

Uso de Misturas Solo-Cinza Têxtil Proveniente de Fornos Cerâmicos em Camada de Sub-Base

Laís Alves Diógenes

Engenheira Civil, Universidade Federal do Ceará, Russas, Brasil, laisdioengenheira@alu.ufc.br

Thiago Fernandes da Silva

Professor, Universidade Federal do Ceará, Crateús, Brasil, thiagofernandes@crateus.ufc.br

Daniela Lima Machado da Silva

Professora, Universidade Federal do Ceará, Russas, Brasil, danielalms@ufc.br

RESUMO: As obras de infraestrutura viária demandam um volume significativo de matéria-prima. Durante a construção de rodovias, nem sempre há disponibilidade de materiais que atendam aos padrões de desempenho em locais próximos. Esta problemática torna urgente a investigação do desempenho de novas matérias-primas nas obras de infraestrutura viária, tais como as cinzas resultantes da queima de resíduos da indústria têxtil. Portanto, este estudo objetivou analisar o desempenho de misturas de solo e cinzas de resíduos têxteis em camadas de sub-base de pavimentos. Foram preparadas três misturas com solo e cinza, com teores de 30%, 50% e 70% de cinza adicionada ao solo, denominadas M30, M50 e M70, respectivamente. Foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, química e mecânica. A partir da caracterização geotécnica, constatou-se que o solo local, a cinza têxtil e as misturas M30 e M50 são classificados como areia fina, enquanto a mistura M70 se classifica como silte. A composição química indicou que as cinzas são constituídas por cálcio, magnésio e silício. Os ensaios mecânicos demonstraram que a adição da cinza têxtil ao solo local aumentou a capacidade de suporte, sendo a proporção com 50% de cinza a mais viável para aplicação como sub-base.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos na Pavimentação, Caracterização Geotécnica, Índice de Suporte Califórnia, Valoração de Resíduos.

ABSTRACT: Road infrastructure projects require a significant volume of raw materials. During the construction of highways, materials that meet performance standards are not always available in nearby locations. This issue necessitates the urgent investigation of the performance of new raw materials in road infrastructure projects, such as the ashes resulting from the combustion of textile industry waste. Therefore, this study aimed to analyze the performance of mixtures of soil and ashes from textile waste in sub-base layers of pavements. Three mixtures were prepared with soil and ash, containing 30%, 50%, and 70% ash added to the soil, designated as M30, M50, and M70, respectively. Geotechnical, chemical, and mechanical characterization tests were conducted. From the geotechnical characterization, it was found that the local soil, textile ash, and the mixtures M30 and M50 are classified as fine sand, while the M70 mixture is classified as silt. The chemical composition indicated that the ashes are composed of calcium, magnesium, and silicon. The mechanical tests showed that the addition of textile ash to the local soil increased the bearing capacity, with the 50% ash proportion being the most viable for application as a sub-base.

KEYWORDS: Waste in Paving, Geotechnical Characterization, California Support Index, Waste Valuation.

1 INTRODUÇÃO

As obras de infraestrutura viária utilizam um grande volume de recursos naturais na produção das camadas constituintes de pavimentos, limitando-se às jazidas para obtenção de materiais primários como solo e brita. Ademais, a disponibilidade de materiais que atendam aos padrões de desempenho nem sempre é garantida nas proximidades das obras, o que resulta em uma divergência entre oferta e demanda. Esse cenário

torna imprescindível a realização de estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental de novas matérias-primas.

A utilização de cinzas na pavimentação, tais como aquelas provenientes do carvão mineral e da combustão da madeira, já é amplamente difundida na engenharia geotécnica. Diversos estudos têm avançado na melhoria das técnicas de emprego desses resíduos. Por exemplo, pesquisas de Zimar *et al.* (2022) e Li *et al.* (2009) afirmam que a aplicação de cinzas volantes do carvão mineral em subleitos aumenta a resistência e resiliência. Em relação às cinzas provenientes da madeira, Dimter *et al.* (2021) indicam que estas podem ser aplicadas em misturas estabilizantes na camada de base, devido à resistência à compressão satisfatória obtida.

