



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE CAMPUS FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

LÍVIA INGRID DE OLIVEIRA COSTA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DA UTILIZAÇÃO DO
AGREGADO SIDERÚRGICO BAOSTEEL'S SLAG SHORT FLOW (BSSF) NA
ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.**

FORTALEZA

2023

LÍVIA INGRID DE OLIVEIRA COSTA

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DA UTILIZAÇÃO DO
AGREGADO SIDERÚRGICO BAOSTEEL'S SLAG SHORT FLOW (BSSF) NA
ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.

Dissertação de Mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre. Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Teresa Raquel Lima Farias.

Coorientadora: Profa. Dra. Juceline Batista dos Santos Bastos.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C837a Costa, Livia Ingrid de Oliveira.
ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DA UTILIZAÇÃO DO AGREGADO
SIDERÚRGICO BAOSTEEL SLAG SHORT FLOW (BSSF) NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS. / Livia
Ingrid de Oliveira Costa. - 2023.
143 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental,
Campus Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Teresa Raquel Lima Farias.
Coorientação: Prof. Dr. Juceline Batista dos Santos Bastos.
1. Agregado Siderúrgico BSSF. 2. Estabilização de Solo. 3. Lixiviação. 4. Solubilização. 5. Deformação
Permanente. I. Título.
-



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 , - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

Avaliação

Processo: 23256.013704/2023-41

Interessado: Teresa Raquel Lima Farias

FOLHA DE APROVAÇÃO

LÍVIA INGRID DE OLIVEIRA COSTA

“ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E AMBIENTAL DA UTILIZAÇÃO DO AGREGADO SIDERÚRGICO BAOSTEEL’S SLAG SHORT FLOW (BSSF) NA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS”

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Área de concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 04/10/2023

Profa. Dra. **Teresa Raquel Lima Farias** (Orientadora)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. **Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos**

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. **Iuri Sidney Bessa**

Universidade Federal do Ceará (UFC)



logotipo

Documento assinado eletronicamente por **Iuri Sidney Bessa, Usuário Externo**, em 09/10/2023, às 09:12, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



logotipo

Documento assinado eletronicamente por **Teresa Raquel Lima Farias, Professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 11/10/2023, às 09:23, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



logotipo

Documento assinado eletronicamente por **Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos, Usuário Externo**, em 11/10/2023, às 16:21, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



QRCode
Assinatura

A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **5392966** e o código CRC **08A4832C**.

Dedico a Deus.

Aos meus pais, Socorro e Arruda.

Aos meus avós, *in memoriam*, Rita e Raimundo.

Àqueles privados de educação.

AGRADECIMENTOS

Sou grata ao meu Senhor, pela vida e por sempre estar comigo onde quer que eu vá. E principalmente por não deixar meu emocional derrubar meu racional.

A painho e mainha pela dedicação, educação e por entender meus momentos de ausência. Nunca poderei retribuí-los pela doação da vida e tempo de vocês para comigo. Ao meu irmão favorito, Arruda Costa, por ser meu cuidador, amigo, e por deixar tudo mais leve e mais claro. Vocês são meu porto seguro, amo vocês eternamente.

Ao meu parceiro, ouvinte, ajudante de laboratório, amigo, fazedor de café, Felipe França da Costa, meu esposo dedicado. Obrigada por entender minhas lutas e ser apoio quando eu mais preciso. Essa conquista é nossa. A gente conseguiu! Amo muito você.

Aos vários bolsistas que me ajudaram na sofrida rotina de ensaios, de modo especial e por ordem alfabética: Beatriz Ingrid, Bruna, Carol, Eduardo (LMC), Elias, Erilene, Felipe, Kayllany, Paula, Roberta. Ao Arthur e Carlos por terem se empenhado tanto nos ensaios de compactação. E ao laboratorista Sabóia pelo conhecimento cedido e pelas tapiocas. Obrigada pelos momentos sofridos, mas animados. Vocês são demais!

Aos meus amigos do mestrado que levo para a vida, Paulo Rubens e Jeferson Botelho pelas conversas, trocas e por compartilhar comigo essa vida de luta da pós-graduação. Vocês são especiais para mim.

Aos meus amigos do DNIT, Sandro, João e dr. Abner por me receberem tão bem no segundo lar de vocês e pelas partilhas de conhecimento. Gratidão!

A minha amiga Beatriz Araújo, pelos nossos “Café com Lágrimas”, pelo incentivo e por recarregar minhas energias. A minha amiga de anos, Ellaine Dantas pelo apoio e por estar sempre comigo todos esses anos me aguentando. Ao primo Enzo, Rafa, Bruno, cunhada Manu e sogra Nena, vocês foram fundamentais nessa prova de fogo que é o mestrado. Amo muito vocês.

A minha orientadora, profa Teresa Raquel, onde foi de extrema importância nessa jornada. Sou eternamente grata pelas conversas terapêuticas, pelos puxões de “cabelo”, por me ajudar a crescer como profissional, mas principalmente como ser humano. Obrigada por não desistir de mim, por não me deixar desistir e por ser parte desse tripé, que foi minha orientação. Não sei se a senhora sabe, mas seus impactos atravessam gerações.

A minha segunda orientadora profa Juceline por ser a outra parte do tripé e que foi meu equilíbrio nessa etapa. Obrigada por literalmente lutar como uma guerreira pela ciência

brasileira, pelo apoio intelectual e na busca para realização desse projeto, e principalmente por não desistir de mim e se dedicar tanto em me orientar. Essa conquista é nossa. Só posso retribuí-las com a minha gratidão e repassar a gentileza para os meus futuros orientandos. Vocês são exemplos de mulheres espetaculares. Deus vos pague!

Ao professor Lucas Babadopulos e ao professor Iuri Bessa pelas contribuições durante a elaboração desta pesquisa e por aceitarem participar da banca de defesa. Muito obrigada!

A ArcelorMittal pela doação da escória, em nome de Leonardo, e pelo apoio financeiro para realização dos ensaios ambientais através de projeto de pesquisa. A SR Refratários Ltda, empresa parceira da ArcelorMittal, na pessoa do Luciano.

A UFC pela realização dos ensaios triaxiais no Laboratório de Solos do LMP. Em especial ao laboratorista Assis Franco, pela realização da caracterização do solo e por ser meu parceiro nessa vida de laboratório, além das consultorias dadas gratuitamente e dos cafés à tarde. E ao Ricardo por ser esse braço forte nas compactações. Em especial ao Laboratório de raio X pela realização dos ensaios químicos. Sou muito grata. Deus vos pague!

Ao IFCE/PGTGA, meu lar por 8 anos, pelo apoio financeiro, por disponibilizar o laboratório de Mecânica dos Solos para realização dos ensaios e aos professores do programa que contribuíram com conhecimento técnico e científico.

A FUNCAP pelo apoio financeiro através da bolsa de mestrado a mim concedida.

A CNPq e FNDCT/Transporte pelo apoio financeiro e pelo fomento à pesquisa científica.

Ao professor Sasaki, Fernando e Henrique pela ajuda na análise química dos materiais.

Ao professor Guimarães do ITA por fornecer informações sobre tratamento de *shakedown*.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente nessa árdua jornada. Meu muito obrigada a todos. Que Deus vos pague!

