

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

DANIEL PARREIRA SANTANA FREITAS
PEDRO LUÍS DA COSTA JÚNIOR

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS SILTOSOS COM O USO DE ESCÓRIA DE ACIARIA
PARA PAVIMENTAÇÃO

Guaratinguetá - SP
2024



**DANIEL PARREIRA SANTANA FREITAS
PEDRO LUÍS DA COSTA JÚNIOR**

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS SILTOSOS COM O USO DE ESCÓRIA DE ACIARIA
PARA PAVIMENTAÇÃO**

TG (Trabalho de Graduação) apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof. Dr. Gabriel Pedroso Orquizas Mattiello

Coorientador(a): Prof. Dr. Mariana Ferreira Benessiuti Motta

Guaratinguetá - SP

2024

C837e Costa Junior, Pedro Luis da
Estabilização de solos siltosos com o uso de escória de
aciaria para pavimentação / Pedro Luis da Costa Junior ;
Daniel Parreira Santana Freitas. - Guaratinguetá, 2024.
50 f : il.
Bibliografia: f. 45-50

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil –
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e
Ciências de Guaratinguetá, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Pedroso Orquizas Mattiello
Coorientadora: Prof^a. Dra. Mariana Ferreira Benessiuti
Motta

1. Solos - Estabilização. 2. Escória. 3. Pavimentos.
I. Freitas, Daniel Parreira Santana. II. Título.

CDU 624.131.537

**DANIEL PARREIRA SANTANA FREITAS
PEDRO LUÍS DA COSTA JÚNIOR**


**ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS SILTOSOS COM O USO DE ESCÓRIA DE ACIARIA
PARA PAVIMENTAÇÃO**

TG apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil


Data da defesa: 14/11/2024

Banca Examinadora:  Documento assinado digitalmente
GABRIEL ORQUIZAS MATTIELO PEDROSO
Data: 02/12/2024 15:30:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Gabriel Pedroso Orquizas Mattielo
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências - Guaratinguetá

 Documento assinado digitalmente
MARIANA FERREIRA BENESSIUTI MOTTA
Data: 02/12/2024 15:01:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mariana Ferreira Benessiuti Motta
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências - Guaratinguetá

 Documento assinado digitalmente
PAULO VALLADARES SOARES
Data: 02/12/2024 12:52:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Valladares Soares
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências - Guaratinguetá

 Documento assinado digitalmente
PAULO SERGIO DOS SANTOS
Data: 04/12/2024 09:59:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Sérgio dos Santos
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências - Guaratinguetá

Dedicamos este trabalho à Ciência, em busca de um mundo mais justo, ético e sustentável.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, secundamente aos nossos queridos orientadores Gabriel e Mariana pela parceria e orientação nesta jornada. Terceiramente, às nossas famílias, à República Labiryntho e aos amigos e colegas que fizeram parte da nossa graduação.

Eu, Pedro Luís da Costa Júnior, agradeço aos meus professores desde o infantil até a graduação por terem contribuído para a minha formação de alguma forma, sendo, Irene, Simone Fernanda, Rosana, Marcela, Viviane, Kátia, Milena, Lene, Juliana, Ironi, Fabíola, Andréia, Sheila, Alexandre, Karen, Gisele, Wendel, Lívia, André, Silmara, Laura, Raquel, Paulo, Sheron, Mariana, Carmem, Márcio, Cris, Éder, Karina, Paula, José Maria, Júnior, Wilson, Felipe, Fábio, Déri, Marcos, Marisa, Edison, Maurílio, Ivana, Diego, Francielle, Clarissa, Sônia, Sílvia, Joyce, Miguel, Alexandre, Janaína, Fernanda Regis, Ana Cristina, Lilian, Ligia, Renata, Celso, Gabriel, Douglas, João Ubiratan, Amanda, Rodrigo, Victor, Paulo Sérgio, Paulo Valladares, José Ricardo Zeni, Ana Paula, Daniela, Raquel, Emerson, Mariana Motta, Mateus Henrique, Vivian, Thiago Bimestre, Márcia, Grasielle, Lisiane, Olívia, José Cindra, Arminda, Vera Lúcia, Luís Fernando, Isabel, Eduardo Ciapina, Roberto Zenhei, Marisa Andreatta, Mateus Ricardo, Felipe Oliveira, Victor Orlando Gamarra, Thaís Castro, Carlos Zacharias, Miguel Teófilo, José Marques, Fernando César, Silvely Salomão e Roberto Dale Luche. E ao grande amigo e irmão, Daniel Parreira.

Por último, eu, Daniel Parreira, agradeço aos meus professores do CEMPRES Benedito Ferreira Lopes, onde estudei desde a creche até o término do fundamental, são eles: Ana Léia, Gisele, Lucéia, Patrícia Vieira, Rosana, Magda, Bete Blanco, Adriane Lima, Nilcéia Faria, Marilda, Anna Elisabeth, Heide Paz, Célia Regina, Erika Canejo, Erica Caruzo, Célio, Lucia Helena, Edno, Cristina Cotrin, Maurício, Cida Chavedar, Magali, Renan, Márcia, Marisa e Roberta França. Aos professores da ETEC Presidente Vargas que conclui o ensino médio e técnico em mecatrônica: Célia Harume, Mary Takahashi, Paulo Ciaccio, Rafael Lopes, Lucia Cintra, Cintia Akabane, Eduardo Dux, Jonas Souza, Claudio Betzler, Érica Andrade, Ênio, Maira, Sonia Nan, Erly, Bruno, José Cipriano e Daniel. Por fim, aos professores da graduação, agradeço aos mesmos profissionais que meu grande amigo, Pedro Jr, agradeceu.

“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original”
(Albert Einstein, tradução).

RESUMO

Na construção civil, atualmente, medidas de reaproveitamento e reutilização são essenciais nas práticas da profissão. Sendo assim, na pavimentação existem diversos estudos para utilizar materiais não convencionais, como os resíduos, a fim de potencializar as propriedades da estrada. A escória de aciaria (EA) é um resíduo proveniente do processo de refino para a produção de aço de alta resistência, a qual é comumente descartada em aterros. Logo, objetiva-se avaliar a estabilização com EA para dois tipos diferentes de solos da região do Vale do Paraíba que apresentam baixa capacidade de suporte e alta deformabilidade, com o intuito de estudar a possibilidade de sua utilização como substituto ao usual estabilizante químico, visando melhorar os parâmetros citados. 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, classificação Mini Compactada Tropical (MCT), classificação ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) e compactação, ao passo que os mecânicos foram os ensaios de ISC (Índice de Suporte Califórnia), MR (Módulo de Resiliência) e CS (Compressão Simples), sendo executados para os solos I e II. Dessa forma, os solos foram ensaiados com a inserção de diferentes teores de EA, sendo estes 0%, 1,5%, 2,5%, 5% e 7,5%, representando a massa total de escória mais solo. Em suma, os resultados geotécnicos mostraram que os solos são areias siltosas para as três classificações. Quanto aos resultados mecânicos, os solos responderam frente à deformabilidade, havendo reduções significativas com o aumento de EA das misturas, bem como o crescimento da resistência, tendo destaque a mistura de teor 5% para o solo I e a de 2,5% para o solo II, onde era esperado que o teor de 7,5% fosse o melhor para ambos os solos, o que não ocorreu.

Palavras-chave: deformabilidade; escória de aciaria; estabilização de solos; módulo de resiliência; pavimentação.

ABSTRACT

In civil construction, reuse and reuse measures are currently essential in the profession's practices. Therefore, in paving there are several studies to use unconventional materials, such as waste, in order to enhance the properties of the road. Steel slag (AS) is a residue from the refining process for the production of high-strength steel, which is commonly discarded in landfills. Therefore, the objective is to evaluate stabilization with EA for two different types of soils in the Vale do Paraíba region that have low support capacity and high deformability, with the aim of studying the possibility of using it as a substitute for the usual chemical stabilizer, aiming to improve the aforementioned parameters. To this end, the materials were characterized physically and mechanically. The tests relating to the physical part were particle size, grain specific weight, Atterberg limits and MCT classification, while the mechanical tests were compaction tests, ISC (California Support Index), MR (Resilience Modulus) and CS (Simple Compression), being performed for solos I and II. Thus, the soils were tested with the insertion of different EA contents, these being 0%, 1.5%, 2.5%, 5% and 7.5%, representing the total mass of slag plus soil. The geotechnical results showed that both soils are characterized as Silty Sand by the ABNT (Brazilian Association of Technical Standards) classification, as NS(silty non-laterite) by the MCT(Tropical Compacted Miniature) classification and as SF(silty sands) by the SUCS(Unified Soil Classification System). As for the mechanical results, the soils responded to deformability, with significant reductions with the increase in EA of the mixtures, as well as the increase in resistance, with emphasis on the mixture with a content of 5% for soil I and 2.5% for soil II, it was expected that the 7.5% content would be the best for both soils, which was not the case.

Keywords: deformability; paving; resilience module, soils stabilization; steel slag.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação Unificada de Casagrande com Carta de Plasticidade (SUCS)	16
Figura 2 – Ábaco para MCT	18
Figura 3 – Prensa de ensaio de ISC	20
Figura 4 – Como obter a umidade ótima	21
Figura 5 – Da esquerda para a direita: Solo I, Solo II, Escória de Aciaria	24
Figura 6 – Metodologia simplificada	25
Figura 7 – Ensaio de densidade real dos grãos	26
Figura 8 – Ensaio de Sedimentação	27
Figura 9 – Ensaio de Perda de Massa por Imersão	28
Figura 10 – Ensaio de compactação do solo	29
Figura 11 – Ensaio de ISC	30
Figura 12 – Equipamento triaxial de carga repetida	30
Figura 13 – Ensaio de Compressão Simples	31
Figura 14 – Curvas granulométricas com e sem defloculante	34
Figura 15 – Curvas de Compactação	36
Figura 16 – Gráficos de ISC e Expansão	38
Figura 17 – Ensaio de Módulo de Resiliência	39
Figura 18 – Compressão Simples dos solos	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – LL, LP, IP, Gs e MCT dos solos	32
Tabela 2 – Granulometria dos solos e da escória	33
Tabela 3 – Teores ótimos de umidade e massa específica seca máxima para cada mistura	35
Tabela 4 – ISC e expansão (%) para os diferentes teores de EA	37
Tabela 5 – Resultados de par baixo de tensão para diferentes teores de mistura	40
Tabela 6 - Resultados de par alto de tensão para diferentes teores de mistura	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CP	Corpo de Prova
CS	Compressão Simples
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de Raios-X
EA	Escória de Aciaria
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
Gd	Grau de dispersão
Gf	Grau de floculação
Gs	Densidade Relativa dos Grãos
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
kPa	Kilopascal
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MCT	Miniatura Compactada Tropical
MEAS	Massa Específica Aparente Seca
MPa	Megapascal
MR	Módulo Resiliência
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
Prof.	Professor
SF	Areia Fina
SP	São Paulo
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
UNESP	Universidade Estadual Paulista

LISTA DE SÍMBOLOS

CaCl_2	Cloreto de Cálcio
wot	Umidade Ótima
σ_3	Tensão Confinante
σ_d	Tensão de Desvio
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DESENVOLVIMENTO	16
2.1 PROPOSIÇÃO	16
2.2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.2.1 Classificação dos Solos	16
2.2.1.1 Classificação MCT	17
2.2.1.2 Classificação ABNT	18
2.2.2 Avaliação Mecânica dos Solos	19
2.2.2.1 Módulo de Resiliência	19
2.2.2.2 Índice de Suporte Califórnia	20
2.2.2.3 Compactação com Proctor Normal	21
2.2.2.4 Compressão Simples	21
2.2.3 Estabilização de Solos: diferentes materiais e técnicas	22
2.3 MATERIAIS UTILIZADOS	23
2.4 MÉTODOS	24
2.4.1 Caracterização geotécnica	25
2.4.2 Caracterização mecânica	29
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
3.1 GEOTÉCNICOS	32
3.2 MECÂNICOS	36
3.2.1 Índice de Suporte Califórnia	37
3.2.2 Módulo resiliência e compressão simples	39
4 CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	45

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).

