

AVALIAÇÃO MECÂNICA DO USO DE ESCÓRIA DE ACIARIA PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS SILTOSOS

Pedro Luís da Costa Júnior
Estudante, FEG-UNESP, Guaratinguetá, Brasil, pedro.jr@unesp.br

Prof. Dr. Gabriel Orquizas Mattiello Pedroso
Professor, FEG-UNESP, Guaratinguetá, Brasil, gabriel.pedroso@unesp.br

Prof. Dr. Mariana Ferreira Benessiuti Motta
Professora, FEG-UNESP, Guaratinguetá, Brasil, mariana.motta@unesp.br

RESUMO: A escória de aciaria (EA) é um resíduo proveniente do processo de refino para a produção de aço de alta resistência. De maneira generalizada, é descartada em aterros devido à sua inutilização após a produção do aço. Deste modo, são necessárias grandes áreas para a sua disposição, o que acaba causando um processo contínuo de degradação ambiental. O objetivo deste trabalho é avaliar a estabilização com EA de um solo siltoso da região do Vale do Paraíba, a fim de estudar a possibilidade de sua utilização como substituto ao usual estabilizante químico (cimento e cal). Para tanto, os materiais foram caracterizados de maneira física e mecânica. Os ensaios relativos à parte física foram os de granulometria, peso específico dos grãos, limites de Atterberg e classificação MCT, ao passo que os mecânicos foram os ensaios de compactação e ISC (Índice de Suporte Califórnia). Todos os ensaios mecânicos foram realizados com diferentes teores de EA, sendo 0%, 2,5%, 5% e 7,5%, representantes da massa total de escória mais solo. Descobriu-se que o teor ótimo de EA é de 2,5% a qual permite que o solo triplique o ISC do solo natural que foi de 4.

PALAVRAS-CHAVE: Escória de aciaria, Pavimentação, Estabilização de solos, Materiais de pavimentação.

ABSTRACT: Steel slag (SS) is a residue from high resistance steel production refining. In this manner, its primordial to use expansive areas to its arrangement, so SS is causing a continuous process of environmental degradation. The project's goal is to analyze stabilization from two silty soils of Vale do Paraíba, searching the possibility of this use like substitute to usual chemical binder (cement and lime), contributing that form to ambient environment, because SS is encountered in massive quantities in some discard places. Therefore, the materials have been characterized physically and mechanically. The physical tests were granulometry, specific weight of grains, Atterberg limits and MCT classification, while the mechanical ones were compactation, CBR ("california bearing ratio"). All mechanical tests were realized with different SS contents, being 0%, 1,5%, 2,5%, 5% e 7,5%, that percentage represents SS total mass added to soil, with the goal to encounter the better dosage and to rate SS effect. So, the better dosage encountered was 2,5% EA, that dosage contribute to triplicate CBR's natural soil to 4 to 12.

KEYWORDS: Steel slag, pavementation, soil stabilization, pavementation materials.

1 INTRODUÇÃO

A região de São Paulo é caracterizada pelo domínio geológico de sedimentos e rochas do período pré-cambriano (ígneas e metamórficas). Dentre estes domínios, há grande destaque a predominância de xistos, micaxistos e filitos, tendo também gnaisses em locais mais restritos. Os solos de micaxistos e de gnaisses, da região do Vale do Paraíba, não apresentam facilidade de compactação, como também são pobres como subleito e camadas de pavimento, uma vez que dispõem de baixa capacidade de suporte e alta expansão (Ramos, 2020). Portanto, é imprescindível à pavimentação da região do Vale do Paraíba adotar alternativas para melhorar o solo, para assim, este apresentar características adequadas para utilização. Desta forma, um dos métodos utilizados é a estabilização do solo com ligantes hidráulicos (estabilização química) visando melhorar suas propriedades, como: resistência, deformabilidade e permeabilidade (Medina e Motta, 2015).

Cal e cimento são os ligantes hidráulicos comumente utilizados na estabilização química de solos com baixa capacidade de suporte para subleito de estradas (Ceratti, 1991). Entretanto, o estudo de materiais não convencionais, resíduo de mármore, escória de alto forno, entre outros (NICOLAU et al., 2001; KAWAHASHI et al., 2010; GURBUZ, 2015; HASAN et al., 2016.), mostra-se importante para a redução do consumo dos recursos naturais e contribuir para diminuição de CO₂, visto que a indústria de cal e cimento Portland são grandes responsáveis por essa emissão.

