos estudos feitos por ALAVÉZ - RAMÍREZ *et al.* [12], foi utilizada a cinza do bagaço de cana de açúcar e cal hidratada como estabilizadores químicos de blocos de solos. Foram realizados ensaios de resistências a compressão do solo com 10% de cal, 10% de cimento e a combinação 10% de cal e 10% de cinza do bagaço de cana de açúcar em relação a massa de solo. Os resultados mostraram que a massa específica do solo aumentou conforme foi adicionada a cinza do bagaço de cana de açúcar, sendo encontrados valores de massa específica máxima para solo natural de 1,83 g/cm³, solo com 10% de cimento 1,9 g/cm³, solo com 10% de cal 1,84 g/cm³ e solo com 10% de cinza e 10% de cal 1,67g/cm³. ALAVÉZ - RAMÍREZ *et al.* [12], concluíram que a adição de 10% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em combinação com 10% de cal, melhora significativamente as suas propriedades mecânicas de durabilidade, flexibilidade e resistência à compressão, comparados a blocos preparados apenas com solo e cal. Os autores justificam essa melhora com as reações químicas entre a cal e o solo, e entre a cinza e a cal, devido à existência, mesmo que pequena quantidade, de silicas amorfas contidas na cinza. Deste modo, ela reage quimicamente com os ions de cálcio da cal, formando compostos cimentícios que estabilizam o solo arenoso.

EBEREMU [22], nos seus estudos, para diminuição da infiltração de águas em aterros, utilizou solo laterítico com mistura de cinza do bagaço de cana de açúcar, além de compactação, para diminuir percolação

da água no solo, conseguindo criar uma barreira hidráulica que impediu a contaminação das águas subterrâneas. Para obtenção de seus resultados, a cinza passou por queima entre 500C° e 700C°, sendo submetida a peneiramento (peneira de 75mm) para se ter um material homogêneo e posteriormente misturada ao solo nas proporções de 4%, 8% e 12%, em relação a massa de solo, sendo feitos ensaios de compactação (Proctor) para o solo natural e com as referidas porcentagens. Concluiu-se que a cinza do bagaço de cana de açúcar é um ótimo material para mistura no solo, pois devido sua finura ocupa os vazios do solo e conseqüentemente aumenta sua resistência ao cisalhamento e diminui a infiltração de água.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da pesquisa foram realizados ensaios laboratoriais normatizados para estabilização de solos e os resultados foram comparados com aqueles encontrados na literatura científica.

A pesquisa foi subdividida em etapas: coleta de amostra de solo, classificação da amostra de solo, ensaios mecânicos da amostra de solo, coleta de amostra de cinza de bagaço de cana de açúcar, classificação da cinza do bagaço de cana de açúcar, estabilização da amostra de solo utilizando-se as misturas entre: solo – 5% de cinza, solo – 5% de cinza – 1% cal hidratada e solo – 5% de cinza – 2% cal hidratada de marca conhecida no mercado, finalizando as etapas com testes de propriedades mecânicas

2.1 Coleta da Amostra de Solo

A amostra de solo foi coletada próxima à usina canavieira, situada entre os municípios de Barretos e Guaíra com coordenadas geográficas de localização latitude 20°27'30.65"S e longitude 48°27'43.79"O, sendo visto na Figura 1.



Figura 1: Forma de coleta de amostra de solo.

2.2 Classificação da Amostra de solo

O solo foi classificado segundo as metodologias: Highway Research Board (HRB) ASTM D3282 da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) [13] e MCT (Miniatura Compactada Tropical) DNER-CLA 259/96 [19].

Onde para realizar essas classificações o solo passou pelos ensaios:

- Análise granulométrica segundo a NBR 7181:2016 [5].
- Limite de Liquidez segundo a NBR 7180:2016 [4].
- Limite de Plasticidade segundo NBR 6459:2016 [2].
- Ensaios de Mini – MCV segundo a norma rodoviária DNER-CLA 258/96 [18] e de perda de massa por imersão, segundo a norma rodoviária DNER-CLA 256/96 [20].

Foram preparadas cinco (5) amostras de solo para realizar o ensaio Mini – MCV, após ensaio os corpos de provas foram levados para banheira de imersão para o ensaio de perda de massa por imersão, conforme mostra Figura 2:



Figura 2: Cilindros imersos em água.