"Negar a educação a qualquer ser humano é negar a sua capacidade de alcançar algo significativo e contribuir para o progresso da humanidade."

RESUMO

O Brasil ocupa o 9º lugar como produtor de aço do mundo. Com isso há uma crescente produção de subprodutos gerados pelas indústrias siderúrgicas que precisam de soluções ambientalmente, tecnicamente e economicamente viáveis. A substituição de agregados naturais não renováveis apresenta-se como alternativa em potencial contribuindo para a redução de problemas de depósitos de resíduos dessa natureza. Nesse contexto, esta pesquisa analisa a viabilidade técnica e ambiental do emprego de agregado siderúrgico tratado pelo processo BSSF (*Baosteel's Slag Short Flow*) em camadas granulares de pavimentos como agente estabilizante de solo. Para isso, empregou-se um solo natural (SN) e escória de aciaria tratada pelo processo BSSF. Esta será denominada de agregado siderúrgico (AS) e doada pela única produtora desse tipo de coproduto (BSSF) no ocidente, a ArcelorMittal-Pecém/Ce. Realizou-se a caracterização dos materiais e elaborou-se misturas de AS e SN em teores de 25%, 50% e 75% (em relação à massa de solo). Realizou-se ensaios de granulometria, densidade real dos grãos, limites de consistência e equivalente de areia e aplicação da metodologia miniatura compactado tropical. Executou-se, ainda, ensaios de compactação, determinação de Índice de Suporte Califórnia (ISC), módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP). O SN foi classificado como A-4 (solo siltoso) e o AS como A-1-a (pedra britada). O incremento de agregado siderúrgico ao solo favoreceu um expressivo aumento de suporte mecânico quando comparado ao SN, com valor de ISC de 109,3% para a mistura SN25+AS75 *versus* ISC de 15,5% obtido para o SN. Quanto ao MR dos materiais, todos foram superiores na energia modificada e a amostra com maior valor foi a M2 – M (SN50+AS50), com 931MPa. Considerando as especificações vigentes, apresentadas nesta dissertação e os valores médios de MR obtidos, o solo e todas as misturas atingiram o valor mínimo de 300 MPa, para aplicação em camadas granulares de base e sub-base de pavimentos nas energias de compactação avaliadas. Quanto às deformações permanentes (DP) dos materiais, avaliou-se a ocorrência de acomodamento ou *shakedown* e aplicação de modelo matemático de previsão de comportamento. Observou-se níveis de comportamento do tipo A (acomodamento plástico inicial) e do tipo AB (deformações iniciais seguidas de acomodamento plástico). As análises mineralógicas por fluorescência de raio X do agregado siderúrgico indicaram a predominância de óxido de cálcio (CaO), hematita (Fe₂O₃) e sílica (SiO₂), explicando o aumento de resistência com a adição do AS, pois a predominância desses óxidos proporcionou também uma estabilização química dos solos. E no solo, a predominância de hematita (Fe₂O₃), sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) e nas misturas a composição química dos dois materiais. As análises por difração de Raio X reforçaram a composição química dos materiais com presença de óxido de ferro, sílica e carbonato de cálcio, demonstradas pelos picos mais altos. Classificou-se os materiais como resíduo classe II - Não Perigoso e classe II-A (resíduo não inerte). Diante dos resultados obtidos, a avaliação técnica e ambiental do material indicou potencial satisfatório do agregado siderúrgico BSSF quando empregado na estabilização de solo com fins de aplicação em camadas granulares de pavimentos.

Palavras-chave: Agregado Siderúrgico BSSF, Estabilização de Solo, Lixiviação; Solubilização; Deformação Permanente.

ABSTRACT

Brazil ranks 9th in the world as a steel producer. Consequently, there is a growing production of byproducts generated by steel industries that require environmentally, technically, and economically viable solutions. The substitution of non-renewable natural aggregates presents itself as a potential alternative, contributing to the reduction of waste deposits of this nature. In this context, this research examines the technical and environmental feasibility of using BSSF (Baosteel's Slag Short Flow) treated steel aggregate in granular pavement layers as a soil stabilizing agent. For this purpose, natural soil (NS) and steel slag treated by the BSSF process were employed. This will be referred to as steel aggregate (SA) and was donated by the only producer of this type of co-product (BSSF) in the Western hemisphere, ArcelorMittal-Pecém/Ce. The materials were characterized, and mixtures of SA and NS were prepared at ratios of 25%, 50%, and 75% (by soil mass). Granulometry tests, grain real density, consistency limits, sand equivalent, and miniature tropical compacted methodology were performed. Additionally, compaction tests, California Bearing Ratio (CBR) determination, resilience modulus (MR), and permanent deformation (PD) tests were conducted. The NS was classified as A-4 (silt soil), and the SA as A-1-a (crushed stone). The addition of steel aggregate to the soil favored a significant increase in mechanical support compared to NS, with a CBR value of 109.3% for the SN25+AS75 mixture compared to a CBR of 15.5% for NS. As for the MR of the materials, all were higher at modified energy, with the highest value observed for M2 - M (SN50+AS50) at 931MPa. Considering the current specifications presented in this dissertation and the average MR values obtained, both the soil and mixtures met the minimum value of 300 MPa for use in granular base and sub-base layers of pavements at the evaluated compaction energies. Regarding the permanent deformations (PD) of the materials, the occurrence of accommodation or *shakedown* and the application of a mathematical prediction model of behavior were evaluated. Behavior levels of type A (initial plastic accommodation) and type AB (initial deformations followed by plastic accommodation) were observed. X-ray fluorescence analyses of the steel aggregate indicated the predominance of calcium oxide (CaO), hematite (Fe₂O₃), and silica (SiO₂), explaining the increase in strength with the addition of SA, as the predominance of these oxides also provided chemical stabilization of the soils. In the soil, there was a predominance of hematite (Fe₂O₃), silica (SiO₂), and alumina (Al₂O₃), and in the mixtures, the chemical composition of both materials. X-ray diffraction analyses reinforced the chemical composition of the materials with the presence of iron oxide, silica, and calcium carbonate, as indicated by the highest peaks. The materials were classified as Class II - Non-Hazardous Waste and Class II-A (non-inert waste). Based on the results obtained, the technical and environmental assessment of the material indicated satisfactory potential for the BSSF steel aggregate when used in soil stabilization for application in granular pavement layers.