Nesse sentido, é imprescindível à pavimentação da região do Vale do Paraíba, adotar alternativas para melhorar o solo, para assim, este apresentar características adequadas para utilização. 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.

Em 2010, a produção mundial de cimento foi de cerca de 3 bilhões e 300 milhões de toneladas (Queiroz, 2018). Cerca de 40% das emissões de gases efeito estufa estão conectadas à indústria da construção civil (WBCSD, 2018), a qual na modernidade é responsável principalmente pela utilização de Cimento Portland (Hernandez et al., 2015). Por isso, são fundamentais os estudos de novos materiais que fomentem a substituição ou alternativa ao CP para atender os objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), como o item de saúde e bem-estar.

Para isso, a introdução de novos meios de estabilização é uma possibilidade para trazer à tona melhorias no quesito ambiental para o cenário atual da Engenharia Civil, sobretudo no que diz respeito à pavimentação. Assim, tendo em

vista que o Brasil é décimo segundo maior exportador de produtos siderúrgicos do mundo (IAB, 2021), algo que requer uma quantidade exorbitante de matérias-primas, bem como produz um acúmulo excessivo de resíduos que não são devidamente aproveitados, é de suma importância a reutilização desses recursos para a promoção da sustentabilidade do futuro.

Diante disso, a escória de aciaria (EA) vem sendo timidamente estudada com o intuito de proporcionar melhorias nos desempenhos mecânicos e geotécnicos dos solos, preenchendo simultaneamente essas lacunas de reaproveitamento dos materiais gerados pela indústria siderúrgica. A EA é um resíduo proveniente do processo de refino para a produção de aço de alta resistência, a qual é comumente descartada em aterros devido à sua inutilização após a produção do aço, necessitando de grandes áreas para a sua disposição que, por vezes, causa um processo contínuo de degradação ambiental (Nicolau et. al, 2001).

Embora a escória de alto forno possa apresentar uma vasta utilização dentro da construção civil, poucos estudos mostram a aplicação da EA. As primeiras aplicações da EA são da substituição de agregados, contudo, Montenegro et al. (2013) mostrou que a reatividade da escória depende do tipo de composição, no entanto ela apresenta potencial de impulsionar a melhoria de solos de baixa capacidade de suporte (Kawahashi et al. 2010). Por conta dessa reatividade variável, os estudos de Brand et al. (2020) avaliaram a utilização de CaCl_2 com o intuito de catalisar a reação de hidratação para transpor essa propriedade. Por outro lado, Lopes et al. (2021) verificou que para solos tropicais houve um ganho de 30-45% no MR, sendo realizada, sem a utilização de catalisador, 7 a 56 dias de cura, do menor para o maior percentual de ganho.

Com relação à catalisação da reação química de cimentação da EA, analisada por Brand et al. (2020) é possível afirmar que a utilização de CaCl_2 (Cloreto de cálcio), a fim de acelerar a reação de hidratação do silicato dicálcico presente na escória, não é efetiva. Ao passo que para Lopes et al. (2021) e Ismail et al. (2019) isso possa ter ocorrido devido ao fato de não ter havido a formação de compósitos cimentícios por conta do solo ensaiado com a escória ser pouco reativo no caso de Brand. Comparando-se dois tipos de solo, para Kawahashi et al. (2010) utilizando um solo siltoso melhorado com cimento e escória, houve um acréscimo de até 1000 pontos percentuais para o MR, ao passo que Brand et al. (2020) ensaiando

um solo argiloso obteve aumentos de até 221 pontos percentuais, essa diferença é explicada pela inserção de cimento.

Assim, 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. Desse modo, o presente estudo tem por objetivo avaliar a introdução de cinco diferentes teores de EA (0%; 1,5%; 2,5%; 5,0%; 7,5%), considerando sua aplicação em dois diferentes solos siltosos (saprolíticos) com baixa capacidade de suporte característico da região de Cunha-SP, mais especificamente da estrada de Jericó.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 PROPOSIÇÃO

Estudar os solos da região de Cunha-SP com o intuito de melhorá-los para fins pavimentísticos por meio da inserção de escória de aciaria, resíduo da produção de aço que ocupa grandes porções de terra em aterros sanitários.

2.2 REVISÃO DE LITERATURA

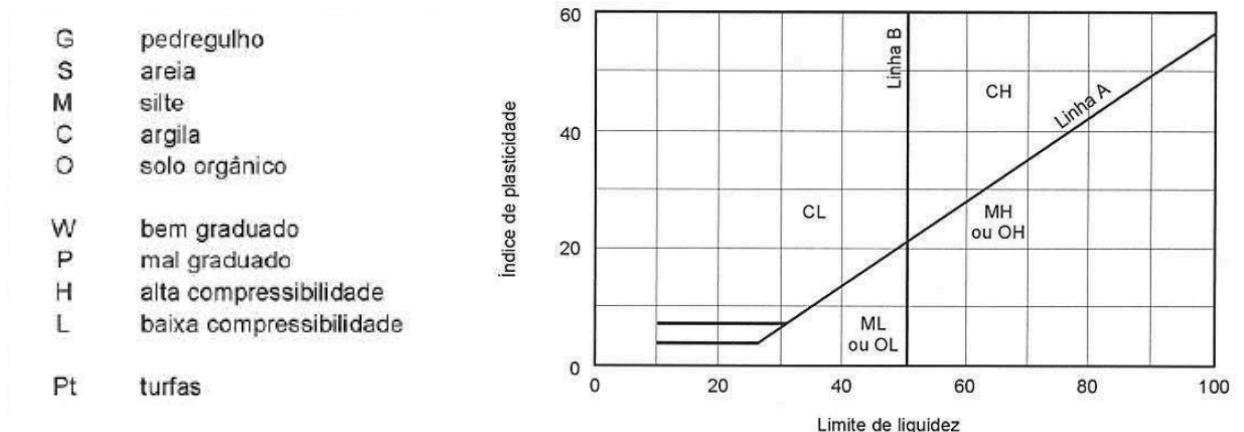
2.2.1 Classificação dos Solos

A importância da classificação dos solos é justificada pela sua diversidade e comportamentos diversos perante às obras de engenharia, sendo assim existem sistemas de classificação a fim de separá-los e orientar seu uso (PINTO, 2006).

Um dos sistemas de classificação é a Classificação Unificada pelo Prof. Casagrande, sendo um dos principais métodos de classificação utilizado pelos geotécnicos em suas obras de engenharia. (PINTO, 2006)

A Figura 1 ilustra seu método de classificação (areias e siltes) e como os solos de granulação fina se enquadram em cada classe distinta, baseado em alguns índices físicos (LL e IP), os quais são obtidos por meio dos ensaios normalizados pelas ABNT NBR 6459 e 7180 ambas de 2016.

Figura 1 - Classificação Unificada de Casagrande com Carta de Plasticidade (SUCS)



Fonte: Adaptado de Pinto (2006).

Esse é um dos métodos de classificação dos solos (SUCS), no entanto, existem as classificações ABNT e MCT, sendo esta última mais condizente com os solos encontrados nas regiões tropicais, idealizado por Nogami e Villibor em 1981.

2.2.1.1 Classificação MCT

Em 1981, Nogami e Villibor propuseram a Classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) com objetivo de realizarem a melhor contemplação possível de informações sobre solos tropicais, algo que na época não havia e não existia algo claro e definido para o material que está localizado em toda a vasta extensão do Brasil. Sendo assim, o solo tropical foi dividido em duas classes, sendo o laterítico e o não laterítico, além de 7 subdivisões, sendo este método amplamente usado na área da infraestrutura de transportes.

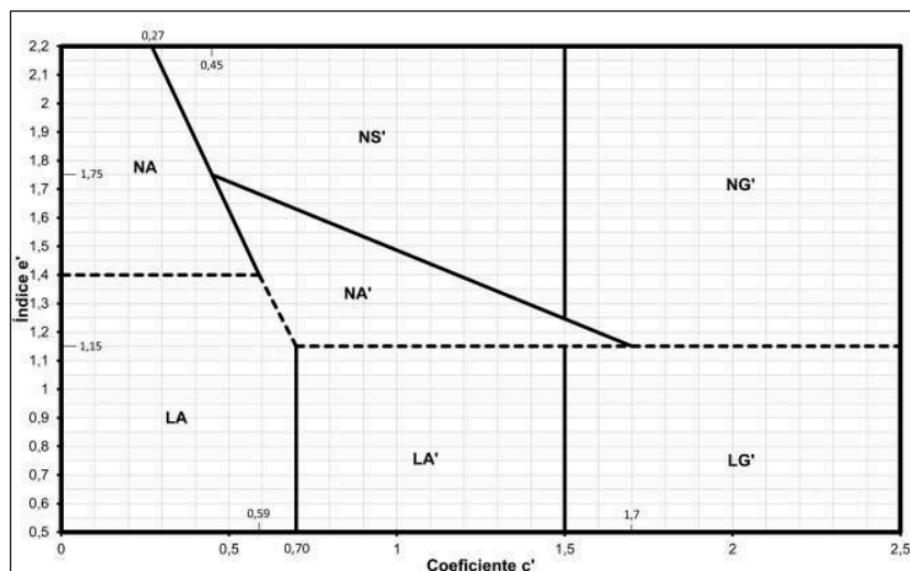
Para Nogami e Villibor (1995), assim são classificados os solos de clima tropical:

- LA - Areia Laterítica: Solos arenosos com baixa porção de finos, formados especialmente por grãos de areia de baixa coesão. Podem ser usados em camadas de sub-base ou base de pavimentos, pois possuem boa capacidade de suporte e de drenagem.
- LA' - Arenoso Laterítico: Solos arenosos com maior porção de finos, apresentando frações de argila em sua composição. São adequados para camadas de base e de sub-base.
- LG' - Argiloso Laterítico: Essa tipologia apresenta porções significativas de argila e areia em sua formação, sendo mais suscetíveis à deformação. Se estabilizados corretamente podem ser empregados em subleitos de pavimento, sendo mais recomendados para áreas de baixo tráfego.
- NA - Areia Não Laterítica: Grupo formado pela mistura de areias e de finos não lateríticos como siltes e micáceos. Geralmente, são evitados no âmbito da infraestrutura de pavimentação por possuírem baixíssimo índice de suporte, além de serem mais vulneráveis à deformações ao longo do tempo.
- NA' - Arenoso Não Laterítico: Classificação formada por areia com maiores frações de finos, como silte e argila. Apresentam capacidades intermediárias de suporte, podendo depender de estabilizador para melhor funcionamento em estradas.