2.3 Coleta de amostra de cinza de bagaço de cana de açúcar

A cinza de bagaço de cana de açúcar foi coletada após queima em caldeira da própria usina canavieira, situada na região de Barretos, nas coordenadas geográficas Latitude 20°28'50,09"S e Longitude 48°24'35,15"O.

A queima do bagaço é feita em temperaturas podem chegar a 520°C. O tempo de queima é variável assim como a temperatura, por depender da demanda da safra (material que chega para moagem) e os dias trabalhados na usina.

O bagaço de cana de açúcar, após moagem, é levado à caldeira por esteiras rolantes, sendo que o excedente da moagem é estocado em pátios, conforme mostrado na Figura 3.

As cinzas do bagaço de cana de açúcar foram submetidas ao ensaio de peneiramento, seguindo a NBR – NM 248:2003 [11], para que se pudesse conhecer sua granulometria.

A sua classificação seguiu orientação da NBR 7211:2009 [7].

Após análise granulométrica, a cinza foi preparada para análise de reatividade pozolânica, seguindo orientação da ABNT NBR 5752:2014 [1] e calculada sua massa específica conforme previsto pela NBR 6508:1984 [3].



Figura 3: Corpo de Prova na Prensa.

2.4 Estabilização das Amostras

Após caracterização do solo e da cinza do bagaço de cana de açúcar, seguindo orientação do manual de pavimentação do DNIT-2006 [21], que define os percentuais de aditivos para estabilização de solo, adotou-se os percentuais para mistura em relação a massa de solo natural. Sendo adicionado 5% de cinza do bagaço da cana de açúcar e 2% de cal hidratada.

2.5 Ensaio Mecânico

Os ensaios realizados foram os ensaios padrões básicos para pavimentação:

- Proctor Intermediário seguindo a NBR 7182:2016 [6]
- Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR) que seguiu a NBR 9895:2016 [8].
- Ensaio de Compressão simples que seguiu a norma NBR-12025:2012 [9].

Primeiramente foram moldados cinco (5) corpos de provas para ensaio de Proctor Intermediário, para que se pudesse traçar a curva de compactação e determinar a massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótimo do solo.

Com os pares de valor de massa específica e teor de umidade ótima foi realizado o ensaio de CBR, conforme mostra Figura 4.



Figura 4: Materiais usados no ensaio de CBR.

Para o ensaio de compressão simples, conforme orienta a NBR foram moldados três (3) corpos de provas para o solo natural e três (3) para o solo estabilizado. Foram deixados no período de sete (7) dias em cura, para posterior abatimento, conforme mostra a Figura 5 com o corpo de prova sendo ensaiado.



Figura 5: Corpo de Prova na Prensa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este item apresenta os resultados referentes aos ensaios granulométricos, consistências e ensaios mecânicos, características dos materiais e da mistura do solo estabilizado com 5% de cinza e 2% de cal.

3.1 Caracterização da Cinza do Bagaço de Cana de açúcar

A curva granulométrica obtida pelo ensaio normatizado pela NBR – 7211/2009 [7] tem seus resultados apresentados na Figura 6.

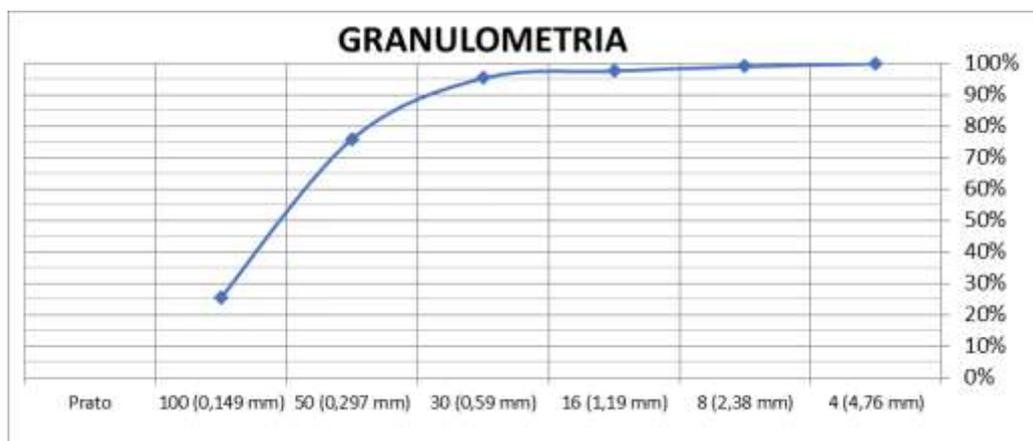


Figura 6: Curva Granulométrica da Cinza utilizada na pesquisa.