A escória de aciaria (EA) é um resíduo proveniente do processo de refino para a produção de aço de alta resistência. Em geral, a EA é descartada em aterros devido à sua inutilização após a produção do aço. Portanto, são necessárias grandes áreas para a sua disposição, assim, causam um processo contínuo de degradação ambiental (NICOLAU et al., 2001).

Embora a escória de alto forno tenha vasta utilização dentro da construção civil, poucos estudos mostram a aplicação da EA. As primeiras aplicações da EA são da substituição de agregados, entretanto, Montenegro et al. (2013) mostrou que o material apresenta baixa reatividade como ligante, o que pode ser suficiente para a melhoria de solos de baixa capacidade de suporte. Os estudos de Kawahashi et al., (2010) e Brand et al. (2020) avaliaram as características geotécnicas e de suporte de solos argilosos estabilizados com EA e Tran et al. (2010) e Rezende et al. (2022) de solos com comportamento tropical. Os estudos mostraram um ganho de deformabilidade e resistência com a inserção da EA.

A literatura mostra que o uso da EA para estabilização de solos é recente e escasso, principalmente quanto ao comportamento mecânico (módulo de resiliência) do material para diferentes tipos de solos e a evolução do seu comportamento ao longo do seu tempo de cura.

Desse modo, com o presente estudo tem-se por objetivos testar diferentes teores de EA, assim como, definir o seu teor ótimo em função dos parâmetros mecânicos. Contudo, a principal contribuição desta pesquisa é viabilizar a utilização de solos expansivos (saprolíticos, caracterizados pela baixa capacidade de suporte) na pavimentação, utilizando escória, tornando o projeto sustentável, além de auxiliar a região de Cunha-SP no cerne pavimentístico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais ensaiados

O solo siltoso utilizado nesta pesquisa foi coletado em um depósito natural na estrada de Jericó localizada no município de Cunha-SP. A EA foi obtida em um aterro especializado localizado na cidade de Taubaté-SP que recebe o material da produtora de aço, destinando-o ao descarte.

A Figura 1 mostra a granulometria do solo e da escória e a Tabela 1 mostra os parâmetros do solo obtidos nos ensaios realizados. O ensaio granulométrico foi realizado conforme norma NBR 7181/2016, ao passo que os ensaios de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), densidade relativa dos grãos (picnômetro) e classificação MCT seguiram, respectivamente, as normas NBR 6459/2016, NBR 7180/2016, NBR 6458/2017 e DNIT – ME 258/2023.

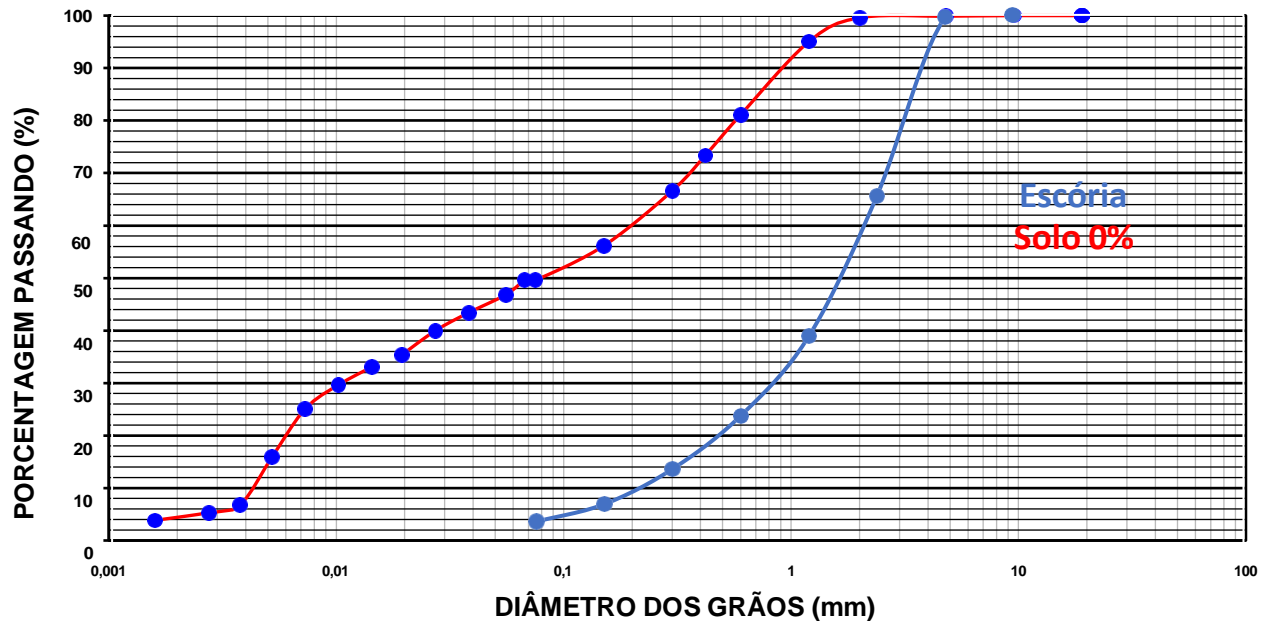


Figura 1. Curva de Distribuição Granulométrica, 2023.