- NS' - Silte Não Laterítico: Solos com maior porção de silte, logo são menos adequados para pavimentação, visto que possuem elevada compressibilidade e alta suscetibilidade à deformação.
- NG' - Argila Não Laterítica: Tipologia com maior fração de argila, proporcionando elevada compressibilidade, bem como são mais expansivos.

Dentro desse procedimento, são executados dois ensaios para obtenção dos resultados, o ensaio mini-MCV (*Moisture Condition Value*) e a Perda de Peso por Imersão que produzem os valores do índice e' e coeficiente c' para definição exata da tipologia do solo, conforme mostra a Figura 2 abaixo.

Figura 2 - Ábaco para MCT



Fonte: DNIT 259 (2023).

2.2.1.2 Classificação ABNT

A classificação ABNT é normatizada pela ABNT NBR 6502:1995, sendo dividida em quatro diferentes análises.

I - Classificação geológica, que tem por base a formação e é pautada em princípios da geologia (ABNT NBR 6502, 1995).

II - Classificação geotécnica, que se baseia nos constituintes do solo e é pautada em princípios da mecânica dos solos (ABNT NBR 6502, 1995).

III - Classificação granulométrica, a qual leva em consideração as dimensões dos grãos que compõem a amostra a ser classificada (ABNT NBR 6502, 1995).

IV - Classificação pedológica, buscando definir os solos baseado em quatro condições: grau de evolução e perfil do solo; modo de alteração; tipo de distribuição

da MO no perfil; e presença de fenômenos que são imprescindíveis para a evolução do solo (ABNT NBR 6502, 1995).

2.2.2 Avaliação Mecânica dos Solos

2.2.2.1 Módulo de Resiliência

O Módulo de Resiliência é vital para o estudo em pavimentações, pois através de seu ensaio é possível representar a capacidade de retorno à forma original, isto é, a avaliação da deformação elástica que um solo ou material granular possui após serem submetidos a carga repetitivas, assim como estariam em um cenário de tráfego de veículos. Desse modo, quando um solo apresenta um valor alto de MR é possível deduzir que o mesmo é habilitado para suportar deformações sem que sofra consideravelmente em sua estrutura, logo sendo mais adequado para o emprego em bases, sub-bases ou subleitos de um pavimento.

De acordo com Preussler (1978) e Lekarp et al. (2000) citados por Levay (2023), os parâmetros que mais influenciam na obtenção de um MR satisfatório são o teor de umidade, as tensões confinantes e de desvio e a densidade máxima seca.

Takeda (2006) infere que se teor de umidade estiver baixo há a tendência de causar a elevação do MR, justamente pela relação com a sucção matricial que proporciona uma maior coesão entre os grãos, atuando como uma força de ligação que une as partículas e dificultando a movimentação das mesmas e, por isso, aumenta a capacidade do solo de resistir a cargas. Aliado a isso, a densidade máxima seca apresenta um grau de compactação maior e, conseqüentemente, elevado MR.

As tensões confinantes exercidas nas laterais simulam a pressão que ocorre ao redor do solo, assemelhando-se às cargas que uma camada do solo aplica a outra, por exemplo. Esse tipo de tensão impede a expansão lateral, promovendo o aumento da rigidez por meio do confinamento das partículas, aumentando o valor do MR (HUANG, 2004).

Huang (2004) citado por Levay (2023) diz que as tensões de desvio são aquelas que são aplicadas verticalmente, as quais representam a força efetuada pelo tráfego. O efeito que a tensão de desvio causa no solo tende a mudar em função do tipo de solo, pois em solos mais coesivos o aumento desse parâmetro

proporciona a redução do MR, já que aumenta a deformação. Por outro lado, em solos mais granulares o aumento dessa tensão não exerce grande interferência, visto que esse tipo de material é mais sensível à variação da tensão de confinamento.

2.2.2.2 Índice de Suporte Califórnia

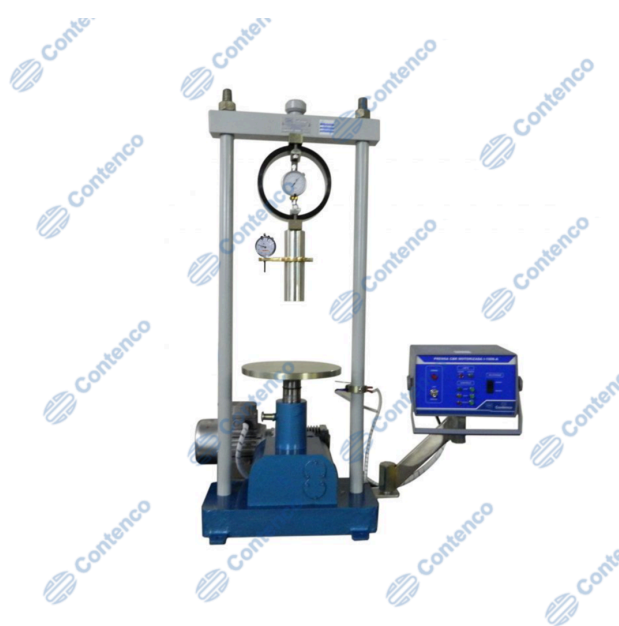
Há grande variabilidade nas características mecânicas de um solo, sendo de suma importância conhecer suas propriedades para dimensionamentos que os utilizem (PINTO, 2006; OWNTEC, 2020).

O ensaio é normatizado pela ABNT NBR 9895/2016 e pela DNIT 172/2016. Esse ensaio busca a determinação da resistência à penetração em solos, usado para dimensionamento de pavimentos (ENGETOTUS, 2019; CONTENCO, 2020).

Vale-se ressaltar que essa determinação da resistência à penetração é feita mediante as diretrizes da norma que incluem a umidade ótima do CP.

A prensa que é utilizada neste ensaio pode ser representada abaixo pela Figura 3.

Figura 3 - Prensa de ensaio de ISC



Fonte: Contenco, 2020.

2.2.2.3 Compactação com Proctor Normal

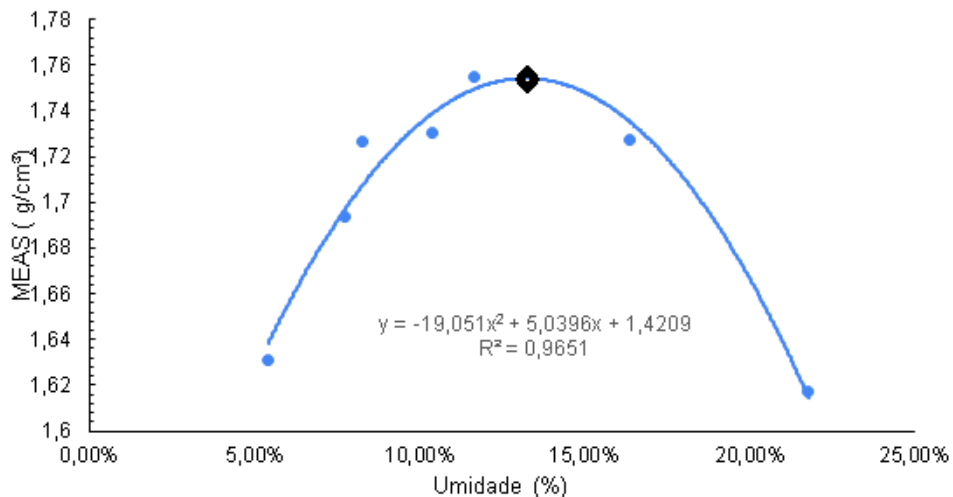
A compactação é o aumento da densidade do solo, como também a mudança de outras de suas propriedades, causando o rearranjo dos agregados (TORRES et. al. 1998).

O solo é afetado pela intensidade da carga aplicada, como também pela sua umidade, composição mineralógica e densidade inicial. (DIAS JR. e PIERCE, 1996).

Assim, o ensaio que é normatizado pela DNIT-ME 228 e pela ABNT NBR 7182:2016 tem por objetivo definir a umidade ótima a ser utilizada nos ensaios mecânicos (ISC, CS e MR).

Para tanto, no mínimo 5 teores de umidade são ensaiados com o material a ser analisado, a posteriori é elaborada uma curva com o intuito de encontrar o valor de umidade para o maior valor de MEAS. Isso pode ser realizado mediante análise gráfica ou por meio da derivada da função obtida graficamente no ponto de máximo, como observado a seguir na Figura 4, sendo o ponto indicado pelo losango.

Figura 4 - Como obter a umidade ótima



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

2.2.2.4 Compressão Simples

O ensaio é normatizado pela NBR 12770 (ABNT, 2022) e tem como finalidade a determinação da resistência à compressão não confinada de uma amostra. O ensaio se difere da compressão triaxial por possuir um equipamento menos robusto,

além de não possuir confinamento lateral, sendo tensionado apenas verticalmente (MACHADO, 2018).

Através do processo, é possível extrair os valores de resistência à ruptura a partir da leitura do equipamento quando o solo apresenta um perfil de ruptura causado pela prensa.

Tendo em vista o contexto da pavimentação, o procedimento é considerado um complemento ao Índice de Suporte de Califórnia, já que fornece resultados de comportamento mecânico do solo, sendo possível a investigação do comportamento tensão vs deformação do material.

2.2.3 Estabilização de Solos: diferentes materiais e técnicas

Segundo Kawahashi (2010), a estabilização com ligantes hidráulicos é um procedimento eficiente para o tratamento de solos com baixo valores mecânicos com fins para pavimentação.

Um dos métodos bastante utilizados é a adoção da mistura solo-cimento, comumente empregado em solos arenosos finos lateríticos para a construção de bases de pavimentos asfálticos (KAWAHASHI, 2010), apresentando um ganho significativo de fatores resistivos com a introdução do Cimento Portland. Além disso, a cal hidratada pode ser aplicada por ser estável e de fácil manuseio, garantindo aplicabilidade para pavimentação.