Muitos estudos avaliam os impactos ambientais causados pela indústria têxtil, resultando em tentativas de aproveitamento das sobras de tecidos na construção civil. Segundo Yalcin-Enis *et al.* (2019), os resíduos têxteis são geralmente utilizados na produção de isolantes térmicos e acústicos, materiais de construção, reforço em compósitos, conversão em produtos químicos e outras atividades comerciais que aproveitam as propriedades dos resíduos. Na gestão de resíduos têxteis, pode-se realizar a disposição final para recuperação energética, reciclagem, reutilização e redução, embora a maior parte ainda seja destinada a aterros sanitários. Sotayo *et al.* (2015) explicam que a eliminação de resíduos têxteis em aterros resulta na emissão de gases como metano e dióxido de carbono, o que é corroborado pelos estudos de Martins, Silva e Carneiro (2017), que abordam a biodegradação dos resíduos sólidos urbanos.

Uma aplicação menos explorada na literatura é a utilização de restos de tecidos como matéria-prima para combustão em fornos de fábricas de cerâmica vermelha. A queima gera cinzas têxteis que não possuem função comercial, sendo apenas acumulativas. A cinza têxtil obtida desses fornos possui textura semelhante à de um solo arenoso, com coloração que varia entre tons de amarelo e cinza, dependendo do tingimento dos tecidos.

Portanto, este estudo visa analisar a viabilidade de incorporação de misturas de solo e cinza têxtil em camadas de sub-base, com base nos critérios do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), ampliando assim a variabilidade de matéria-prima na infraestrutura viária a partir de materiais residuais.

2 METODOLOGIA

Foram realizadas as coletas e preparações das amostras de um solo local (SL) e cinza têxtil (CT). O solo analisado foi coletado de uma estrada vicinal, e a cinza têxtil foi proveniente da queima de tecidos de redes em fornos de uma fábrica de cerâmica vermelha. A coleta de solo e de cinza ocorreu na cidade de Russas - CE, município que dista 170 km de Fortaleza - CE. A mistura entre os dois materiais foi elaborada em diferentes proporções referentes ao teor de cinza têxtil, 30%, 50% e 70%, denominadas M30, M50 e M70, respectivamente, para que o comportamento mecânico da cinza fosse melhor analisado.

Os ensaios de caracterização geotécnica, química e mecânica foram executados. Vale salientar que os ensaios foram realizados nas dependências físicas do Laboratório de Construção Civil (LCC) e do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LAMSP), ambos pertencentes à Universidade Federal do Ceará (UFC) no Campus Russas. Com os experimentos, foi possível analisar a empregabilidade da cinza têxtil proveniente de fornos cerâmicos para fins de pavimentação, sendo os primeiros estudos na literatura sobre esse tema.

2.1 Caracterização geotécnica

Na caracterização geotécnica foram determinados os seguintes parâmetros: umidade higroscópica, limites de Atterberg, granulometria e densidade real.

2.1.1 Umidade Higroscópica

O ensaio de umidade higroscópica foi realizado de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a) - Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

2.1.2 Limites de Atterberg

Os ensaios de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) foram realizados, respectivamente, de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 2016b) - Solo - Determinação do Limite de Liquidez, e NBR 7180 (ABNT, 2016c) - Solo - Determinação do Limite de Plasticidade.

2.1.3 Granulometria por peneiramento e sedimentação

Os ensaios de peneiramento grosso, fino e sedimentação foram realizados conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016d) - Solo - Análise Granulométrica.

2.1.4 Densidade Real dos Grãos

A densidade real foi realizada segundo a ME 093 (DNER, 1994a) - Solos - determinação da densidade real.

2.2 Caracterização química

Para a caracterização química executaram-se os ensaios de teor de matéria orgânica e espectrometria de Fluorescência de Raios - X.

2.2.1 Teor de Matéria Orgânica

O ensaio foi executado conforme o método, de 2017, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa).

2.2.2 Espectrometria de Fluorescência de Raios - X

O equipamento usado para a realização do FRX foi o ZSX Mini II – Rigaku.