De acordo com a curva granulométrica a cinza se mostrou um material de granulométrica muito fina de diâmetro máximo igual a 0,59mm e módulo de finura igual a 1,06 segundo NBR 7211:2009 [7].

Na Tabela 1 serão mostrados os resultados da caracterização pozolânica da cinza do bagaço de cana de açúcar, de acordo com a NBR 5752:2014 [1].

Tabela 1: Caracterização pozolânica da cinza do bagaço de cana de açúcar.

Caracterização da Cinza – Referência – 28dias				
Massa específica = 0,53g/cm ³				
Material	Tensão Mínima (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão
Argamassa com 25% de Cinza	15,64	22,55	18,97	2,31
Argamassa só com cimento	25,85	43,28	32,03	5,91

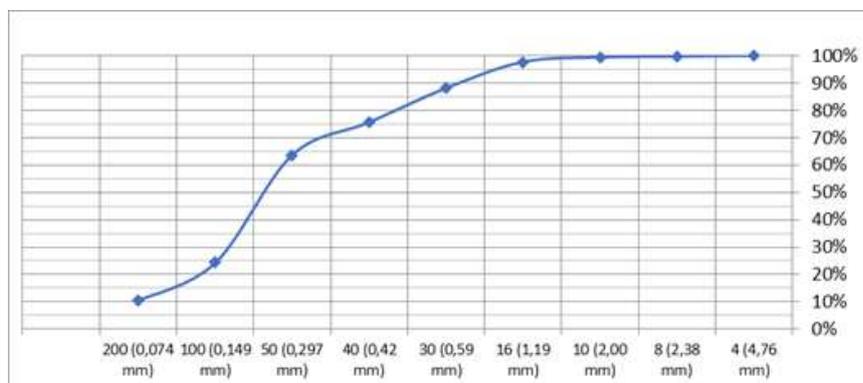
Através das médias das tensões dos traços apresentadas na tabela 1, calculou-se o índice de pozolanicidade da cinza em 59,2%.

Para a caracterização pozolânica da cinza do bagaço de cana de açúcar, os resultados foram insatisfatórios para essa característica, sendo que o índice de pozolanicidade da cinza teria que atingir valor superior a 90% e atingiu somente 56%. Orientação da NBR 12653:2014 [10].

Julga-se que devido a cinza não ter sofrido queima em temperatura constante, como citado nos trabalhos de ALAVÉZ - RAMÍREZ *et al.* [12] e OGUNRIBIDO [31], não ocorreu a formação da sílica amorfa e além disso é necessário que a moagem da cinza seja executada em finura específica para pozolanas. Com isso, para atender as características esperadas, provavelmente haveria a necessidade de padronização da queima e posteriormente moer a cinza para atingir as granulometrias adequadas, como realizado nos estudos de YADAV *et al.* [41] e EBEREMU [22]. No presente estudo, partiu-se do pressuposto de utilizar a cinza conforme saiu da caldeira da usina, sem nenhum tipo de tratamento prévio.

3.2 Características do solo

A Figura 7 apresenta-se a curva granulométrica obtida no ensaio de peneiramento para o solo natural.


Figura 7: Curva Granulométrica do Solo.

A curva granulométrica indica que o solo é bem graduado, com predominância da fração arenosa fina.

Sendo assim, o solo estudado apresenta pequena quantidade de material fino, de 10,62%, que podem ser divididos entre siltes e argilas.

Os limites de consistências são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Caracterização pozolânica da cinza do bagaço de cana de açúcar.

Limites de Consistências	
Limite de Liquidez	41,60%
Limite de Plasticidade	38,19%
Índice de Plasticidade	3,41%

Os ensaios de consistência comprovaram essa pequena quantidade de material argiloso visto no peneiramento, pois seus resultados apresentaram índice de plasticidade de 3,41%, indicando que o solo possui pouca plasticidade.

Através da caracterização do solo, pode-se fazer sua classificação utilizando dois sistemas de classificação voltados para fins rodoviários, HRB e MCT.