Brand et al. (2020) apresentou uma análise detalhada sobre a catalisação da reação de cimentação do silicato dicálcico presente na EA, destacando que o uso de cloreto de cálcio como catalisador não se mostrou eficaz para esse processo. Em anuência com os autores, a adição do cloreto de cálcio não foi capaz de promover uma aceleração significativa na reação.

Em contrapartida, Lopes et. al (2021) e Ismail et al. (2019) afirmam que reação de cimentação poderia não ocorrer em função do solo estudado ser não reativo. Dessa forma, para estes o solo depende de outros fatores que estão ligados a sua formação e características, os quais corroboram para a ausência ou baixa concentração de componentes químicos específicos que são fundamentais para desencadear os mecanismos envolvidos na reação. Logo, os autores sugerem que a reatividade do solo é um fator crítico na eficácia do processo de cimentação, onde é

essencial avaliar previamente as propriedades do solo antes de implementar métodos baseados nesse fenômeno.

Diante disso, a fim de analisar as propriedades estruturais, a composição das misturas geradas e confirmar a cimentação, usa-se o ensaio de Difração de Raios-X (DRX) para uma análise precisa e detalhada, conforme realizado por Zhou et al. (2021). Essa técnica permite identificar as fases cristalinas presentes no material, fornecendo informações valiosas sobre sua organização atômica e grau de cristalinidade. Além disso, o DRX é reconhecido por sua capacidade de determinação da estrutura cristalográfica e quantificação da composição mineralógica, fazendo com que o ensaio seja de suma importância para a compreensão do comportamento granular de um solo ou mistura.

2.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Os solos utilizados nesta pesquisa foram coletados em uma jazida de empréstimo natural na estrada de Jericó, localizada no município de Cunha (São Paulo). Ambas são amostras deformadas de solos residuais superficiais, sendo que uma possui coloração amarelada e a outra, avermelhada. As amostras foram levadas ao laboratório de mecânica dos solos da UNESP – FEG, onde foram preparadas (secagem, destorroamento, quarteamento, pesagem e peneiramento) para ensaios de caracterização geotécnica, conforme a NBR 6457 de 2016.

Em contrapartida, a EA foi coletada em um aterro especializado (AB Areias) localizado na cidade de Pindamonhangaba – SP, que recebe o material produzido pela Gerdau da mesma cidade, destinando-o ao descarte. Após a coleta, o material apresentava uma granulometria grossa com diâmetro aproximado de 19 mm, sendo realizada uma britagem aliada a uma peneiragem antes de sua utilização. A seguir, a Figura 5 ilustra os materiais utilizados.

Figura 5 - Da esquerda para a direita: Solo I, Solo II, Escória de Aciaria



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

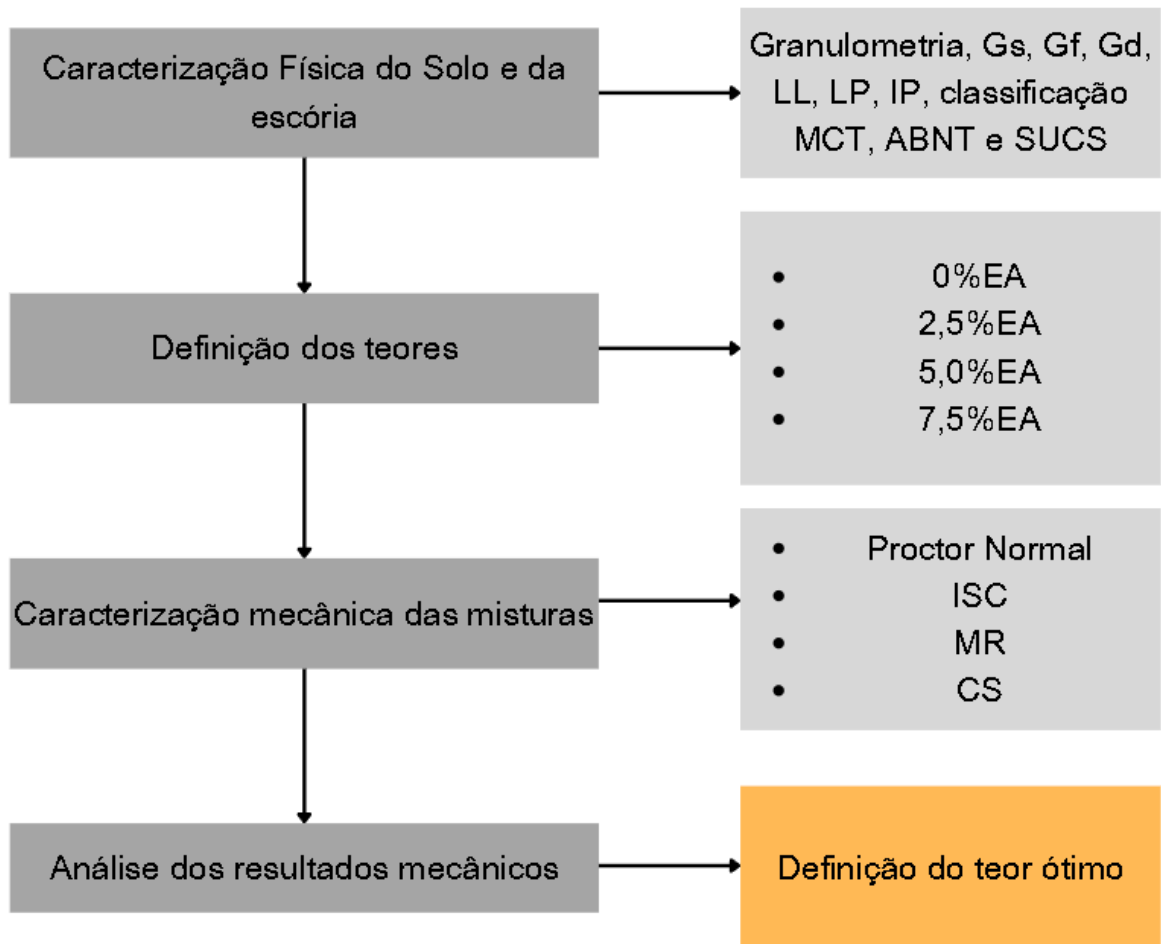
2.4 MÉTODOS

A seguir, será explicitado a metodologia que foi utilizada para a elaboração do artigo, onde sucederam ensaios condizentes com as normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), bem como a busca pela correta correlação entre os dados, comparando as informações (geotécnicas e mecânicas) de solo natural, ou seja, com 0% de EA aos valores obtidos com a inserção de EA em seus diferentes teores para cada tipo de solo avaliado.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Transportes da Unesp - Guaratinguetá (FEG), com exceção do MR, o qual se desenvolveu junto ao Instituto de Mauá de Tecnologia, localizado no município de São Caetano do Sul no estado de São Paulo. Vale-se ressaltar que todos os ensaios mecânicos foram realizados 3 vezes para cada teor de escória experimentado com o intuito de extrair um valor mais preciso através da média desses dados obtidos em laboratório.

Em resumo, a Figura 6 expõe a metodologia usada no artigo em questão.

Figura 6 - Metodologia simplificada



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

2.4.1 Caracterização geotécnica

Diante da necessidade de caracterizar corretamente as amostras dos solos que foram utilizadas, o presente trabalho executou os ensaios de limites de Atterberg, massa específica dos grãos, Compactação por meio do Índice de Suporte de Califórnia e MCT (Miniatura, Compactada, Tropical).

Primeiramente, a preparação para ensaios de compactação e de caracterização foi regida pela NBR 6457 (ABNT, 2016), onde esse documento promove a definição dos procedimentos necessários para a caracterização de uma amostra. Para a preparação da escória, o material foi moído em um britador de mandíbula para a redução da granulometria em partículas de menores diâmetros e para os solos I e II, foi utilizado um pilão com o mesmo objetivo. Com isso, foi

possível realizar a caracterização física da escória de aciaria pela distribuição granulométrica do material após sua preparação.

Ressalta-se que tanto a escória de aciaria como os dois solos foram preparados, conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016), antes de seu uso nos ensaios explicados a seguir, onde ambos os materiais foram passados na peneira 4,75 mm (#4).

Dessa forma, também foram elaborados os ensaios de Limite de liquidez, segundo a NBR 6459 (ABNT, 2016) e Limite de plasticidade, seguindo as diretrizes da NBR 7180 (ABNT, 2016), bem como a determinação real da massa específica dos grãos dos solos por meio do uso da normativa NBR 6458 (ABNT, 2017), elucidada pela Figura 7.

Figura 7 - Ensaio de densidade real dos grãos



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Logo, realizou-se o procedimento de sedimentação dos solos com a finalidade de suspender as partículas finas do solo, como argilas e silte, através do uso do aglomerante que permite a análise mais precisa da granulometria, sendo pautada pela norma NBR 7181 (ABNT, 2016). Por consequência, para o experimento há dois resultados distintos para cada tipologia de solo, um com o uso do aditivo químico e o outro sem, ilustrada pela Figura 8.

Figura 8 - Ensaio de Sedimentação



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

A partir disso, é possível definir a granulometria mais assertiva das amostras, seguindo as diretrizes observadas pela NBR 7181 (ABNT, 2016) que infere a classificação do solo por meio da porcentagem retida em cada peneira exemplificada pela norma, como também é possível aferir o grau de floculação (Gf) e grau de dispersão (Gd).

As curvas de compactação, isto é, massa específica seca máxima versus teor de umidade dos solos se deram por meio do ensaio de compactação na energia Proctor normal para obtenção da umidade ideal dos mesmos e de expansão, de acordo com as recomendações da norma NBR 7182 (ABNT, 2023).

Feito a caracterização inicial de cada material, executou-se os ensaios de mini-MCV e de Perda de Massa por Imersão, obedecendo as diretrizes da DNIT 258/2023 – ME (DNIT, 2023), como demonstra a Figura 9. Posto isso, é possível utilizar a classificação do solo por meio do ábaco de MCT a partir dos parâmetros adquiridos pelos experimentos anteriores, conforme a norma DNIT 259/2023 – ME (DNIT, 2023).

Figura 9 - Ensaio de Perda de Massa por Imersão



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Após a caracterização inicial dos solos em estudo, testou-se quatro tipos de misturas nas seguintes proporções de solo adicionado a escória: (I) 92,5% solo e 7,5% EA; (II) 95% de solo e 5% EA; (III) 97,5% solo e 2,5% EA; (IV) 98,5% solo e 1,5% EA e (V) formada de 100% de solo. Essa proporção foi escolhida por abranger os valores de dosagem recomendados pela NBR 12253 (ABNT, 1992).

Para cada uma das misturas contendo diferentes teores de EA de ambos os solos, realizou-se o ensaio de compactação. Em seguida, com os dados obtidos foi possível elaborar as curvas de compactação para os solos naturais e suas diferentes misturas de EA e, por fim, verificar a influência da EA na umidade ótima e na massa específica máxima dos solos, conforme a Figura 10, seguindo os procedimentos da DNIT 443/2023 – ME (DNIT, 2023).