2.3 Caracterização mecânica

Para esta caracterização, foram realizados ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia nas amostras de solo local, cinza têxtil e suas respectivas misturas. As metodologias seguiram as diretrizes do ME 129 (DNER, 1994b), que trata da compactação de solos utilizando amostras não trabalhadas, e da norma ME 049 (DNER, 1994c), que aborda a determinação do Índice de Suporte Califórnia em solos, utilizando amostras deformadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Umidade Higroscópica

O ensaio de umidade foi realizado para as amostras de solo local, cinza têxtil, e misturas M30, M50 e M70. Os resultados encontram-se dispostos na Tabela 1.

Tabela 1. Umidade higroscópica SL, Ct, e misturas M30, M50 e M70.

Umidade higroscópica (%)				
SL	Ct	M30	M50	M70
0,52	0,67	0,61	0,58	0,68

Entende-se que quanto menor a umidade higroscópica, menor é a capacidade de retenção de água, devido à predominância da fração arenosa presente na composição granulométrica. Ademais, apesar de a

umidade ter aumentado com o incremento da cinza têxtil, o material continua apresentando baixa retenção de água, o que é ideal para sua função como sub-base de pavimento.

3.2 Limites de Atterberg

Com a obtenção desses limites, concluiu-se que o solo local, a cinza têxtil, e as misturas M30, M50 e M70 são não plásticos e não líquidos. Logo, o índice de plasticidade (IP) é zero, já que sua obtenção resulta da diferença entre o LL e o LP. Entende-se que um material com baixos valores de plasticidade e liquidez apresentam menor deformabilidade e trabalhabilidade, aspectos adequados na pavimentação.

3.3 Granulometria

A partir da granulometria, limites de Atterberg e índice de grupo, foi possível classificar o solo, a cinza têxtil e as misturas utilizando a classificação do TRB, como consta na Tabela 2.

Tabela 2. Classificação TRB das amostras SL, Ct, e misturas M30, M50 e M70.

Descrição	CLASSIFICAÇÃO TRB				
	SL	Ct	M30	M50	M70
% passante na peneira 2,0 mm	89,822	93,334	91,015	92,375	91,648
% passante na peneira 0,42 mm	71,229	67,511	55,239	70,092	69,832
% passante na peneira 0,075 mm	23,128	30,453	24,974	28,228	36,797
IP (%)	0	0	0	0	0
Classificação	A-3	A-3	A-3	A-3	A-4
Denominação	Areia fina	Areia fina	Areia fina	Areia fina	Silte

Assim, o solo local, a cinza têxtil e as misturas M30 e M50 são classificados como areia fina, enquanto a mistura M70 é classificada como silte. Além disso, observa-se um aumento na quantidade de finos com a incorporação da cinza têxtil ao solo. Adicionalmente, o índice que reflete o aspecto de plasticidade e graduação das partículas, conhecido como índice de grupo (IG), deve ser zero para a aplicação do material em camadas de sub-base, conforme especificações do DNIT (2006). Segundo a classificação do TRB, apenas a mistura M70 não pode ser empregada como sub-base devido a um IG de 7.

3.4 Densidade Real dos Grãos

Os resultados obtidos de densidade real para o solo local, a cinza têxtil e as misturas estão ilustrados na Tabela 3.

Densidade real dos grãos				
SL	Ct	M30	M50	M70
2,56	2,73	2,82	2,67	2,64

Tabela 3. Densidade real do SL, Ct, e misturas M30, M50 e M70.

Percebe-se que a cinza têxtil teve uma densidade real maior que o solo local. Além disso, vale ressaltar que ao analisar as misturas M30, M50 e M70, percebe-se que os valores de densidade real diminuíram com o aumento do teor da cinza têxtil.

3.5 Teor de Matéria Orgânica

Os resultados encontrados para o teor de matéria orgânica do solo local e cinza têxtil estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Matéria orgânica do SL e Ct.