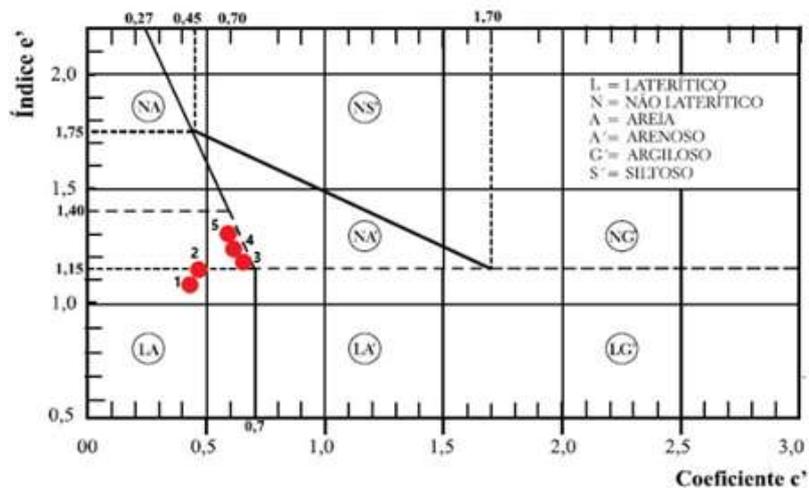
Utilizando dos resultados de caracterização do solo foi classificado como A-2-5(0), solo considerado de bom a excelente para uso em subleitos.

Para classificação MCT utilizou-se os pares de valores do índice e' e coeficiente c' , valores esses calculados seguindo a norma do DNER-CLA 259/96 [20], mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização pozolânica da cinza do bagaço de cana de açúcar.

Solo	A1	A2	A3	A4	A5
Teores de umidade	20%	22%	24%	26%	28%
Coeficiente d'	115,5	124,6	98,5	100	70
Perda de massa por imersão (Pi)	132,6g	139,7g	143,1g	149g	153g
Índice e'	1,14	1,16	1,18	1,19	1,22

Com esses parâmetros a Figura 8 mostra os resultados da classificação MCT.


Figura 8: Classificação MCT.

O solo se enquadrou no quadrante LA de areias lateríticas, sendo classificado como areia com pouca argila laterítica, segundo VILLIBOR e NOGAMI [39] e FRESNEDA *et al.* [24].

3.3 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos realizados, consistem nos ensaios de Proctor Intermediário, CBR e Resistência a Compressão simples.

Para o solo natural os resultados encontrados podem ser observados na tabela 4.

Tabela 4: Resultados dos Ensaio mecânicos do solo Estabilizado.

Ensaio	Unidade (Massa Específica)	Resultado
Proctor Intermediário	g/cm ³	1,68
CBR	%	40
Resistência à Compressão Simples	MPa	0,3
Teor de umidade ótima	%	23

O solo estabilizado com adição de 5% de cinza do bagaço de cana de açúcar e 2% de cal hidratada também foi submetido aos mesmos ensaios, que podem ser vistos na tabela 5.

Tabela 5: Resultados dos Ensaio mecânicos do solo estabilizado com 5% de cinza do bagaço de cana de açúcar e 2% de cal hidratada.

Ensaio	Unidade (Massa Específica)	Resultado
Proctor intermediário	g/cm ³	1,72
CBR	%	83
Resistência à compressão simples	MPa	0,56
Teor de umidade ótima	%	20

Os resultados dos ensaio de compactação obtidos apresentados nas Tabelas 4 e 5 permitem verificar que ocorreu pequena redução de umidade ótima ao se adicionar cinza do bagaço de cana de açúcar e cal hidratada ao solo, sendo que isso também aconteceu nos estudos de ALAVÉZ - RAMÍREZ *et al.*, [12].

A resistência à compressão aumentou ao adicionar cinza do bagaço de cana de açúcar e cal hidratada ao solo, assim como a coesão e consequentemente a resistência ao cisalhamento, indicando o emprego desses materiais no solo como estabilizante, conforme relatado por DALLA [17], visto que este ensaio objetiva analisar a viabilidade da estabilização química.

Para que o solo natural ou estabilizado possa ser usado em camadas de pavimento, deve atender a norma de pavimentação do DNIT 2006 [21], sendo que para uso em bases de pavimentação teriam que atingir CBR de no mínimo 80% e para a sub-base o CBR deve ser superior a 20%, sendo aconselhado 40%.