Figura 10 - Ensaio de compactação do solo



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

2.4.2 Caracterização mecânica

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.

A avaliação dos parâmetros mecânicos de cada mistura ocorreu a partir da determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e do Módulo de Resiliência (MR), onde para cada tempo de cura e teor de EA foram preparados três réplicas de CPs.

Para a determinação do ISC e conseqüentemente da expansão, o material foi compactado dentro de um cilindro metálico de dimensões (15,24 cm \pm 0,05 cm de diâmetro interno e 17,78cm \pm 0,02 cm de altura), conforme apresentado na Figura 11, em seguida, obtém-se a expansão durante 4 dias de imersão do cilindro em um tanque preenchido com água. Após a imersão, o cilindro é levado à ruptura na prensa para a determinação do ISC. Este procedimento de ensaio será realizado de acordo com as recomendações da norma técnica DNIT 172 - ME (DNIT, 2016).

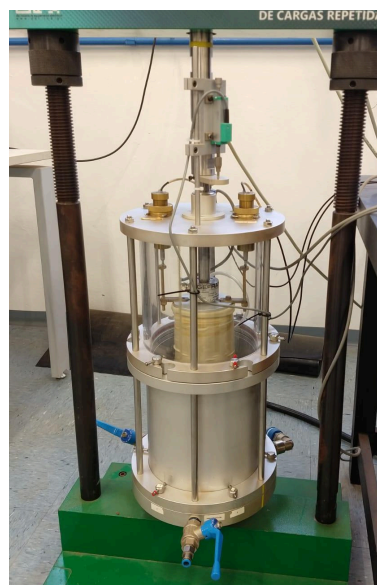
Figura 11 - Ensaio de ISC



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

O ensaio de determinação do MR é normatizado pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) por meio da norma DNIT 134 – ME (DNIT, 2018). O ensaio consiste em uma câmara triaxial (Figura 12), onde serão aplicados diferentes pares de tensão em carga repetida no material. O MR de um solo representa a sua rigidez no regime elástico e é um parâmetro obtido a partir da deformação recuperável sob cargas repetidas. Este parâmetro é utilizado para estudar a resposta dos materiais em uma estrutura de pavimento quando sujeitos a cargas dinâmicas provenientes do tráfego (Medina e Motta, 2015).

Figura 12 - Equipamento triaxial de carga repetida



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

O Módulo de Resiliência é vital para o estudo em pavimentações, pois através de seu ensaio é possível representar a capacidade de retorno à forma original, isto é, a avaliação da deformação elástica que um solo ou material granular possui após serem submetidos a carga repetitivas, assim como estariam em um cenário de tráfego de veículos. Desse modo, quando um solo apresenta um valor alto de MR é possível deduzir que o mesmo é habilitado para suportar deformações sem que sofra consideravelmente em sua estrutura, logo sendo mais adequado para o emprego em bases, sub-bases ou subleitos de um pavimento (Medina e Motta, 2015).

Por fim, o ensaio de compressão simples é regulamentado pela norma NBR 12770 (ABNT, 2022), na qual tem todos os procedimentos de ensaio, desde a velocidade a ser adotada pelo executor de 1 mm/min até ao tamanho do corpo de prova a ser experienciado, sendo 10 cm de altura e 5 de diâmetro e a forma de sua obtenção. Frente a isso, a Figura 13 expõe o ensaio e o aparato envolvido.

Figura 13 - Ensaio de Compressão Simples



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos ensaios realizados, foi possível extrair os resultados para os Solos I e II, os quais foram avaliados em diferentes teores conforme explicado anteriormente. Com isso, os dados obtidos se dividem em Geotécnicos - utilizados para caracterização física mais aprofundada de ambos os solos; bem como Mecânicos - que fornecem a quantificação das propriedades de resistência ensaiadas.

3.1 GEOTÉCNICOS

A Tabela 1 é referente aos ensaios de Limite de Liquidez (LL), de Limite de Plasticidade (LP), de Índice de Plasticidade (IP), de densidade relativa dos grãos (Gs), de grau de flocculação (Gf), de grau de dispersão (Gd) e de classificações MCT, ABNT e SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos).

Tabela 1 - LL, LP, IP, Gs e MCT dos solos

Parâmetros	Solo I	Solo II
LL	40,50%	29,80%
LP	Não plástico	Não plástico
IP	-	-
Gs	2,64	2,65
Gf	21,14%	33,75%
Gd	78,86%	66,25%
MCT	NS	NS
ABNT	Areno Siltoso	Areno Siltoso
SUCS	SF	SF

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Como era esperado devido à caracterização em campo, onde foi possível observar pela análise tátil visual a existência de solos siltosos, o limite de plasticidade de ambos os solos é não plástico. Visualizou-se que o ensaio de LL retornou valores superiores a 25%, e a densidade relativa dos grãos de 2,65 para o

Solo II e de 2,64 para o Solo I, sendo isto característico de solos siltosos como apresentado por Pinto (2006).

Além disso, o grau de flocculação do Solo II é maior que o do Solo I, permitindo inferir que o Solo II possui um arranjo de partículas mais bem desenvolvido que o primeiro solo, possibilitando que o material seja mais coeso e com menor suscetibilidade à erosão. Assim, os valores obtidos para o grau de dispersão coincide com o grau de flocculação, ou seja, pelo Solo I apresentar um grau dispersão maior que o Solo II, o mesmo é mais vulnerável a colapsar estruturalmente, pois suas partículas conseguem flutuar mais livremente, sem formar um arranjo mais bem definido (Prado e Centurion, 2021).

Após o ensaio MCT (tanto o mini-MCV quanto a perda de massa por imersão) foi possível caracterizar os solos como NS (não laterítico), referente à classificação da ABNT, ambos os solos são classificados como areno siltosos, por fim, para a classificação SUCS, eles são SF (areias siltosas). Segundo Godoy (1997), os solos não lateríticos desempenham propriedades de resistência inferiores no que tange a pavimentação se comparados aos solos lateríticos. Com isso, torna-se plausível a inserção de um material estabilizador a fim de potencializar esses parâmetros mecânicos.

Por outro lado, a Tabela 2 diz respeito à granulometria dos solos utilizando o defloculante, onde é viável afirmar que o primeiro solo apresenta uma maior taxa de silte, bem como de argila, ou seja, possui maior taxa de finos se relacionado ao solo II, no qual há a maior existência de areia e até mesmo de pedregulho, o grau de flocculação do solo II é maior que o do solo I, em 13 pontos percentuais aproximadamente. Essa caracterização geotécnica demonstra que são solos residuais gnáisses bem característicos dessa região do Vale do Paraíba, os quais possuem como características a dificuldade de compactação e a baixa capacidade de suporte como camada de pavimento (Kawahashi et al. 2010).

Tabela 2 - Granulometria dos solos e da escória

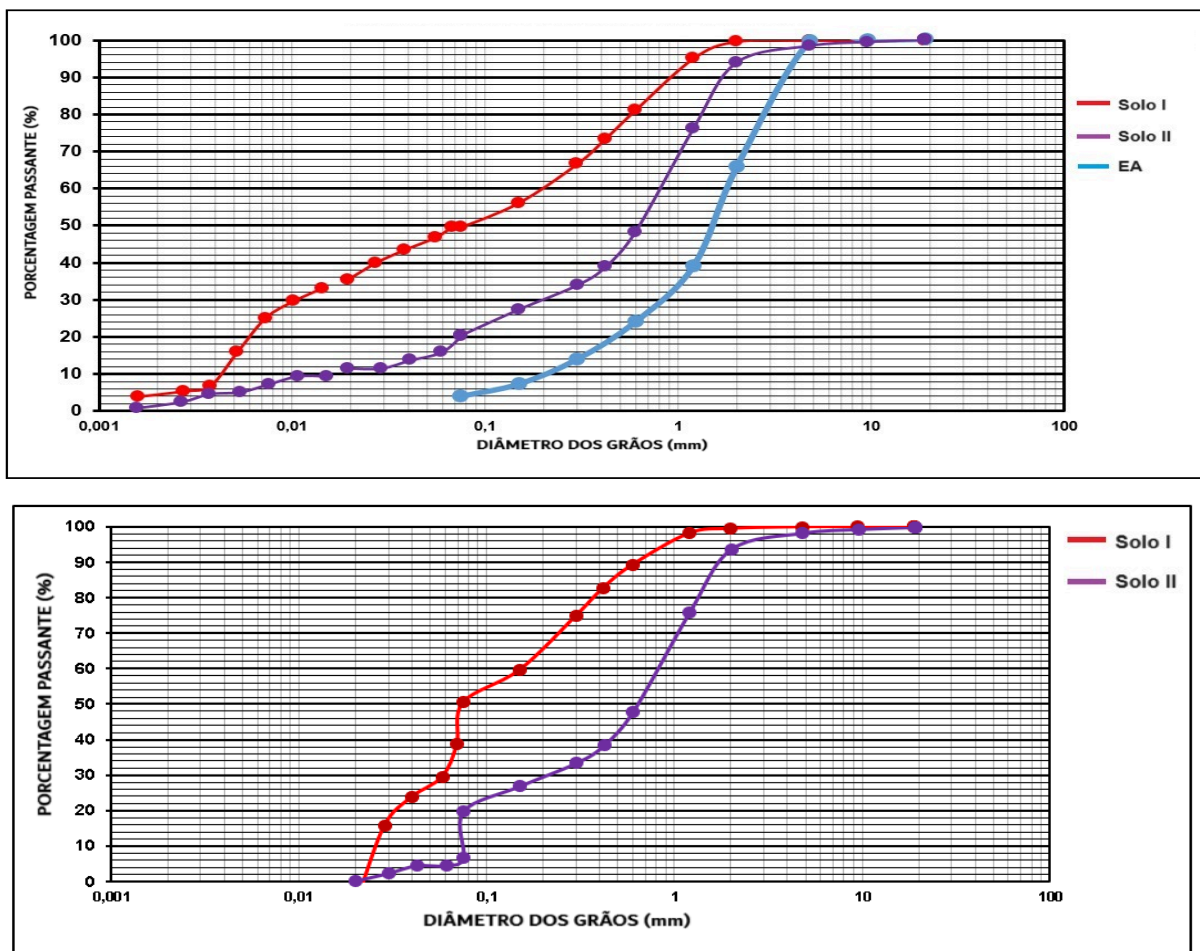
Composição	Solo I	Solo II	EA
Pedregulho	0,40%	6,20%	40,00%
Areia grossa	4,10%	45,00%	34,00%
Areia média	24,10%	10,40%	12,00%

Areia fina	25,60%	23,00%	10,00%
Silte	41,40%	14,60%	
Argila	4,40%	0,80%	4,00%

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Dessa forma, a Figura 14 demonstra as curvas de distribuição granulométrica dos solos com uso do defloculante e sem, respectivamente, bem como a disposição dos grãos de escória de aciaria.