Tabela 1. Parâmetros do solo

Parâmetro	Solo virgem
LL	40,5%
LP	Não plástico
IP	-
Gs	2,64
MCT	NS
Pedregulho	0,4%
Areia grossa	4,1%
Areia média	24,1%
Areia fina	25,6%
Silte	41,4%
Argila	4,4%

2.2 Ensaios realizados

Vale-se ressaltar que a norma ABNT NBR 6547/2016 de preparação de amostras de solo serviu de parâmetro a priori. Desse modo, é de suma importância expor que tanto o solo quanto a escória foram passados na peneira #4 (4,75mm).

As curvas de compactação - massa específica seca máxima versus teor de umidade - do solo, foram obtidas a partir do ensaio de compactação na energia Proctor normal, conforme as recomendações da norma ABNT NBR 7182/2016. A energia utilizada para o ensaio acima descrito foi a normal, além de que, as umidades ótimas e a MEAS (Massa Específica Aparente Seca) foram parâmetros para confecção dos ensaios de ISC (Índice de Suporte Califórnia).

Após a caracterização inicial do solo em estudo, foram testados quatro tipos de misturas nas seguintes proporções de solo adicionado a escória: (I) 97,5% solo e 2,5% EA; (II) 95% de solo e 5% EA; (III) 92,5% solo e 7,5% EA; e (IV) formada de 100% de solo. Essa proporção foi escolhida por abranger os valores de dosagem recomendados pela ABNT NBR 12253/1992.

Para cada uma das misturas contendo diferentes teores de EA, foi realizado o ensaio de compactação. Em seguida, com os dados obtidos, foi possível elaborar as curvas de compactação para o solo natural e as

diferentes misturas de EA, e assim, verificar a influência da EA na umidade ótima e na massa específica máxima do solo.

A partir dos teores ótimos determinados pelas curvas de compactação, os corpos de prova (CPs) para os ensaios mecânicos foram compactados nestes teores e ensaiados de acordo com a norma DNIT-ME 172/2016.

A avaliação dos parâmetros mecânicos de cada mistura foi realizada a partir da determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC), onde para cada teor de EA foram preparados três réplicas de CP's.

Para a determinação do ISC e conseqüentemente da expansão, o material foi compactado dentro de um cilindro metálico de dimensões ($15,24 \text{ cm} \pm 0,05 \text{ cm}$ de diâmetro interno e $17,78 \text{ cm} \pm 0,02 \text{ cm}$ de altura), conforme apresentado na Figura 2, em seguida, obteve-se a expansão durante 3 dias de imersão do cilindro em um tanque preenchido com água. Após a imersão, o cilindro foi levado à ruptura na prensa para a determinação do ISC.



Figura 2. Cilindro de Proctor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após obter a classificação do solo, realizou-se os ensaios de compactação e o ISC. Os resultados da compactação estão expostos na Figura 3. Logo, percebe-se que, para diferentes teores de escória de aciaria (EA), as umidades ótimas não são necessariamente iguais (NICOLAU et al., 2001; KAWAHASHI et al., 2010; MONTENEGRO et al., 2013; HASAN et al., 2016; BRAND et al., 2020; TRAN et al., 2022)