Keywords: BSSF Steel Slag Aggregate, Soil Stabilization, Leaching, Solubilization, Permanent Deformation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produção de aço pelos fornos elétricos a arco (EAF).	29
Figura 2 – Processo de fabricação de aço pelo conversor a oxigênio.	30
Figura 3 – Divisão simplificada das escórias siderúrgicas.	31
Figura 4 – Processo de fabricação da escória de aciaria LD BSSF.	36
Figura 5 – Local de coleta do solo.	62
Figura 6 – Coleta do agregado siderúrgico (a) e amostra dos grãos (b).	63
Figura 7 – Fluxograma das etapas do programa experimental da pesquisa.	63
Figura 8 – Secagem do solo natural (a) e do agregado siderúrgico (b) coletados.	65
Figura 9 – Lavagem (a) e peneiramento (b) do agregado siderúrgico	66
Figura 10 – Densidade real dos grãos do AS: pesagem (a) e banho-maria (b).	67
Figura 11 – Ensaio de equivalente do agregado (a) e (b).	67
Figura 12 – Preparação de amostra - ensaio de mini-MCV.	68
Figura 13 – Ensaio de perda por imersão.	69
Figura 14 – CP em permeâmetro (a) e ensaio a carga variável (b).	70
Figura 15 – Ensaio de ISC com CP em tanque (a) e em prensa (b).	72
Figura 16 – Triaxial de carga repetida, ensaio de MR.	73
Figura 17 – Ensaio de lixiviação (a), solubilização (b), filtração (c) e determinação de mercúrio (d).	76
Figura 18 – Curva granulométrica do solo natural.	79
Figura 19 – Curvas granulométricas das misturas.	80
Figura 20 – Gráfico de classificação MCT.	82
Figura 21 – Ensaio de equivalente	84
Figura 22 – Coeficiente de permeabilidade, k (cm/s) e classificação quanto a permeabilidade.	86
Figura 23 – Classificação de solos quanto ao coeficiente de permeabilidade.	87
Figura 24 – Curvas de compactação das misturas estudadas.	89
Figura 25 – Tentativa de ensaio de compactação do agregado (a)	91
Figura 26 – Dados de ISC dos materiais compactados nas duas energias.	92
Figura 27 – Dados de Expansão dos materiais.	93
Figura 28 – Gráfico com valores de MR dos materiais analisados.	98
Figura 29 – CPs após ensaio de MR na energia intermediária (a) e modificada (b).	99
Figura 30 – MR medido versus MR modelado em função de σ_3 e σ_d	100

Figura 31 – MR medido <i>versus</i> MR modelado modelo composto.	101
Figura 32 – Superfícies dos materiais obtidas com aplicação do modelo composto.....	102
Figura 33 – Deformação permanente (%) <i>versus</i> número de ciclos.	107
Figura 34 – Gráficos pares de tensões ($\sigma_3 \times \sigma_d$, 120×240) e ($\sigma_3 \times \sigma_d$, 120×360).....	108
Figura 35 – Deslocamento no final do ensaio de DP.....	109
Figura 36 – Análise do acomodamento (<i>shakedown</i>) (Taxa de Acréscimo da Deformação Permanente × Deformação Permanente Vertical Acumulada).....	111
Figura 37 – Pesquisa de ocorrência de <i>shakedown</i> do solo natural (SN).....	112
Figura 38 – Pesquisa de ocorrência de <i>shakedown</i> da amostra M1 (SN75+AS25).....	113
Figura 39 – Pesquisa de ocorrência de <i>shakedown</i> da amostra M2 (SN50+AS50).....	114
Figura 40 – Pesquisa de ocorrência de <i>shakedown</i> da amostra M3 (SN25+AS75).....	115
Figura 41 – Representação dos óxidos predominantes dos materiais.....	117
Figura 42 – Difratoograma de Raio X do agregado siderúrgico.	119
Figura 43 – Difratoograma de Raio X do solo.	119
Figura 44 – Difratoograma de raio X das misturas M1, M2 e M3.	120
Figura 45 – Parâmetros inorgânicos obtidos pelo ensaio de solubilização que apresentaram valores excedentes.....	125

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Amostras de escórias de cinco estados brasileiros.	40
Quadro 2 – Características e aplicações de escórias de aciaria.	43
Quadro 3 – Normas aplicadas a coprodutos siderúrgicos para pavimentação.	53
Quadro 4 – Faixa Granulométrica de Acerita® para base.	55
Quadro 5 – Faixa Granulométrica do Solo.....	55
Quadro 6 – Faixas Granulométricas das misturas (ACERITA® + Solo) camada de base.	56
Quadro 7 – Faixa granulométrica para agregado siderúrgico.....	57
Quadro 8 – Faixas granulométricas para misturas de solo-agregado para base rodoviária. ...	58
Quadro 9 – Faixa granulométrica exigida para Açobrita®.	59
Quadro 10 - Parâmetros exigidos em DNER 262 (DNER, 1994).	104
Quadro 11 – Parâmetros exigidos em DNIT 115 (DNIT, 2009) para camada de base.....	104
Quadro 12 – Parâmetros exigidos em DNIT 114 (DNIT, 2009) para camada de sub-base..	105
Quadro 13 – Parâmetros exigidos em DNIT 406 (DNIT, 2017) para camada de base.....	105
Quadro 14 – Parâmetros exigidos em DNIT 407 (DNIT, 2017) para camada de sub-base..	105

Quadro 15 – Parâmetros exigidos em NBR 16364 (ABNT, 2015) para camada de base e sub-base.....	105
---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição de óxidos nas escórias de aciaria LD e EAF.	33
Tabela 2 – Composição química de escórias de aciaria LD no Brasil.	33
Tabela 3 – Composição química de escórias de aciaria LD pelo processo BSSF.	37
Tabela 4 – Estudos anteriores sobre escória de aciaria em camadas de pavimentos.	46
Tabela 5 – Resumo dos parâmetros exigidos em DNER 262 (DNER, 1994).	54
Tabela 6 – Resumo dos parâmetros exigidos por DNIT 115 (DNIT, 2009b).	56
Tabela 7 – Parâmetros necessários para uso de misturas de Acerita®.	57
Tabela 8 – Parâmetros exigidos pela NBR 16.364 (ABNT, 2015).	58
Tabela 9 – Parâmetros apresentados em DNIT 406/2017 (DNIT, 2017a).	60
Tabela 10 – Parâmetros para uso de Açobrita®.	60
Tabela 11 – Normas de referência para a realização dos ensaios.	64
Tabela 12 – Equações dos modelos empregados para análise de MR.	74
Tabela 13 – Pares de tensões empregados.	75
Tabela 14 – Dados Classificação-MCV.	81
Tabela 15 – Comparativo entre os sistemas de classificação de solos.	82
Tabela 16 – Dados geotécnicos do solo e do agregado.	85
Tabela 17 – Classificação dos materiais quanto a permeabilidade.	87
Tabela 18 – Dados de umidade ótima (Hót) e de massa.	89
Tabela 19 – Dados dos modelos empregados para MR.	96
Tabela 20 – Parâmetros do modelo de Guimarães (2009).	110
Tabela 21– Dados de óxidos presentes nos materiais obtidos por FRX.	116
Tabela 22 - Parâmetros Inorgânicos obtidos no ensaio de lixiviação comparativamente a outros estudos com AS.....	121
Tabela 23 – Outros orgânicos avaliados no ensaio de lixiviação.	122
Tabela 24 – Parâmetros de solubilização das amostras.	123
Tabela 25 – Parâmetros Inorgânicos e VPMs verificados no ensaio de solubilização.	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AS	Agregado siderúrgico
BSSF	Baosteel's Slag Short Flow
C _c	Coeficiente de curvatura
CP	Corpo de prova
C _u	Coeficiente de uniformidade
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagens
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DP	Deformação permanente
EA	Equivalente de areia
EAF	Eletric Arc Furnace
FRX	Fluorescência de Raio X
I	Intermediária
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
IP	Índice de plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
k	Coeficiente de permeabilidade
LD	Linz-Donawitz
LL	Limite de liquidez
LMS	Laboratório de Mecânica dos Solos
LP	Limite de plasticidade
M	Modificada
MCT	Mini compactado tropical
MEAS _{máx}	Massa Específica Aparente Seca Máxima
MR	Módulo de resiliência
NBR	Norma brasileira
NUTEC	NUTEC Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará

RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
SN	Solo natural
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TRB	Transportation Research Board
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
As	Arsênio
Ba	Bário
Ca ₂ Fe ₂ O ₅	Cálcio ferrita
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CaFeO ₃	Carbonato de ferro
CaO	Óxido de Cálcio
Cd	Cádmio
Cl	Cloro
Co ₂ O ₃	Óxido de cobalto III
Cr	Cromo total
Cr ₂ O ₃	Oxido de cromo III
Cu	Cobre
Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro III
FeO	Óxido de Ferro
Hg	Mercurio
K ₂ O	Óxido de potássio
KAlSi ₃ O ₈	Ortoclásio
LQ	Limites de Quantificação
MgO	Óxido de magnésio
Mn	Manganês
MnO	Óxido de manganês
Na	Sódio
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
Pb	Chumbo
Se	Selênio
SiO ₂	Dióxido de Silício
SO ₃	Óxido sulfúrico
TiO ₂	Dióxido de titânio
VMP	Valor máximo permitido

Zn	Zinco
ZnO	Óxido de zinco
ZrO ₂	Dióxido de zircônio
σ_3	Tensão confinante
σ_d	Tensão desvio
ψ	Coefficiente de regressão
ε_p^{esp}	Deformação específica plástica ou permanente acumulada

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	23
1.1.	Objetivos	24
1.1.1.	<i>Objetivo Geral</i>	24
1.1.2.	<i>Objetivos Específicos.....</i>	25
1.2.	Estrutura da Dissertação	25
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1.	Fabricação do Aço.....	26
2.1.1.	<i>Preparação da carga</i>	26
2.1.2.	<i>Redução</i>	27
2.1.3.	<i>Refino (aciaria)</i>	27
2.1.4.	<i>Laminação e Lingotamento.....</i>	27
2.2.	Tipos de Fornos para Produção do Aço e Geração de Escória	28
2.2.1.	<i>Forno Elétrico a Arco – EAF (Electric Arc Furnace)</i>	28
2.2.2.	<i>Forno LD (Linz – Donawitz) ou BOF (Blast Oxygen Furnace)</i>	29
2.3.	Característica das Escórias de Aciaria.....	30
2.3.1.	<i>Características Químicas e Mineralógicas</i>	32
2.3.2.	<i>Características Físicas</i>	34
2.3.3.	<i>Tecnologia de Processamento da Escória de Aciaria LD BSSF</i>	35
2.4.	Avaliação Ambiental de Escórias e Resíduos.....	37
2.5.	Aplicações das Escórias de Aciaria	43
2.6.	Escória de Aciaria Aplicada em Pavimentação	44
2.7.	Avaliação do Módulo de Resiliência e da Deformação Permanente de Resíduos e Solos Estabilizados com Resíduos	47
2.8.	Normativas de Resíduos Siderúrgicos Quanto à Aplicação em Pavimentação.....	53
2.8.1.	<i>Escória de aciaria para pavimentos rodoviários - DNER 262 (DNER, 1994b)</i>	54
2.8.2.	<i>Pavimentação rodoviária – Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria – ACERITA® – ES - DNIT 114 (DNIT, 2009a) e</i>	

	<i>Pavimentação rodoviária – Base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria – ACERITA® – ES - DNIT 115 (DNIT, 2009b).....</i>	<i>54</i>
2.8.3.	<i>Execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária – Procedimento - NBR 16364/2015 (ABNT, 2015).....</i>	<i>57</i>
2.8.4.	<i>Pavimentação rodoviária – Base estabilizada granulometricamente com Açobrita® – ES - DNIT 406 (DNIT, 2017a) e Pavimentação Rodoviária – Sub-base Estabilizada Granulometricamente com Açobrita® - DNIT 407 (DNIT, 2017b)</i>	<i>58</i>
2.9.	Considerações Finais.....	61
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1.	Materiais Utilizados	62
3.1.1.	Solo	62
3.1.2.	Agregado Siderúrgico pelo Processo BSSF	62
3.2.	Métodos Empregados.....	63
3.2.1.	Preparação das Amostras de Solo Natural (SN) e Agregado Siderúrgico (AS) 64	
3.2.2.	Caracterização Física do Solo, Agregado Siderúrgico e Misturas	65
3.2.2.1.	<i>Análise Granulométrica, Limites de Consistências e Densidade Real dos Grãos</i>	<i>65</i>
3.2.2.2.	<i>Equivalente de Areia.....</i>	<i>67</i>
3.2.2.3.	<i>Ensaio de Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão - Classificação MCT.....</i>	<i>68</i>
3.2.2.4.	<i>Ensaio de Permeabilidade.....</i>	<i>69</i>
3.2.3.	Ensaos de Caracterização Mecânica.....	71
3.2.3.1.	<i>Resistência à Abrasão.....</i>	<i>71</i>
3.2.3.2.	<i>Compactação e ISC dos Materiais e das Misturas.....</i>	<i>71</i>
3.2.3.3.	<i>Módulo de Resiliência.....</i>	<i>73</i>
3.2.3.4.	<i>Deformação Permanente.....</i>	<i>74</i>
3.2.4.	Ensaos de Caracterização Química.....	76
3.2.4.1.	<i>Extrato Lixiviado e Solubilizado</i>	<i>76</i>
3.2.4.2.	<i>Fluorescência de Raio X (FRX) e Difração de Raio X (DRX).....</i>	<i>77</i>
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	78
4.1.	Caracterização Física dos Materiais	78
4.1.1.	Caracterização e Classificação dos Materiais	78

4.2.	Análise da Caracterização Mecânica do Solo, Agregado Siderúrgico e Misturas.....	87
4.2.1.	<i>Ensaio de Abrasão Los Angeles</i>	87
4.2.2.	<i>Ensaio de Compactação</i>	88
4.2.3.	<i>Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão (E).....</i>	91
4.2.4.	<i>Módulo de Resiliência</i>	95
4.2.5.	<i>Deformação Permanente</i>	106
4.3.	Análise da Caracterização Química	115
4.3.1.	<i>Fluorescência de Raio X (FRX) e Difração de Raio X (DRX)</i>	115
4.3.2.	<i>Análise Ambiental.....</i>	120
4.3.2.1.	<i>Ensaio de Lixiviação - NBR 10.005 (ABNT, 2004b)</i>	120
4.3.2.2.	<i>Ensaio de Solubilização</i>	122
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	128
5.1.	Principais Conclusões	128
5.2.	Sugestões para Estudos Futuros	132
	REFERÊNCIAS	133

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o 9º maior produtor mundial de aço, segundo dados levantados pelo Instituto Aço Brasil para o ano de 2021, em ranking liderado pela China. Existem no país 31 usinas distribuídas em 10 estados brasileiros. O setor siderúrgico possui relevância econômica para o país, pois gera riquezas, além de empregar aproximadamente 120 mil pessoas somente em 2021 (IABR, 2022).