Teor de matéria orgânica (g/kg)	
SL	Ct
25,79	79,68

Segundo os resultados apontados por Sobral *et al.* (2015), o teor de matéria orgânica do solo local é considerado médio, possivelmente devido à presença de vestígios de vegetação rasteira na amostragem do solo. Por outro lado, a cinza têxtil apresenta um teor elevado de matéria orgânica, o que pode ser atribuído à presença de impurezas que não foram completamente queimadas no forno cerâmico, devido à irregularidade do processo de queima.

3.6 Espectrometria de fluorescência de Raios - X (FRX)

A Tabela 5 apresenta a análise semi-quantitativa do solo local e da cinza têxtil.

Tabela 5. FRX do solo local e da cinza têxtil.

Elemento	% em massa no SL	% em massa na Ct
Ca	5,64	60,49
Mg	1,83	12,77
Si	61,92	10,80
K	7,26	2,42
Fe	5,19	2,12
Mn	0,00	2,09
Al	16,97	2,05
P	0,00	1,99
Cl	0,00	1,88
S	0,10	1,51
Ba	0,00	0,98
Ti	1,02	0,56
Sr	0,05	0,28
Zn	0,00	0,07
Rb	0,03	0,00

No solo local, observa-se uma predominância de silício em termos percentuais, seguido por alumínio. Essa predominância de silício é provavelmente devida à presença de quartzo no solo, enquanto o alumínio pode estar associado à presença de caulinita. Por outro lado, a cinza têxtil proveniente da queima de tecidos de redes em fornos cerâmicos apresenta elevados teores de cálcio (60,49%), seguido por magnésio (12,77%) e silício (10,8%). Além disso, os demais minerais constituem aproximadamente 15,94% da composição da amostra.

3.7 Ensaio de Compactação

Os resultados de massa específica seca máxima do solo local, cinza têxtil, e misturas M30, M50 e M70 estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Umidade ótima e massa específica seca máxima do SL, Ct, e misturas M30, M50 e M70.

Amostras	Energia de compactação	Umidade ótima (%)	Massa específica seca máxima (g/cm³)
SL	Intermediária	5,8	2,064
Ct	Intermediária	14,3	1,557
M30	Intermediária	8,9	1,883
M50	Intermediária	9,8	1,770
M70	Intermediária	10,4	1,597

Em relação à umidade ótima, foi necessário adicionar mais água para atingir a densidade máxima na cinza pura e na mistura M70, ou seja, com o aumento da quantidade de cinza têxtil na mistura, maior foi a umidade ótima, resultando em um padrão proporcional entre cinza e umidade.

Além disso, a Tabela 6 mostra que o aumento do teor de cinza têxtil na mistura reduz a massa específica aparente seca máxima, confirmando o mesmo comportamento observado por Farias (2005) ao analisar o comportamento mecânico de misturas de cinzas pesadas em solo não laterítico argiloso para aplicação em pavimentos.

3.8 Índice de Suporte Califórnia (CBR)

Os resultados da expansão e CBR das amostras estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Expansão e CBR do SL, Ct, e misturas M30, M50 e M70.

Amostras	Expansão (%)	CBR (%)
SL	0,1	36,2
Ct	0,1	49,8
M30	0,1	37,1
M50	0,1	40,1
M70	0,1	58,6

Percebeu-se que o solo local, a cinza têxtil e as misturas M30, M50 e M70 atenderam aos valores estabelecidos para a expansibilidade e CBR. Em relação aos valores estabelecidos pelo DNIT (2006) para a classificação TRB, as amostras do grupo A-3 satisfizeram esses valores de CBR, sendo que a mistura M50 ultrapassou ligeiramente o valor limite de 40%. Já a mistura M70, classificada como A-4, apresentou um CBR significativamente superior ao valor máximo estabelecido para o grupo. Portanto, é importante destacar que

há resultados da cinza têxtil que se diferenciam dos parâmetros normativos, o que pode ser atribuído à falta de uma caracterização específica para as cinzas.