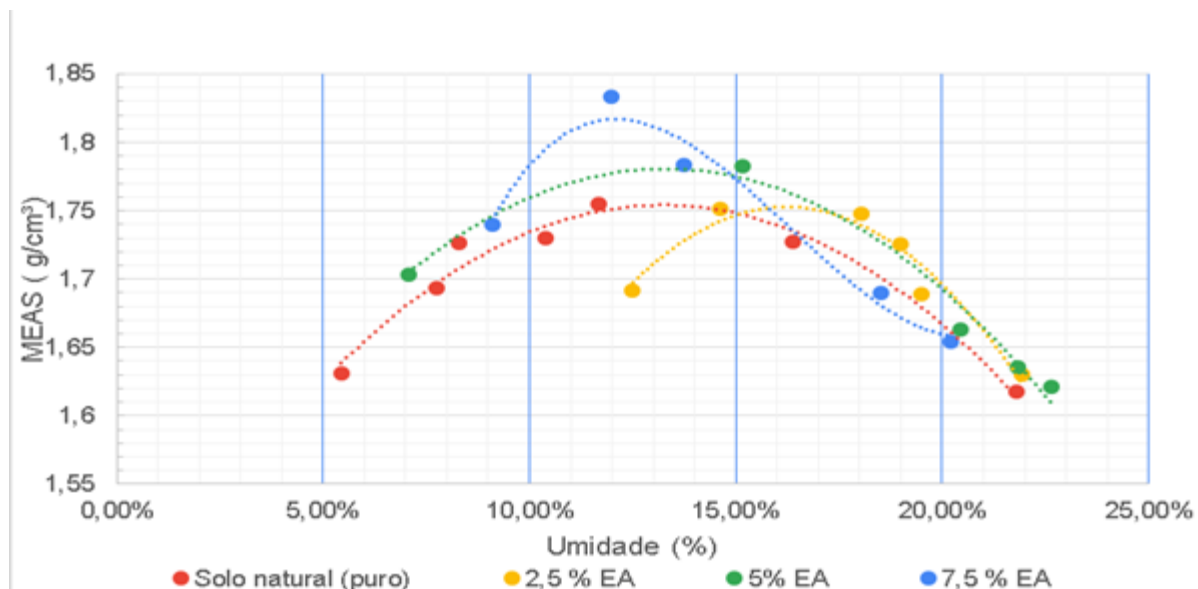


Figura 3. Gráfico de compactação para os diferentes teores, 2024.

Do gráfico acima, tornou-se possível montar uma tabela com os teores ótimos de umidade em % e de MEAS (massa específica aparente seca) em g/cm³. A Tabela 2 contém tais dados.

Tabela 2. Teores ótimos de umidade e MEAS.

Tipo de solo	Umidade (%)	MEAS (g/cm ³)
Solo virgem 0% EA	13,23	1,75
Solo 2,5% EA	16,23	1,75
Solo 5,0 % EA	13,29	1,78
Solo 7,5% EA	13,06	1,80

Percebe-se que a umidade ótima não segue uma tendência, no entanto, a MEAS aumenta conforme o teor de EA aumenta, fato este decorrente da substituição do solo por um material mais denso que este. (NICOLAU et al., 2001; KAWAHASHI et al., 2010; TRAN et al., 2022).

Após a realização da compactação segundo as normas NBR 7182 e NBR 6547, fez-se o ensaio ISC em concordância com a norma de preparação supracitada e da DNIT-ME 172. Dessarte, os resultados obtidos para o ensaio estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3. ISC e expansão (%) para os diferentes teores de EA.

Tipo de solo	Expansão (%)	ISC
Solo virgem 0% EA	1,50%	4
Solo 2,5% EA	0,46%	12
Solo 5,0 % EA	0,45%	6
Solo 7,5% EA	0,23%	4

Um solo com mais de 0,50% de expansão é considerado inadequado para a aplicação como base e sub-base segundo o Manual de pavimentação IPR - 179 do DNIT (2006). Dessa forma, afere-se a partir da tabela 3 que a EA mesmo que em seu menor teor torna o solo menos expansivo e apto à pavimentação, além de diminuir a expansão do solo gradativamente com o aumento de sua concentração (MONTENEGRO et al., 2013; BRAND et al., 2020).

Nesse sentido, pode-se dizer que o teor ótimo de escória é de 2,5%, uma vez que em relação ao ISC natural houve um aumento de 200%, ou seja, de 4 o ISC passou para 12, o que é alto para um teor baixo de produto adicionado. No mesmo cerne, cabe-se ressaltar a viabilidade econômica da aplicação da escória de aciaria para o solo da região em estudo.

Além disso, percebe-se que diferentemente da literatura estudada, o ISC não aumentou gradativamente com o aumento do teor de EA para esse solo NS, sendo a porcentagem ótima de EA igual a 2,5%, o que implica em um menor consumo na melhoria do solo. Entretanto, recomenda-se a análise do Módulo Resiliente e da análise microscópica para averiguar tais suposições.

4 CONCLUSÃO

Destarte, definiu-se o teor ótimo de EA presente no solo, o qual era objetivado pelo presente estudo. Também se viabilizou a aplicação de solos expansivos, de baixa capacidade de suporte, para fins pavimentísticos, introduzindo-lhes escória, com um cerne de sustentabilidade e apoio às regiões brasileiras caracterizadas por solos com essas qualidades, Cunha-SP principalmente.