Entretanto, como outros sistemas produtivos, as indústrias siderúrgicas geram quantidades significativas de resíduos e subprodutos que exigem um olhar mais atento quanto à destinação ou reutilização desses. De acordo com dados do Instituto Aço Brasil (2022), o país produziu no ano de 2022, na pandemia da COVID-19, aproximadamente 34,1 milhões de toneladas de aço bruto.

Segundo dados da Companhia Siderúrgica do Pecém, atual ArcelorMittal unidade Pecém, localizada no estado do Ceará, para cada tonelada de aço líquido processado são gerados 100 a 150 kg de escórias de aciaria como resíduos (CSP, 2022). Isso representa aproximadamente 4,2 milhões de toneladas de subprodutos produzidos no país apenas no ano de 2022. Em relação à produção da ArcelorMittal Pecém de 2,8 milhões de tonelada em 2022, isso representa cerca de 350 mil toneladas de resíduo de aciaria em um ano.

Esses coprodutos são depositados empilhados em pátios dentro das próprias siderúrgicas e, embora dispostos de forma correta, do ponto de vista ambiental, esses ocupam grandes espaços, causando alterações no relevo, além de passíveis à erosão, quando não controlados, contribuindo para contaminação e assoreamento dos cursos d'água (Medeiros, 2019). O conceito dos 4Rs da sustentabilidade (repensar, reduzir, reutilizar e reciclar) busca a implantação de práticas que diminuam a produção de resíduos ou que seja feita uma destinação adequada que favoreçam a preservação do meio ambiente e o desenvolvimento sustentável. O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE, 2010) afirma que a mudança somente será representativa quando o modelo de tratamento dos resíduos passar a ter os mesmos controles que a siderurgia tem na produção do ferro/aço. Dessa forma, haverá uma geração de subprodutos com menor variação de padrão e com um valor agregado ainda maior.

Assim, de acordo com a CSP (2022), o processo tecnológico de tratamento do agregado siderúrgico, denominado BSSF (*Baosteel's Slag Short Flow*) é inédito no Brasil e a técnica ocorre com a escória líquida basculada em tambor rotativo, e em seguida após o resfriamento, é dividida em materiais metálicos e não metálicos (resultando em 144 mil toneladas por ano do

agregado siderúrgico BSSF). Dessa forma, agrega valor ao coproduto, podendo ser empregado como agregado na construção civil ou em camadas de pavimentos.

No Brasil, estudos anteriores relatam o emprego de escória de aciaria LD (Linz e Donawitz) obtida pelo processamento BSSF como agregado para fabricação de blocos de concreto (Maciel, Sousa & Cabral, 2020; Benitez *et al.*, 2022); Em agamassa (Amancio *et al.*, 2020; Amancio *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2019), em concreto (Dias *et al.*, 2020). Entretanto, há carência de estudos que avaliem a aplicabilidade da escória de aciaria BSSF para o melhoramento de solos com fins de utilização em camadas de pavimentos, além da avaliação ambiental desse uso, com vistas a contribuir para a redução de impactos sobre o meio ambiente, inerentes ao setor da construção civil, que além de gerar resíduos também consome elevada quantidade de materiais naturais não renováveis por meio da exploração de jazidas.

É importante ressaltar que existem projetos em desenvolvimento no Ceará que investigam conhecer as características e incorporação de agregado siderúrgico BSSF. A siderúrgica ArcelorMittal Pecém, fabricante da escória BSSF, em parceria com a Universidade Federal do Ceará (UFC) juntamente com Instituto Federal do Ceará (IFCE), financiam a promoção de pesquisas científicas com objetivo de substituir agregados naturais não renováveis por coprodutos siderúrgicos. Há ainda o projeto chamado Universal 2021, coordenado pela professora doutora Juceline Bastos, financiado pelo CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) em parceria com IFCE e UFC. Esse projeto, em andamento, busca incorporar fileres de diversos resíduos, assim como o agregado siderúrgico, na área de pavimentação, além da caracterização desses fileres comparados a fileres tradicionais.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral contribuir com a preservação do meio ambiente e o desenvolvimento sustentável por meio da avaliação técnica e ambiental do efeito do agregado siderúrgico (AS), oriundo do processo BSSF (*Baosteel's Slag Short Flow*), na estabilização de solos com fins de aplicação em camadas de pavimentos rodoviários, através de ensaios mecânicos, físico-químicos e ambientais.

1.1.2. Objetivos Específicos

São objetivos específicos desta pesquisa:

- Comparar química, mecânica e fisicamente a incorporação de diferentes percentuais de agregado siderúrgico (AS) pelo processo BSSF a um solo usualmente aplicado na pavimentação do Ceará;
- Avaliar ambientalmente as amostras de solo, agregado e as misturas solo-agregado siderúrgico por meio de classificação de resíduos sólidos;
- Avaliar a viabilidade do agregado siderúrgico oriundo do processo BSSF, solo e misturas solo-agregados siderúrgicos a partir de critérios normativos com foco em subcamadas de pavimentos.

1.2. Estrutura da Dissertação

A estrutura da dissertação está organizada, além deste capítulo 1, denominado de Introdução, de outros quatro capítulos.

O capítulo 2 é constituído de revisão bibliográfica acerca do tema da pesquisa. Apresenta-se a geração das escórias de aciaria a partir do aço; estudos sobre algumas das aplicações de escória de aciaria realizados no Brasil e no mundo que abordam sobre o tema e explanação sobre a origem do agregado siderúrgico BSSF. É apresentado, ainda, um apanhado de estudos que abordam as características físico-químicas, mecânicas e ambientais sobre as escórias de aciaria.

No capítulo 3, são apresentados os materiais utilizados na pesquisa, como o agregado siderúrgico e o solo natural, e os métodos empregados para realização dos ensaios.

O capítulo 4 traz os resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica, físico-química e ambiental, além das discussões referentes aos dados obtidos em laboratório.

As conclusões a respeito do estudo são apresentadas no capítulo 5 através de uma síntese crítica tomando por base os objetivos iniciais. Neste capítulo também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Fabricação do Aço

A produção de aço líquido é dividida em três processos que se caracterizam pelo emprego de três tipos de fornos de refino: o conversor a oxigênio (Linz e Donawitz – LD ou *Blast Oxygen Furnace* – BOF), o forno elétrico a arco (EAF – *Electric Arc Furnace*) e o forno Siemens-Martin (OH – Open Heart) (Carvalho *et al.*, 2015). Entretanto, atualmente este último está em desuso nas siderúrgicas (Ferreira *et al.*, 2002). Dessa forma, serão abordado apenas os dois tipos de fornos mais empregados, LD e EAF. No cenário internacional, aproximadamente 2/3 da produção mundial de aço é em aciaria LD. Mesmo com a adesão a fornos elétricos a arco de muitas indústrias integradas a coque, os conversores a oxigênio ainda são os equipamentos mais frequentes neste tipo de usina. Já no contexto nacional, a média de 75% da produção de aço bruto são oriundos de conversores a oxigênio (CGEE, 2010). Já a *Worldsteel Association* (Wordsteel, 2023) afirma que cerca de 30% do aço é produzido é originado de forno elétrico.