A mistura solo – 5% cinza – 2% cal fez com que o CBR do solo atingisse valor de 83%, o que representou um aumento de 51,8% em relação ao CBR do solo natural, podendo ser utilizado nas camadas nobres de pavimentação, sub-base e base. Os resultados de resistência a compressão simples e CBR sofrem um aumento de 46,43% e 51,8% respectivamente. Essa diferença ocorre devido um ensaio ser realizado moldando um corpo de prova, desmoldando e posteriormente levado a prensa para ensaio (Resistencia a compressão simples) e o outro moldado corpo de prova e levado a prensa e ensaiado confinado (CBR). Além disso, o ensaio de resistência a compressão analisa o aumento da resistência ao cisalhamento, que por sua vez está ligada a coesão do material, no caso o solo. O ensaio de CBR analisa a capacidade de suporte do material levando em conta a granulometria, dureza e coesão, tendo como referência a rocha de origem (Rocha São CBR 100%). Os resultados foram de encontro com os estudos de ALAVÉZ - RAMÍREZ *et al.* [12] que utilizou a mistura solo – cinza – cal, tornando possível a estabilização do solo laterítico, onde a combinação melhora as propriedades geotécnicas do solo, durabilidade, flexibilidade, aumento da massa específica aparente seca e compressibilidade. Entretanto, neste trabalho utilizou-se um percentual muito menor de cal, de apenas 2%, obtendo-se resultados altamente positivos, ao passo que ALAVÉS-RAMIREZ *et al.* [12] utilizaram 10% de cal em seus trabalhos.

4. CONCLUSÕES

A cinza do bagaço de cana de açúcar, coletada da caldeira sem controle de queima, não possui características pozolânicas, o que se fez necessário a adição de um reagente, no caso a cal hidratada.

Com a adição de 2% de cal ao solo e 5% de cinza do bagaço de cana de açúcar, conseguiu-se estabilizar o solo laterítico, atingindo CBR de 82%, possibilitando uma aplicação nobre desse resíduo, racionalizando o uso de materiais naturais para estabilização de solos.

Deste modo, conclui-se pela viabilidade técnica e ambiental do uso do solo com mistura de 5% de

cinza de bagaço de cana de açúcar e 2% de cal, para bases de pavimentação.

5. AGRADECIMENTOS

À Fundação Educacional de Barretos pelo apoio na execução de alguns ensaios e à PUC Campinas.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. ABNT, 2016.
- [2] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. ABNT, 2016.
- [3] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 6508: Massa específica dos Sólidos. ABNT, 1984a.
- [4] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. ABNT, 2016.
- [5] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. ABNT, 2016.
- [6] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 7182: Solo- Ensaio de Compactação. ABNT, 2016.
- [7] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 7211: Agregados para Concreto. ABNT, 2009.
- [8] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 9895: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de Ensaio. ABNT, 2016.
- [9] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 12025: Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio. ABNT, 2012.
- [10] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 12653: Materiais Pozolânicos - Requisitos. ABNT, 2014.
- [11] ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. ABNT, 2003.
- [12] ALAVÉZ - RAMÍREZ R., MONTES - GARCÍA P., MARTÍNEZ - REYES J., *et al.* The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Construction and Building Materials*. v 34, n 34, p. 296-305, Abr, 2012.
- [13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D-3282-09, Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes, West Conshohocken, PA, 2009.
- [14] BERNUCCI, L.B., MOTTA, L.M., CERATTI, J.A.P., *et al.* Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. 1º edição. Rio de Janeiro, 2006. 504 p.
- [15] CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE (CNT). Disponível em: <http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2018/Rodoviario/1-1-Principais-dados>. Acesso em: out. 2018.
- [16] COELHO, R.V., TAHIRA, F.S., FERNANDES, F., *et al.* Uso de lodo de estação de tratamento de água na pavimentação rodoviária. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil, vol.10, n. 2, (2015).
- [17] DALLA ROSA, A. Estudo dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2009
- [18] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV. DNER-ME 258/94, Rio de Janeiro, 1994.
- [19] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). Classificação de solos tropicais para finalidades viárias utilizando corpos-de prova compactados em equipamento miniatura. DNER-CLA 259/96, Rio de Janeiro, 1996.
- [20] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). Solos compactados em equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. DNER-ME 256/96, Rio de Janeiro, 1994.
- [21] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Manual de Pavimentação. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. 274p.
- [22] EBEREMU, A.O. Evaluation of bagasse ash treated lateritic soil as a potential barrier material in waste containment application. *Acta Geotechnica*. v 8, n. 4, p. 407-421, Fev, 2013.