Figura 14 - Curvas granulométricas com e sem defloculante



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Por fim, os valores encontrados nos ensaios estão apresentados na Figura 15, e a Tabela 3 elucida os dados obtidos pelos ensaios de compactação utilizando os teores de EA determinados anteriormente. Em vista disso, é notável que a massa

específica seca (MEAS) do Solo I apenas teve acréscimos nos maiores teores, sendo que para o Solo II não houveram mudanças significativas, além de que em ambos os solos a umidade ótima não apresentou alteração considerável.

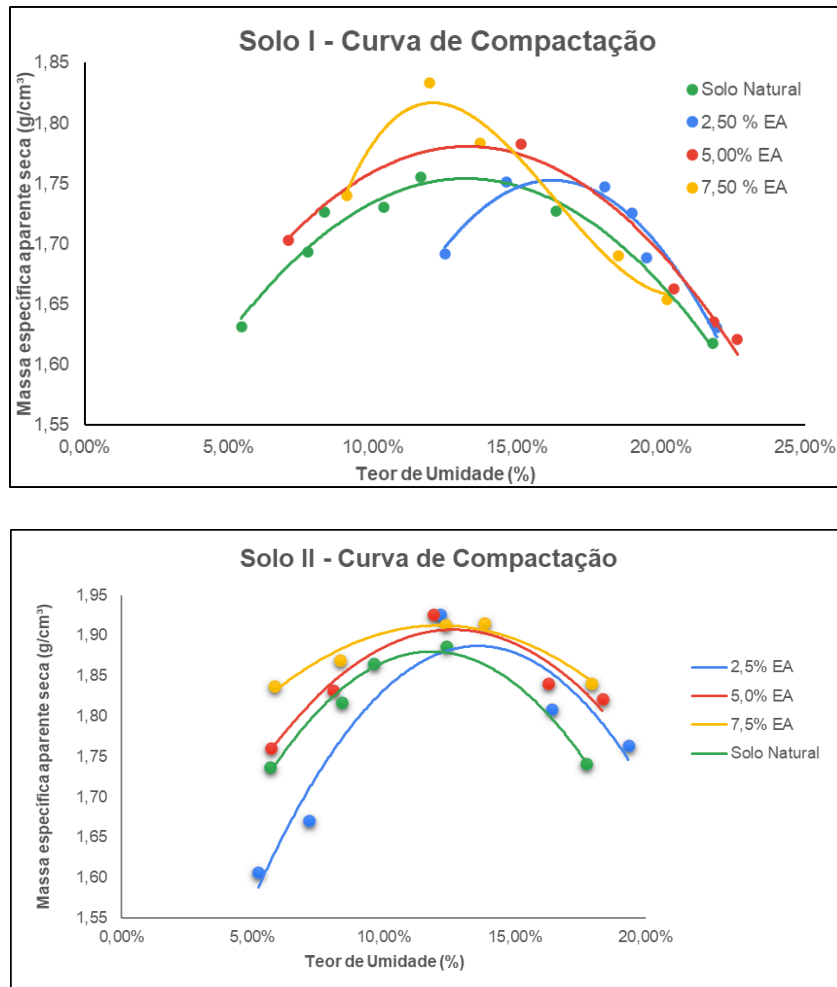
Diante disso, os solos abordados não possuem comportamentos semelhantes ao de Lopes et al. (2021), Tran et al. (2022) e Costa et al. (2019), que seria de aumento gradativo da MEAS e redução da umidade ótimo, o que pode ser explicado por Zhou et al. (2021) que infere que essa tendência é justificada pela baixa reatividade dos solos com o EA e, conseqüentemente, os materiais não conseguem produzir ligações químicas satisfatórias com o resíduo para que este os estabilize. Sendo essa pouca reatividade do solo oriunda dos baixos teores de argila presentes (Galindo, 2022).

Tabela 3 - Teores ótimos de umidade e massa específica seca máxima para cada mistura

Tipo da mistura	wot (%)	MEAS (g/cm ³)
Solo I - 0% EA	13,23	1,75
Solo I - 2,5% EA	16,23	1,75
Solo I - 5,0 % EA	13,29	1,78
Solo I - 7,5% EA	13,06	1,80
Solo II - 0% EA	11,83	1,91
Solo II - 2,5% EA	13,59	1,89
Solo II - 5,0 % EA	12,67	1,91
Solo II - 7,5% EA	12,14	1,91

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Figura 15 - Curvas de Compactação



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

3.2 MECÂNICOS

Feito os experimentos laboratoriais de caracterização geotécnica dos solos, os ensaios de determinação mecânica foram realizados, onde os corpos de prova foram moldados a partir da umidade ótima obtida pelas curvas de compactação para cada porcentagem de EA com o intuito de extrair os dados definitivos para definição de como a EA age perante aos solos de acordo com seus teores utilizados.

3.2.1 Índice de Suporte Califórnia

Inicialmente, foram executados os ensaios de Índice de Suporte de Califórnia utilizando a umidade ótima de cada teor. Dessa forma, fez-se a Tabela 4 que resume os dados obtidos, onde se percebe que há uma tendência de diminuição da expansão com o aumento do teor de escória para o solo I, o qual apresenta os maiores valores de expansão. Isso também ocorre no solo II, contudo esses valores são ainda menores se comparados aos resultados do primeiro solo devido a baixa quantidade de argila presente em sua granulometria. Os estudos de Lopes et al. (2021), Ismail et al. (2019) e Parsaei et al. (2021) atribuem essa redução na expansão por conta das reações químicas entre os materiais, gerando uma floculação das partículas e, conseqüentemente, a cimentação alterando a estrutura do material.

Tabela 4 - ISC e expansão (%) para os diferentes teores de EA

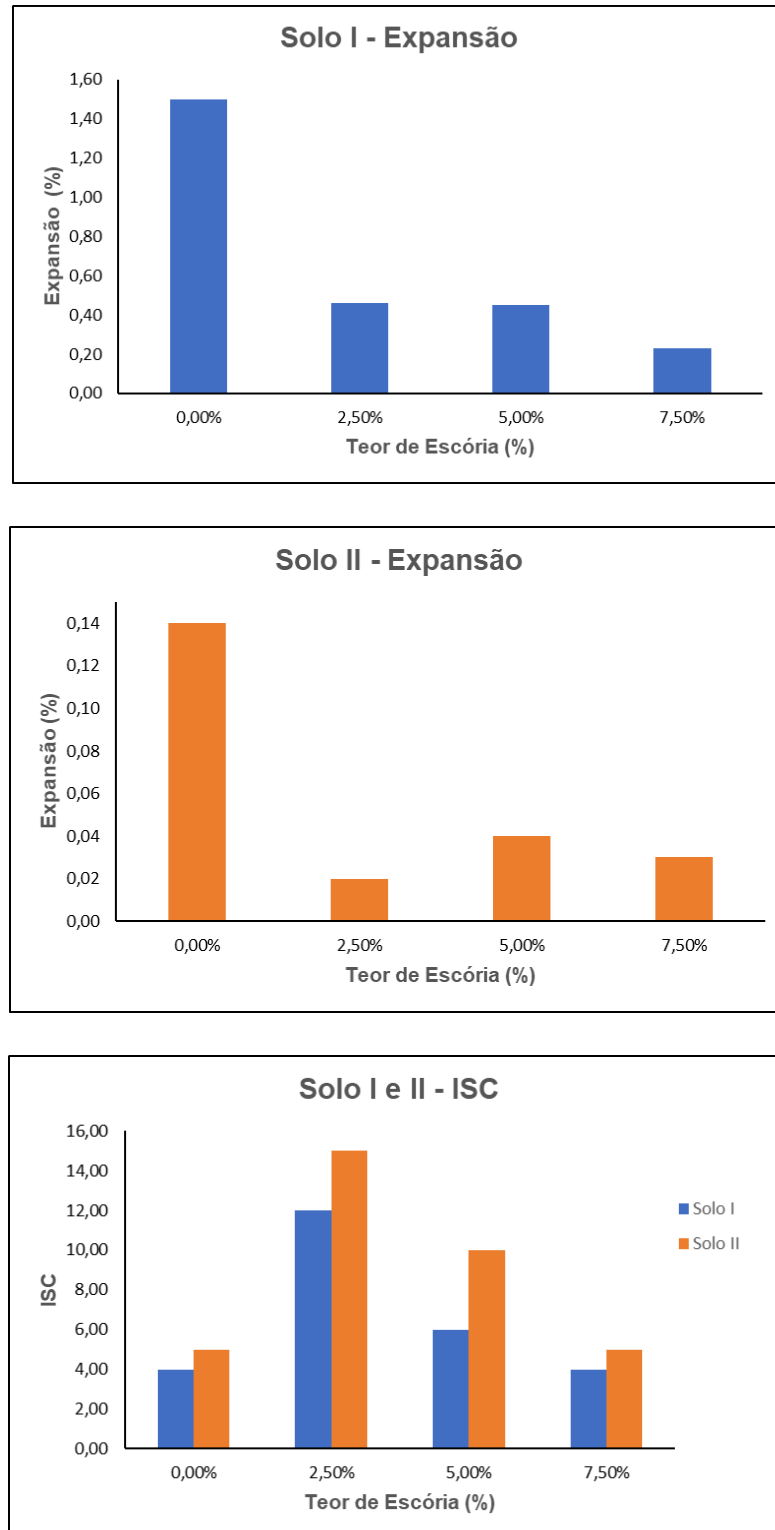
Tipo da mistura	Expansão (%)	ISC
Solo I - 0% EA	1,50	4
Solo I - 2,5% EA	0,46	12
Solo I - 5,0 % EA	0,45	6
Solo I - 7,5% EA	0,23	4
Solo II - 0% EA	0,14	5
Solo II - 2,5% EA	0,02	15
Solo II - 5,0 % EA	0,04	10
Solo II - 7,5% EA	0,03	5

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Para os valores de ISC, verificou-se que houve um padrão entre os solos ensaiados, onde ocorreu a triplicação do ISC do Natural para o teor de 2,5% de escória de aciaria em cada solo. Além disso, foi constatado que para o teor de 7,5% ambos apresentam o mesmo ISC que foi aferido para os naturais, o que permite dizer que frente a esse ensaio o teor ótimo foi o de 2,5%. Possivelmente, esse decréscimo nos valores de ISC por meio da introdução de EA é explicada pelo estado da prensa utilizada no ensaio, onde a mesma apresentou algumas falhas mecânicas que, por vezes, podem ter comprometido os valores. A Figura 16 retrata o comparativo entre

o ensaio de ISC para todos os teores de cada solo conforme mostrado na Tabela 4, bem como as suas respectivas expansões e curvas de compactação.