Masuero *et al.* (2004) explicam que a escória pode ser gerada tanto na fusão redutora dos minérios na fabricação do ferro-gusa, como na produção do aço, dando origem às escórias de alto-forno e de aciaria, respectivamente. Segundo Freitas (2018), no passado, a escória foi classificada como um resíduo sólido, entretanto países como Estados Unidos e Canadá passaram a adotar a classificação da escória como um coproduto da indústria siderúrgica. Ou seja, antes esse material era totalmente descartado, sem utilização prática, agora como coproduto, o material se tornou um produto com valor de mercado agregado passando a ter utilidade prática.

O sistema de fundição do aço é composto de diversas etapas, que resumidamente, se divide em: carregamento do conversor, aciaria e formação do aço líquido e de escória. Por fim, é feito o lingotamento do aço, onde são transformados em barras ou chapas contínuas ou conforme demanda. A escória é o material que boia sobre o aço líquido após a fundição (Pedrosa, 2010). As etapas de forma geral são descritas na sequência.

2.1.1. Preparação da carga

Na etapa de preparação das cargas, a maior parte do minério de ferro, especificamente os finos, são aglomerados empregando-se cal e finos de coque. O material formado é o sinter e o carvão é processado na coqueria e transforma-se em coque (IAB, 2023).

2.1.2. Redução

Na redução, as matérias-primas são preparadas e carregados no alto forno. O oxigênio é então aquecido a alta temperatura e soprado pela parte de baixo do alto forno. Ao entrar em contato com o oxigênio, o carvão produz calor, dessa forma a carga metálica é fundida e inicia-se o processo de redução do minério de ferro que é transformado em metal líquido, chamado de ferro-gusa (liga de ferro e carbono) (IAB, 2023). Para a produção do ferro-gusa é comum a utilização de carvão vegetal ou a coque ou o gás natural para a redução no minério. Nessa etapa, o ferro-gusa ainda contém algumas impurezas que necessitam ser retiradas como fósforo, enxofre e sílica. Existem empresas que são chamados de “guseiros” pois produzem gusa e fornecem para as indústrias siderúrgicas, mas não fabricam aço (IABr, 2010).

2.1.3. Refino (aciaria)

A aciaria é a unidade de uma usina siderúrgica que tem como função produzir aço em forma de produtos semiacabados (Silva *et al.*, 2016). É nessa fase que o ferro-gusa é convertido em aço líquido ou a sucata de ferro e aço também é convertida em aço líquido através de fornos a oxigênio ou fornos elétricos. Nesse momento parte do carbono presente no ferro-gusa é removido junto com impurezas. Em seguida o aço líquido é solidificado e feito o lingotamento contínuo para produção de produtos semiacabados, lingotes etc. (IABr, 2010).

2.1.4. Laminação e Lingotamento

O processo de laminação é definido como sendo a conformação do aço sólido que passa entre dois cilindros que giram com a mesma velocidade periférica, mas em sentidos contrários, ocasionando a redução da secção transversal e no aumento do comprimento. E o lingotamento é o processo que lida ainda com o aço em estado líquido, onde o objetivo é solidificar o aço na forma desejada e que possa ser utilizado nas etapas seguintes do sistema produtivo (Mourão *et al.*, 2007).

2.2. Tipos de Fornos para Produção do Aço e Geração de Escória

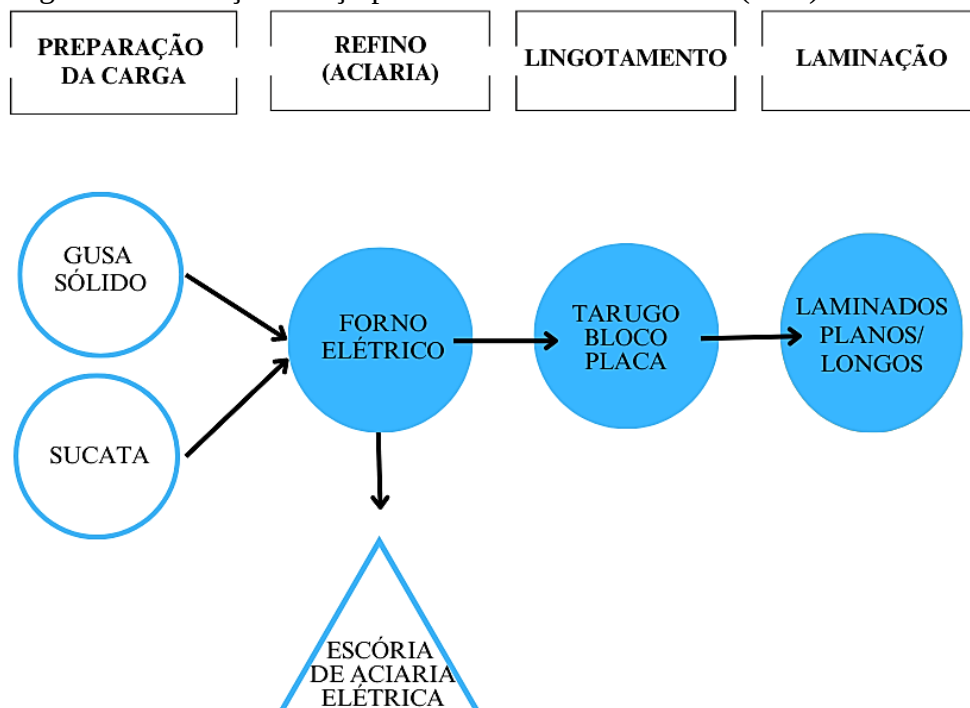
2.2.1. Forno Elétrico a Arco – EAF (*Electric Arc Furnace*)

No ano de 1878 W. Von Siemens patenteou um forno a arco indireto construído com dois eletrodos. Esses eletrodos formavam um arco sobre a carga que aquecia a carga por irradiação. Já em 1899, Heroult patenteou um forno elétrico a arco direto e só em 1909 que o forno elétrico trifásico surgiu, o mesmo utilizado nos dias de hoje (Mourão *et al.*, 2007).

Quanto ao processo de carregamento, os eletrodos e a abóboda do forno são movidos lateralmente e os cestões, contendo sucata de ferro e aço ou materiais de retrabalho da própria usina, são posicionados na abertura superior do forno. Essa carga comporta atualmente o ferro gusa como fonte de carbono para auxiliar na fusão da carga e como fonte de energia química (Andrade *et al.*, 2000). De acordo com Buzin (2009) a carga contida nesses cestões é estruturada de acordo com a composição química necessária para atingir um tipo de aço a ser fabricado em específico. Com a finalidade de proteger o fundo do forno, mantém-se uma lâmina de metal líquido no fundo em cada ciclo de fusão.

Objetivando ajuste da composição química desejada, aditivos ainda podem ser utilizados, além da energia elétrica que pode ser complementada com oxigênio injetado no forno elétrico. As etapas de processamento posteriores, como lingotamento, reaquecimento e laminação, são similares com as do forno a oxigênio (Wordsteel, 2023). A Figura 1 mostra o fluxograma simplificado do processo de produção de aço pelos fornos elétricos a arco.