- [23] FRANÇA, F.C., Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto “RBI GRADE 91”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.
- [24] FRESNEDA C.S., NAVARRO S.S., VALENCIA. Y.G. “Caracterización geotécnica de un suelo tropical laterítico”. INGE CUC, vol. 9, n. 1, p. 219-230, Jun, 2013.
- [25] GAMBILL, D.R., WALL, W.A., FULTON A.J., *et al.* Howard. Predicting USCS soil classification from soil property variables using Random Forest. *Journal of Terramechanics*, v.65, p.85–92, 2016.
- [26] GUIMARÃES, J.E.P. A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil. São Paulo: Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 2002. 341 p.
- [27] HOUBEN, H., GUILLAUD, H.. *Earth construction: a comprehensive guide*. Intermediate Technology Publications, London. 362 p, 1994.
- [28] MACHADO, L.F.M., CAVALCANTE, E.H., ALBUQUERQUE, F.S., *et al.* Adição de uma associação polimérica a um solo argilo-arenoso com vistas à estabilização química de materiais para pavimentos. *Revista Matéria*, v.22, n.3, 2017.
- [29] MISHRA, E.N.K. Strength Characteristics of Clayey Sub-Grade Soil Stabilized with Fly Ash and Lime for Road Works. *Indian Geotechnical Journal*, v 42, n. 3, p. 206-211, Set, 2012.
- [30] MOGROVEJO, D.R.L. Avaliação das propriedades geotécnicas de um solo argiloso e outro arenoso com adição de fibras de papel kraft. 2013. 181 f. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [31] OGUNRIBIDO, T.H.T. Potentials of Sugar Cane Straw Ash for Lateritic Soil Stabilization in Road Construction. *International Journal of Science & Emerging Technologies*, v. 3, n.5, p.102-106, Maio. 2012
- [32] PEREIRA, R.S., EMMERT, F., MIGUEL, E.P., *et al.* Estabilização mecânica de solos como alternativa na construção de estradas florestais de baixo custo. *Revista Nativa*, Sinop, Mato Grosso, v.5, n.3, p.212-2017, 2017.
- [33] PINTO, C.S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3.ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2006.
- [34] REZENDE. M.F., MACHADO, F.C.S., GOUVEIA. A.M.C., *et al.* Substituição parcial do cimento Portland pela cinza de bagaço de cana-de-açúcar em habitações de interesse social. *Revista Agrogeoambiental*, Pouso Alegre, v. 9, n. 1, mar. 2017.
- [35] ROCHA, M.T., REZENDE, L.R. Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. *Revista Matéria*, v.22, n.4, 2017.
- [36] SANTOS, A.L. Caracterização do comportamento mecânico de misturas de solo-escória de aciaria-cinza volante visando a aplicação em pavimentação. 2013. 115 f. Dissertação (Mestrado), UFSJ, - Universidade Federal de São João del-Rei, Minas Gerais.
- [37] TEIXEIRA, I. Estabilização de um Solo Laterítico Argiloso para utilização como camada de. 2014. 103 f. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [38] TERZAGHI, K., PECK, R.B. *Mecânica dos Solos na Prática da Engenharia*. Tradução de A. J. C. Nunes e M. L. C. Campello. 1. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro técnico, 1962.
- [39] VILLIBOR, D.F., NOGAMI, J.S. *Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas: Bases alternativas com solos lateríticos* Gestão de Manutenção de Vias Urbanas. 3. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.
- [40] WINTERKORN, H.F., PAMUKCU, S. Soil Stabilization and Grouting. In: FANG, H. Y (Ed). *Foundation Engineering Handbook*.ed.2. New York, US: Springer, 1991.
- [41] YADAV, A.K., GAURAV, K., KISHOR. R. Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads. *Int J Pavement Res Technol*, v. 10, ed. 3, p. 254-61, maio, 2017.

ORCID

Ricardo Paganelli de Lima

<https://orcid.org/0000-0003-4967-632X>

Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho

<https://orcid.org/0000-0001-5401-2160>

Nádia Cazarim da Silva Forti

<https://orcid.org/0000-0001-9994-5546>

Lia Lorena Pimentel

<https://orcid.org/0000-0001-5146-0451>