Figura 16 - Gráficos de ISC e Expansão

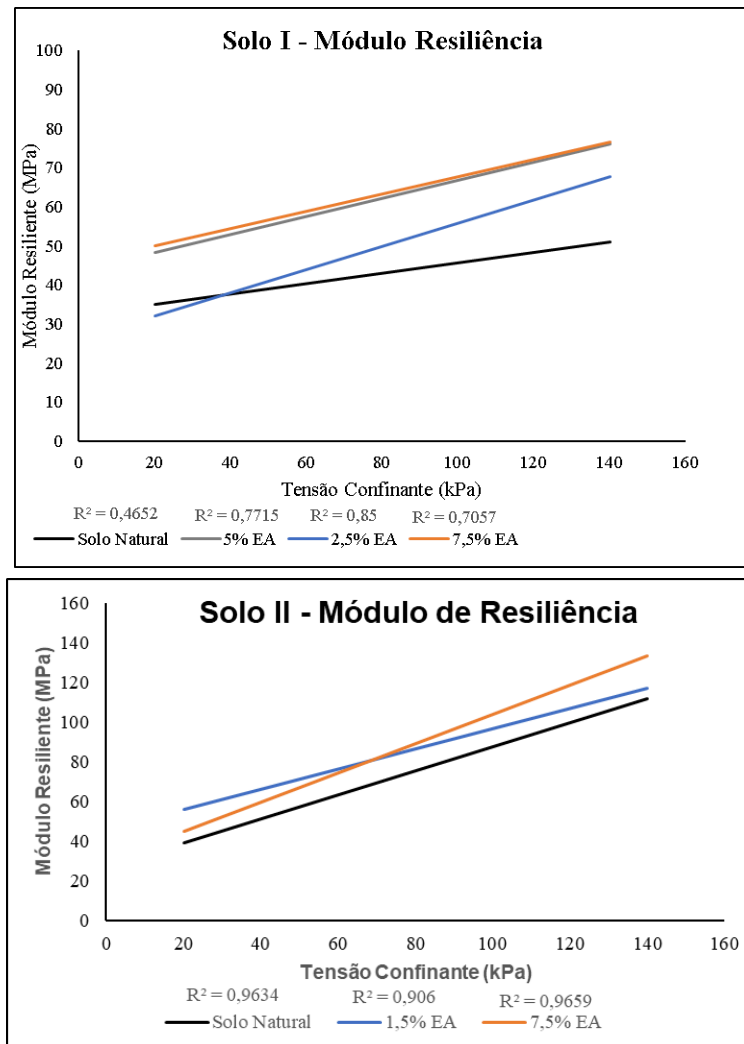


Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

3.2.2 Módulo resiliência e compressão simples

A Figura 17 apresenta os resultados de MR das misturas avaliadas. Ressalta-se que foi utilizado o modelo linear com a tensão confinante no eixo das abscissas em escala linear para representar o MR. O modelo linear não é o que apresenta o maior R^2 , mas é o que melhor representa visualmente o efeito da adição da escória, além disso as Tabela 5 e 6 expõem os resultados de um baixo par de tensão e um par de alta tensão, respectivamente, para cada teor de mistura ensaiada.

Figura 17 - Ensaio de Módulo de Resiliência



Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Tabela 5 - Resultados de par baixo de tensão para diferentes teores de mistura

Solo	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	MR (kPa)
Natural S1	20	60	28224
2,5% EA S1	20	60	32822
5,0% EA S1	20	60	50907
7,5% EA S1	20	60	55301
Natural S2	20	60	35255
1,5% EA S2	20	60	58983
7,5% EA S2	20	60	53198

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

Tabela 6 - Resultados de par alto de tensão para diferentes teores de mistura

Solo	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	MR (kPa)
Natural S1	140	420	51915
2,5% EA S1	140	420	68257
5,0% EA S1	140	420	81261
7,5% EA S1	140	420	86117
Natural S2	140	420	114039
1,5% EA S2	140	420	118578
7,5% EA S2	140	420	135971

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

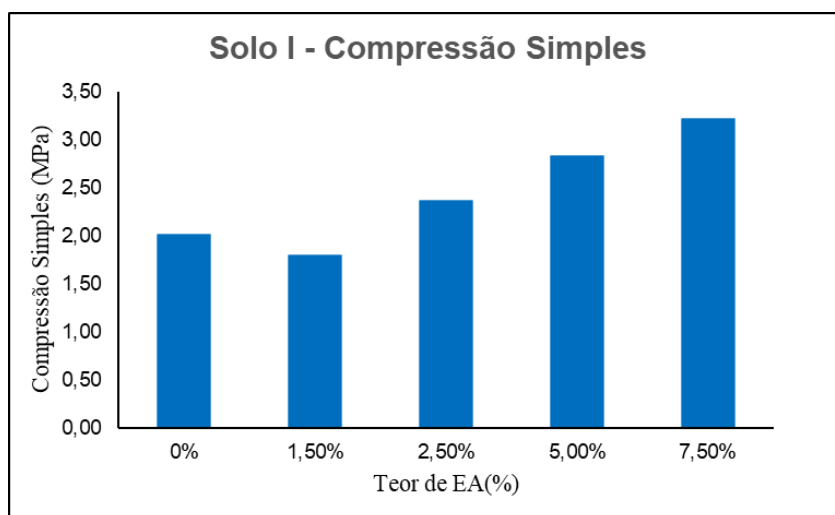
Verifica-se que em todas as misturas e para ambos os tipos de solo, a inserção de escória gera uma elevação nos valores de MR em comparação às amostras de solo natural, isto é, a adição de escória contribui para melhorar o comportamento do material sob carregamento cíclico. Todavia, observa-se que a maior variação nos valores de MR ocorre no último teor de escória para o Solo I em baixos pares de tensões e para o primeiro teor de escória do Solo II nessa mesma situação.

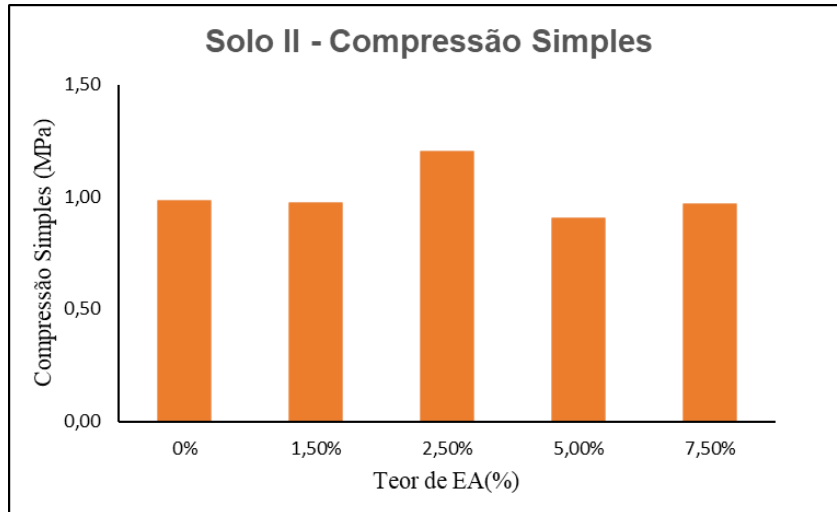
Observou-se um ganho para um par de tensão baixo (20kPa e 60kPa), para o Solo de 95%, e para o Solo II de 51% , ambos em relação à mistura de solo natural, comparando-se a de 7,5% EA. Seguindo o mesmo princípio, para um par de alta tensão (140kPa e 420kPa) houve um aumento de 66% para o Solo I e para o Solo II de 19%.

Assim, os aumentos adicionais de escória não resultam em ganhos significativos de MR para elevados pares de tensão em relação aos teores de escória. Ressalta-se que o aumento no MR é fundamental para a resposta estrutural de pavimentos e comparando com o estudo de Lopes et al. (2021), nota-se que os autores também relataram um aumento no MR com a introdução de escória, além de uma melhora menos acentuada em solos mais siltosos.

Finalizando, a Figura 18 retrata os valores obtidos pelo ensaio da compactação simples de cada solo em seus distintos teores de EA. Pode-se aferir que o solo I demonstra um ganho de cerca de 60% no teor de 7,5% EA em relação ao natural na resistência à compressão, contudo o solo II não possui essa tendência, onde o teor de 2,5% apresenta o maior valor de resistência, havendo ganho de 26% se comparado à mistura de 0% EA. Dito isso, Lopes et al. (2021) visualizou a tendência do ganho de resistência com a incrementação de EA e destacou que o processo de cimentação era essencial para tanto, ou seja, perante os solos I e II analisados quanto a compressão simples, pode-se afirmar que o solo II não cimentou corretamente, o que afetou seus resultados.

Figura 18 - Compressão Simples dos solos





Fonte: Elaborada pelos autores (2024)

4 CONCLUSÃO

Em função dos solos em estudo apresentarem baixa capacidade de suporte, estes se tornam inviáveis 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 também a melhoria do solo no caso deste artigo.

Desta maneira, definiu-se que, em suma, os valores dos teores ótimos de EA para os Solos I e II são, respectivamente, 5,0% e 2,5%, havendo melhorias pouco representativas para teores maiores em termos de resistência, considerando as diferenças percentuais de ganho. Ademais, com a inserção de EA em solos expansivos é possível viabilizar o uso desses solos no âmbito de infraestrutura de um pavimento, visto que o estabilizador permite a melhoria na capacidade de suporte (Kawahashi et al. 2010).

Entretanto, inicialmente, esperava-se que os solos abordados seguissem os estudos de Lopes et al. (2021), Tran et al. (2022) e Costa et al. (2019) que mostraram que com a inclusão de EA houve um aumento nos parâmetros de MEAS, ISC, MR e CS e diminuição da expansão e umidade ótima dos solos. Neste artigo, foi observado que a EA fornece melhorias nas propriedades de resistência dos solos ensaiados, contudo o aumento do teor de EA não necessariamente possibilita o avanço dessas propriedades para pavimentação.

Além disso, deveria-se concluir 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). Em relação à deformação, definiu-se como teor ótimo a mistura de 7,5% EA para ambos os solo, mas para os parâmetros mecânicos, como resistência, definiu-se como melhor teor para os solos I e II, respectivamente, as misturas de 5,0% EA e 2,5% EA, justificados pelos resultados principalmente da CS e do MR, o que contradiz os autores quanto à resistência de penetração, isto é, a escória apresenta comportamento anômalo.

Dessa forma, a resposta a essa tendência se deve à ineficácia do processo reativo destes solos com a escória, como observado por Lopes et al. (2021) para certos tipos de solo, pouco argilosos. Nesse sentido, ao passo que o solo II

apresenta valores reduzidos de argila se comparado com o solo I, cerca de 5 vezes menor, afirma-se que esta propriedade tem influência direta na cimentação como analisado por Galindo (2022), além disso, o primeiro solo apresenta Gf menor se comparado ao segundo, o que também pode ter influenciado esse comportamento. Vale-se ressaltar que essa cimentação ou estabilização granulométrica ocorrida no solo I pode ser confirmada mediante realização de ensaio de Difração de Raios-X (DRX) (Zhou et al, 2021).