Figura 1 – Produção de aço pelos fornos elétricos a arco (EAF).



Fonte: A autora (2023).

Na fabricação de aço EAF, ocorre a fusão de sucatas, onde em seguida injeta-se oxigênio com objetivo de promover as reações de carbono, fósforo e silício. Por fim, são adicionados CaO e MgO para facilitar as reações de refino que dão origem à escória de aciaria, por sua vez formada por silicatos e óxidos (Polese *et al.*, 2006).

2.2.2. Forno LD (Linz – Donawitz) ou BOF (Blast Oxygen Furnace)

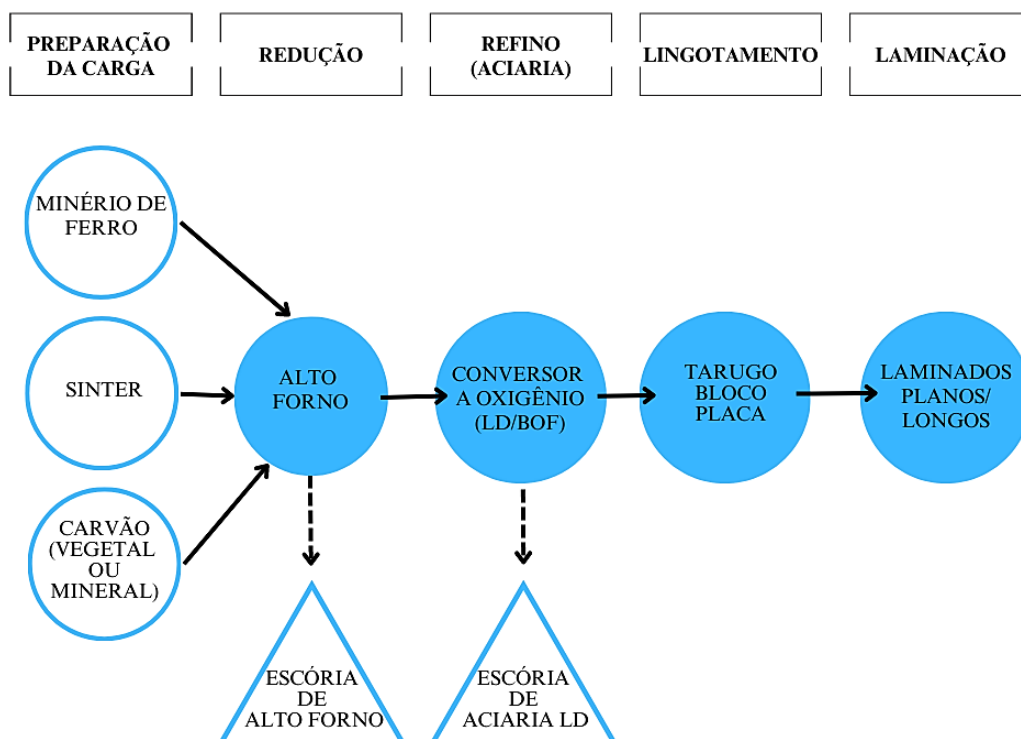
No ano de 1949, uma aciaria com convertedor de 30 toneladas foi instalada na cidade de Linz, e operação iniciada em novembro de 1952. No ano seguinte, 1953, uma aciaria com capacidade semelhante entrou em operação na cidade de Donawitz. Logo, 1952 é considerado um marco para o processo de refino com convertedores LD, tendo o nome como homenagem as duas cidades austríacas de Linz e Donawitz. Após isso outras usinas entraram em atividade em todo o mundo, mesmo com o acentuado desenvolvimento do processo, seus princípios básicos praticamente não mudaram (Rizzo, 2006).

Segundo Mourão *et al.* (2007), o processo LD foi introduzido no Brasil por meio da Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, onde a aciaria LD da usina de Monlevade entrou em funcionamento no ano de 1957. Já no ano de 1963, as operações das usinas da Companhia

Siderúrgica Mannesman deram início na cidade de Belo Horizonte e Intendente Câmara da Usiminas em Ipatinga. Dois anos depois, em 1965 a aciaria LD da Cosipa entrou em operação.

De acordo com Gumieri (2002), o processo LD apresenta vantagens como a velocidade de transformar o ferro-gusa em aço, podendo atingir 600 toneladas por hora, bem como a possibilidade de geração de vários tipos de aço. A Figura 2 apresenta o processo de fabricação de aço pelo conversor a oxigênio, mais conhecido como BOF ou LD.

Figura 2 – Processo de fabricação de aço pelo conversor a oxigênio.



Fonte: A autora (2023).

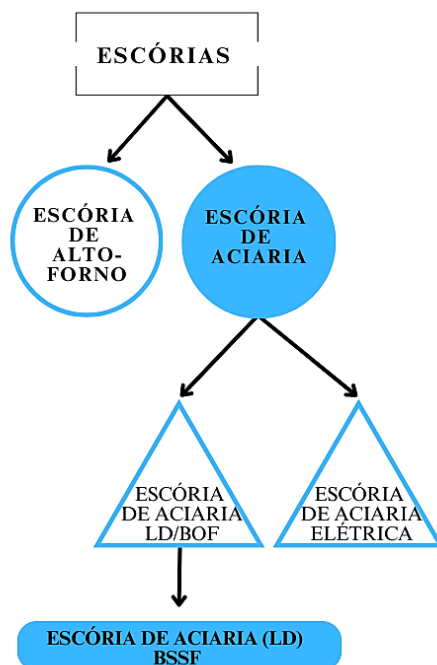
No processamento do aço pelo método LD, logo após a fusão do metal, cal virgem e dolomítica são adicionadas. A cal virgem, juntamente com o oxigênio, faz o papel de eliminar elementos indesejáveis no aço, como por exemplo o carbono, o fósforo e o silício. Já a cal dolomítica é responsável por proteger o refratário. Por último, o aço e a escória são gerados e separados, devido a diferença de densidade (Polese *et al.*, 2006).

2.3. Característica das Escórias de Aciaria

Nos processos de fabricação do aço são gerados diversos tipos de escória. Mundialmente as técnicas mais empregadas são as de fusão e refino (aciaria) de sucata em fornos elétricos a arco e a de refino (aciaria) do ferro-gusa líquido em conversores a oxigênio

(Rohde, 2002; Silva *et al.*, 2016; Freitas, 2018). Mas existem ainda as escórias de alto-forno chamadas de BF (*Blast Furnace*). A Figura 3 apresenta de forma simplificada as divisões das escórias siderúrgicas.

Figura 3 – Divisão simplificada das escórias siderúrgicas.



Fonte: A autora (2023).

Os coprodutos da indústria siderúrgica, de acordo com Sofilic *et al.* (2012), atualmente são utilizados em todos os países industrializados e produtores de aço. Os autores afirmam que a partir do século XX, foram desenvolvidas novas aplicações para a escória siderúrgica para emprego em diversas indústrias. A *Worldsteel Association* (2021) defende que a venda desses coprodutos é economicamente sustentável, gera receitas para os produtores, além de ser benéfico para a economia circular. A associação afirma, ainda, que a taxa mundial média de aproveitamento de escória cerca os 80% para a escória siderúrgica.