Em função do solo em estudo ser expansivo e de difícil compressão, o que faz com que ele tenha grande deformabilidade e baixa capacidade de suporte, este se torna inviável à utilização na pavimentação (Ramos, 2020). Somado a isso, a escória nos aterros é um problema ambiental por não ter nenhuma função além de acúmulo, assim, faz-se necessária sua aplicação para que se torne útil, promovendo não só a sustentabilidade como a melhoria do solo no caso deste excerto.

Destarte, conclui-se que a EA tem a função de estabilização de solos siltosos, reduzindo sua expansão e aumentando sua resistência à penetração (NICOLAU et al., 2001; KAWAHASHI et al., 2010; MONTENEGRO et al., 2013; HASAN et al., 2016; BRAND et al., 2020; TRAN et al., 2022).

Além disso, observou-se que o teor ótimo de escória é de 2,5% para o solo supracitado, apresentando umidade ótima de 16,23%, ISC de 12%, MEAS de 1,75 g/cm³ e expansão de 0,46%. Logo, contrariando o obtido anteriormente pelos diversos autores referenciados, a EA não faz com que a resistência do solo aumente gradativamente.

De modo geral, a EA é um ótimo estabilizante para o solo, reduzindo sua expansão gradativamente com o aumento de seu teor no solo e o aumento da MEAS relativo também a essa adição. Sendo assim, é imprescindível sua utilização, no teor adequado (2,5%), à pavimentação da região do solo em estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá – FEG – UNESP (Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho) por conceder acesso aos laboratórios utilizados na pesquisa, e toda a equipe que colaborou com as atividades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. *Análise granulométrica dos solos - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459. *Determinação do Limite de Liquidez - Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR. 6547. *Preparação de amostras de solo para ensaio normal de compactação e caracterização - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182. *Solo–Ensaio de Compactação - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 6458. *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). NBR 12253. *Solo cimento – Dosagem para emprego em camada de pavimento*. Rio de Janeiro.
- BRAND, A. S., Singhvi, P., Fanijo, E. O., & Tutumluer, E. (2020) *Stabilization of a clayey soil with ladle metallurgy furnace slag fines*. *Materials*, 13(19), Article 4251.

- CERATTI, J. A. P. (1991) *Estudo do Comportamento à Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 314.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). DNIT-ME 134. *Pavimentação - Solos - Determinação do Módulo de Resiliência*. Brasília.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2016). DNIT-ME 172. *Solo – Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras não Trabalhadas*. Brasília.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023). DNIT-ME 228. *Solos – Ensaio de compactação em equipamento miniatura – Método de ensaio*. Brasília.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023). DNIT-ME 258. *Solos – Compactação em equipamento miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão – Método de ensaio*. Brasília.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006). IPR – 179. *Manual de pavimentação*. Brasília.
- GURBUZ, A. (2015) *Marble powder to stabilise clayey soils in sub-bases for road construction*. Road Materials and Pavement Design, v. 16, n. 2, p. 481-492.
- HASAN, U. et al. (2016) *Experimental evaluation of construction waste and ground granulated blast furnace slag as alternative soil stabilisers*. Geotechnical and Geological Engineering, v. 34, p. 1707-1722.
- KAWAHASHI, J. et al. (2010) *Estabilização de solos siltosos expansivos de São Paulo com ligantes com elevado teor de escória para pavimentação*. TRANSPORTES, v. 18, n. 2.
- NICOLAU, L. et al. (2001) *Caracterização de escórias com vista à sua utilização em camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários*. Geotecnia, n. 91, p. 85-94.
- MEDINA, J; MOTTA, L. M. G. (2015) *Mecânica dos pavimentos*. 3º. ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ.
- MONTENEGRO, J.M., Celemín-Matachana, M., Cañizal, J., & Setién, J. (2013) *Ladle furnace slag in the construction of embankments: Expansive behavior*. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(8), p. 972–979.
- RAMOS, L. M. (2020) *Estudo das regiões susceptíveis à movimentos de massa no entorno da Rodovia SP-171, trecho de Guaratinguetá-Cunha*. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/11449/202256> >. Acesso em: 13 jul. 2023.
- REZENDE, L. B. et al. (2022) *Influência da utilização de escória de aciaria elétrica primária no módulo de resiliência de solos tropicais*. ANAIS DO XX COBRAMSEG, Campinas.
- TRAN, N. Q. et al. (2022) *Improved mechanical and microstructure of cement-stabilized lateritic soil using recycled materials replacement and natural rubber latex for pavement applications*. Construction and Building Materials, v. 347, p. 128547.