Diante do tipo de solo estudado, a EA apesar de aumentar algumas propriedades não é eficaz em altos teores para ser aplicada como base em pavimentos, no entanto poderia ser utilizada como sub base, nos teores ótimos indicados. Logo, é importante afirmar que a tipologia, pedologia e mineralogia do solo influenciam na reação de cimentação e que, conseqüentemente, reflete nos ganhos dessas propriedades que o estabilizador consegue fornecer com incremento do seu teor.

Sendo assim, é imprescindível a confirmação dessa reação a fim de garantir o correto entendimento sobre a utilização do material como estabilizador de um solo, ou seja, para os solos siltosos abordados a escória se mostra eficiente em estabilizar o solo, todavia mesmo melhorando algumas propriedades mecânicas e físicas, ainda não os torna próprios para uso na pavimentação como material de base, indicado apenas para camadas menos resistentes.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**. Amostras de solo-Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**. Determinação do Limite de Liquidez - Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**. Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**. Análise granulométrica dos solos - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**. Classificação dos solos para fins de engenharia. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**. Solo–Ensaio de Compactação - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12253**. Solo cimento – Dosagem para emprego em camada de pavimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12770**. Determinação da resistência à compressão não confinada de solo coesivo. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BRAND, A. S. *et al.* Stabilization of a clayey soil with ladle metallurgy furnace slag fines. **Materials**, v. 13, n. 19, p. 4251, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/19/4251>. Acesso em: 16 dez. 2024.

CERATTI, J. A. P. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos**. 1991. Orientador: Jacques de Medina. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1991.

CONTENCO. **PRENSA PARA ENSAIO CBR ELÉTRICA** [2020]. Disponível em: <https://contenco.com.br/produto/prensa-cbr-eletrica-i-1006-a/>. Acesso em: 6 Abr. 2021.

COSTA, S. N.; SANTOS, R. O. G. Utilização da escória de aciaria em combinação com solo para uso em camadas de pavimentação rodoviária. **Engineering**

Sciences, Araguaína, v. 8, n. 1, p. 57-66, 2020. Disponível em:
<https://sustenere.inf.br/index.php/engineeringsciences/article/download/CBPC2318-3055.2020.001.0007/1924/8640>. Acesso em: 16 dez. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT-ME 134. Pavimentação - Solos - Determinação do Módulo de Resiliência. Brasília: DNIT, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. .
DNIT-ME 172. Solo – Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras não Trabalhadas. Brasília: DNIT, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT-ME 228. Solos - Ensaio de compactação em equipamento miniatura - Método de ensaio. Brasília: DNIT, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 258/2023** – ME – Pavimentação – Solos – Compactação em equipamento miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão – Método de ensaio. Instituto de Pesquisas em Transportes. Brasília: DNIT, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 259/2023** – ME – Pavimentação – Solos – Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR. Brasília: DNIT, 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 443/2023** – ME Pavimentação – Solos – Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos – Método de ensaio. Instituto de Pesquisas em Transportes. Brasília: DNIT, 2023.

DIAS JUNIOR, M. de S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 175-182, 1996. Disponível em:
[https://biblioteca.epagri.sc.gov.br/consulta/busca?b=ad&biblioteca=vazio&busca=\(autoria:%22DIAS%20JUNIOR,%20M.de%20S.%22\)](https://biblioteca.epagri.sc.gov.br/consulta/busca?b=ad&biblioteca=vazio&busca=(autoria:%22DIAS%20JUNIOR,%20M.de%20S.%22)). Acesso em: 16 dez. 2024.

ENGETOTUS. **Prensa Cbr / Marshall, Manual**. 2019. Disponível em:
<https://www.engetotus.com.br/produtos/prensa-cbr-marshall-manual/>. Acesso em: 6 Abr. 2021.

GALINDO, J. R. F. **Estabilização de solos tropicais com resíduos da construção civil e escória de aciaria para uso em pavimentação**. Orientador: Heraldo Nunes Pitanga. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2022.

GODOY, H. **Identificação e Classificação Geotécnica de Latossolos do Estado de São Paulo pelo Método das Pastilhas MCT**. Orientador: Adilson Carvalho.

Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

GURBUZ, A. Marble powder to stabilize clayey soils in sub-bases for road construction. **Road Materials and Pavement Design**, Ankara, v. 16, n. 2, p. 481-492, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/273902540_Marble_powder_to_stabilise_clayey_soils_in_sub-bases_for_road_construction. Acesso em: 16 dez. 2024.

HASAN, U. *et al.* Experimental evaluation of construction waste and ground granulated blast furnace slag as alternative soil stabilizers. **Geotechnical and Geological Engineering**, Zurique, v. 34, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/291418271_Experimental_Evaluation_of_Construction_Waste_and_Ground_Granulated_Blast_Furnace_Slag_as_Alternative_Soil_Stabilisers. Acesso em: 16 dez. 2024.

HERNANDEZ, J. F. M.; SCRIVENER, K. Development and introduction of a low clinker, low carbon, ternary blend cement in Cuba. *In: Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 1st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete*, 1., 2015, Havana. **Conference Paper** [...]. Dordrecht: Springer Nature, 2015. p. 323-329. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-9939-3_40. Acesso em: 16 dez. 2024.

HUANG, Y. H. *et al.* **Pavement analysis and design**. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2004. Disponível em: https://testbank4textbook.com/pdf_samples/Solutions_Manual_for_Pavement_Analysis_and_Design_2nd_Edition_by_Huang_sample_chapter.pdf. Acesso em: 16 dez. 2024.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade**. Indicadores de sustentabilidade, [s.d.]. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/site/indicadores-de-sustentabilidade/>. Acesso em: 05 out. 2024.

ISMAIL, A. I. M. *et al.* The utilization of electric arc furnace slag in soil improvement. **Geotechnical and Geological Engineering**, Montréal, v. 37, p. 401-411, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-018-0619-3>. Acesso em: 16 dez. 2024.

KAWAHASHI, J. *et al.* Estabilização de solos siltosos expansivos de São Paulo com ligantes com elevado teor de escória para pavimentação. **Revista de Transportes**, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 5-16, jun. 2010. Disponível em: <http://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/418>. Acesso em: 16 dez. 2024.

LEKARP, F. *et al.* State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates. **Journal of transportation engineering**, Reston, v. 126, n. 1, p. 66-75, 2000. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2000\)126:1\(66\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:1(66)). Acesso em: 16 dez. 2024.

LEVAY, V. S. **Influência do teor de umidade no módulo de resiliência de solos da BR-319/AM e BR-156/AP para aplicabilidade em pavimentação**. Orientador: Michéle dal Toé Casagrande. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Área de Geotecnia). Universidade de Brasília. Brasília, 2023.

LOPES, E. C. *et al.* Application of electric arc furnace slag for stabilization of different tropical soils. **International Journal of Pavement Engineering**, Londres, v. 23, n.14, p. 5003-5014, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/355644461_Application_of_electric_arc_furnace_slag_for_stabilisation_of_different_tropical_soils. Acesso em: 16 dez. 2024.

MACHADO, A. C. S. *et al.* **Ensaio de Compressão Triaxial**. 2018. Universidade Federal do Oeste da Bahia, Bahia, 2018.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.

MONTENEGRO, J. M. *et al.* Ladle furnace slag in the construction of embankments: expansive behavior. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Reston, v. 25, n. 8, p. 972-979, 2013. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000642](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000642). Acesso em: 16 dez. 2024.

NICOLAU, L. *et al.* Caracterização de escórias com vista à sua utilização em camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários. **Geotecnia**, Brasília, n. 91, p. 85-94, 2001. Disponível em: <https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia/article/view/11251>. Acesso em: 16 dez. 2024.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. 1995. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000892151>. Acesso em: 16 dez. 2024.

OWNTEC, **Prensa CBR – Marshall**, 2020. Disponível em <https://www.owntec.com.br/produto/mp-50-multiprensa-cbr-marshall/>. Acesso em: 29 Out. 2020.

PARSAEI, M. *et al.* Effect of electric arc and ladle furnace slags on the strength and swelling behavior of cement-stabilized expansive clay. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, Berlim, v. 80, n. 8, p. 6303-6320, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-021-02316-0>. Acesso em: 16 dez. 2024.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Oficina de texto, 2006.

PRADO, R. M. CENTURION, J. F. Alterações na cor e no grau de floculação de um Latossolo Vermelho-Escuro sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 197-203, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/tRGhvmPsp7hGQppQhp8KRFk/?lang=pt&format=html>.

Acesso em: 16 dez. 2024.

PREUSSLER, E. S. **Ensaio Triaxiais Dinâmicos De Um Solo Arenoso**. Orientador: Jacques de Medina. 1978. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE-UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1978.

QUEIROZ, V. S. Avaliação do ciclo de vida de emissão de CO₂ na indústria do cimento: um estudo comparativo entre o cimento LC3 e o cimento Portland composto. 2018. Disponível em: https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UNB-2_7d4fc0715e5e08fe04af004e4ba377f6. Acesso em: 16 dez. 2024.

RAMOS, L. M. Estudo das regiões susceptíveis à movimentos de massa no entorno da Rodovia SP-171, trecho de Guaratinguetá-Cunha. 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/202256>. Acesso em: 13 jul. 2023.

REZENDE, L. B. et al. Influência da utilização de escória de aciaria elétrica primária no módulo de resiliência de solos tropicais: *In*: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 20., 2022, Campinas. **Anais eletrônicos** [...]. Galoá: ABMS – Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2022. pg 1-8. Disponível em: <https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/influencia-da-utilizacao-de-es-coria-de-aciaria-eletrica-primaria-no-modulo-de-re?lang=pt-br>. Acesso em: 16 dez. 2024.

TAKEDA, M. C. **A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista**. Orientador: Alexandre Benetti Parreira. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Área de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TORRES, E. *et al.* Compactação do solo. 1998. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/45533437.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2024.

TRAN, N. Q. *et al.* Improved mechanical and microstructure of cement-stabilized lateritic soil using recycled materials replacement and natural rubber latex for pavement applications. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 347, p. 128547, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822022073>. Acesso em: 16 dez. 2024.

WBCSD (World Business Council for Sustainable Development). **A framework for carbon emissions management along the building and construction value chain**. [2018]. Disponível em: <https://www.wbcd.org/wp-content/uploads/2023/12/A-framework-for-carbon-emissions-management-along-the-building-and-construction-value-chain.pdf>. Acesso em: 5 out. 2024.

ZHOU, M. *et al.* Studies on the volumetric stability and mechanical properties of cement-fly-ash-stabilized steel slag. **Materials**, Basel, v. 14, n. 3, p. 495, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/3/495>. Acesso em: 16 dez.

2024.