Além disso, segundo Farias (2005), as misturas solo/cinza pesada proporcionaram melhorias geotécnicas no solo, aumentando a capacidade de suporte e reduzindo a expansibilidade. Apesar de ter aumentado a resistência do solo, a cinza têxtil não reduziu a expansão. Assim sendo, como já mencionado anteriormente, os ensaios de caracterização do solo podem não ser adequados para explicar o comportamento de expansão da cinza têxtil em contato com a água. Portanto, levando em consideração o CBR, a expansão e o índice de grupo, a mistura M50 é a mais adequada para ser incorporada como camada de sub-base, pois atendeu a esses parâmetros e apresentou maior capacidade de suporte entre as misturas analisadas.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos a partir da caracterização geotécnica, química e mecânica indicam que a cinza têxtil se comporta como areia fina segundo a classificação do TRB. Como típico de materiais granulares, essa cinza é não líquida e não plástica. Além disso, a cinza apresentou uma umidade ótima de 14,3%, com massa específica aparente seca máxima de 1,557 g/cm³, expansibilidade de 0,1% e CBR de 49%. O aumento na proporção de cinza têxtil nas misturas com o solo resultou em uma redução da massa específica aparente seca máxima, além de demandar um aumento nos valores de umidade ótima. As misturas mantiveram uma expansibilidade de 0,1%, porém a capacidade de suporte aumentou com a adição de cinzas, resultando nos seguintes valores de CBR para as misturas M30, M50 e M70: 37%, 40% e 58%, respectivamente.

Apesar da mistura M70 apresentar a maior capacidade de suporte, não é adequada para aplicação como sub-base devido ao Índice de Grupo dessa mistura ser igual a 7, o que não está em conformidade com os requisitos estabelecidos pelo DNIT (2006). Portanto, a mistura M50 demonstra ser a mais apropriada para emprego como camada de sub-base em pavimentos.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Geotecnia Ambiental e Gestão de Resíduos (Geoamb) da UFC- Russas, à Construtora Samaria, e Cerâmica do Liro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457. *Amostras de solos: preparação para ensaios de compactação e caracterização*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459. *Solo: determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Solo: determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. *Solo: análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 049. *Solos: determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas: método de Ensaio*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 093. *Solos: determinação da densidade real: método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). ME 129. *Solos - compressão utilizando amostras não trabalhadas - método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT (2006). *Manual de Pavimentação Rodoviária*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro.

- Dimter, S.; *et al.*. (2021). Construction of Economical Pavement Structures With Wood Ash. *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*, [S.L.], v. 1202, n. 1, p. 012048. IOP Publishing. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/1202/1/012048> > . Acesso em: 20 out. 2023.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (2017). *Manual de métodos de análises de solo*. 3 ed. Brasília.
- Farias, E. R. (2005) *A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC, 121 p.
- Li, L.; Edil, T. B.; Benson, C. H. (2009). Properties of pavement geomaterials stabilized with fly ash. *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, Lexington, KY, USA.
- Martins, L. O. S.; Silva, L. T.; Carneiro, R. A. F. (2017). *Análise da viabilidade econômica e financeira da implantação de usina de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos no município de Santo Antônio de Jesus – BA*. Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo, v. 2, n. 2, p. 142-166.
- Sobral, L. F; *et al.*. (2015). *Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos*. Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju.
- Sotayo, A.; Green, S.; Turvey, G. (2015). Carpet recycling: a review of recycled carpets for structural composites. *Environmental Technology & Innovation*, [S.L.], v. 3, p. 97-107. Elsevier BV. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2015.02.004> > . Acesso em: 20 out. 2023.
- Yalcin-Enis, I.; Kucukali-Ozturk, M.; Sezgin, H. (2019). Risks and Management of Textile Waste. *Nanoscience And Biotechnology For Environmental Applications*, [S.L.], p. 29-53. Springer International Publishing. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-97922-9_2 > . Acesso em: 20 out. 2023.
- Zimar, Z.; *et al.*. (2022). Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilisation: a review. *Journal of Environmental Management*, [S.L.], v. 312, p. 114926. Elsevier BV. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114926> > . Acesso em: 21 out. 2023.