Graças às propriedades físicas, mecânicas e químicas, as escórias têm tido diferentes aplicações como agregado na construção civil, fertilizante de solos, no tratamento de águas residuais (Sofilic *et al.*, 2012). Em projetos ousados, como descrito pela *Worldsteel Association* (2020), há a utilização de blocos de concreto com escória implantados no mar como recifes artificiais para fomento de florestas marinhas. E como material para obras rodoviárias (Rohde *et al.*, 2003; Medeiros, 2019; Costa & Santos, 2020; Boldrini & Pacheco, 2022), objetivo do presente estudo.

2.3.1. Características Químicas e Mineralógicas

Masuero *et al.* (2004) afirmam que nas escórias o CaO livre pode se apresentar na forma pura ou em solução sólida com ferro através da equação química: $\text{CaO} + x\% \text{FeO}$, onde $0 < x < 10\%$ em massa. Isso ocorre, pois a escória possui estrutura permeável, o que facilita a passagem de água e CO_2 , favorecendo a reação com o óxido de cálcio livre presente.

De acordo com Souza (2016), é inviável utilizar a escória originada de conversores LD não tratada para a produção de cimento, pois a escória precisa de pré-tratamento para estabilização da cal livre, o que pode ocasionar manifestações patológicas por expansão. Assim como no cimento, a expansão é critério determinante para o uso em pavimentação. Isso porque, de acordo com o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), a expansão de materiais para subleito deve ser menor ou igual a 2%, no mínimo, e para sub-base deve ser menor ou igual a 1%. Já para base rodoviária, essa exigência é ainda maior, sendo permitido apenas materiais com expansões menores ou iguais à 0,5% (Brasil, 2006).

Polese *et al.* (2006) afirmam que a aplicação mais expressiva das escórias de aciaria é em bases rodoviárias, entretanto a maior limitação é a expansibilidade e citam que existem tratamentos que podem ser empregados de modo a reduzir esse efeito. A expansão das escórias de aciaria é causada pela hidratação da cal livre (CaO) e periclase (MgO) que não reagiram e que ao entrarem em contato com água, aumentam de volume. Mas a expansibilidade pode estar relacionada também ao polimorfismo do silicato dicálcico (C_2S) e à oxidação e corrosão do ferro metálico (Fe^0) (Boldrini & Pacheco, 2022; Gumieri, 2002). A corrosão do ferro metálico (Fe^0) presente na composição da escória de aciaria provoca a expansão principalmente por causa da mudança do ferro do estado Fe^{+2} para o estado Fe^{+3} , segundo reações com o oxigênio do ar (Sienko, 1968 *apud* Machado, 2000).

Souza (2016) reitera que a reatividade da escória é diretamente influenciada, não somente pela composição química, mas também pela velocidade de resfriamento. Quanto aos processos de resfriamentos das escórias de aciaria, estes se dividem em 3 tipos: resfriamento lento (RL), rápido (RR) e ultrarrápido (UR). O processo RL ocorre quando a escória é deixada ao ar, favorecendo a perda das características hidráulicas dos óxidos, tornando a escória inerte. O resfriamento RR se dá pelo jateamento de água através de aspersores presentes nas baias. Esse procedimento provoca a expansão e aumento da natureza veicular da escória, produzindo um material mais leve podendo ser moído posteriormente. Todo o processo se dá em torno de horas. Já no processo de resfriamento ultrarrápido a escória é basculada dentro de uma baía

com água na proporção de 50 vezes o seu volume. O produto gerado nesse processo é chamado de escória granulada, com baixa cristalização, estrutura porosa e textura áspera, ideal para utilização em pavimentação por facilitar ligações hidráulicas (Baltazar, 2001).

Chesner *et al.* (2002), em seu guia com diretrizes para uso de subprodutos na construção de pavimentos, recomendam que a escória de aciaria destinada ao uso como agregado deve ser estocada ao ar livre por vários meses. Pois esse “envelhecimento” permite que ocorra a hidratação e expansão antes do uso. Porém, os autores mencionam que o tempo de exposição para hidratação dos óxidos expansivos pode girar em torno de 18 meses.

Masuero *et al.* (2004), em seus estudos experimentais sobre escória EAF, observaram que o processo de resfriamento brusco favorecia na redução da expansibilidade. Já Rohde *et al.* (2003) verificaram que a expansão foi reduzida quando deixada a céu aberto por um tempo mínimo de 4 meses. Na Tabela 1 encontra-se composições químicas de óxidos de alguns estudos nacionais e internacionais realizados com escória de aciaria (LD e EAF). Ao analisar o Tabela 1 é possível observar variedade na composição dos dois tipos de escória. Entretanto, é relevante pontuar que os óxidos de CaO, Fe₂O₃ e SiO₂ são os que apresentam maiores parcelas. Em Rizzo (2006) é apresentada uma faixa de composição química com alguns óxidos de escórias de aciaria oriundas do processo LD no Brasil (Tabela 2).

Tabela 1 – Composição de óxidos nas escórias de aciaria LD e EAF.

Estudo	Origem	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cr ₂ O ₃
Melo (2020)	LD-Brasil	36	31	13	3,6	3,7	-	-	-	0,01
Arrivabene <i>et al.</i> (2012)	LD-Brasil	46	-	10	1,5	6	-	2	-	-
Yildirim & Prezzi (2011)	LD-EUA	39	-	12	2,2	2,7	0,1	1	0,4	0,2
Hekal <i>et al.</i> (2013)	EAF-Egito	33	36,80	13,10	5,51	-	-	-	0,60	0,80
Yildirim & Prezzi (2011)	EAF-EUA	48	-	4,6	23	1	0	0,1	0,33	0,37

Fonte: A autora (2023).

Tabela 2 – Composição química de escórias de aciaria LD no Brasil.

Fe (total)	FeO	S	CaO (total)	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	MnO	P ₂ O ₅
14-22	8-12	0,01-0,11	23-47	1-4	11-18	5-13	3-7	1-3

Fonte: Rizzo (2006).

A composição química da escória de aciaria LD é dependente de muitos fatores. Da matéria-prima empregada no processo de fabricação, do material que reveste o conversor, do tipo de aço que é produzido, da forma como se resfria, além de sua armazenagem (Dayrell & Fernandes, 2014).

De acordo com Motz e Geiseler (2001), as escórias oriundas de fornos elétricos (EAF) possuem teores de CaO entre 25 e 40%, em contrapartida as escórias LD apresentam teores que variam entre 42 e 55% indo de encontro à faixa apresentada por Rizzo (2006) na Tabela 1 para as escórias LD.

As escórias de aciaria podem ser oriundas de locais e produtores diferentes, mas suas características quanto à composição química, mineralógica e técnica podem ser consideradas comparáveis (Motz & Geiseler, 2001).

Pellegrino e Gaddo (2009) citam que a presença de óxidos livres de cálcio e magnésio são responsáveis pelos fenômenos de hidratação e de expansão típicos em escórias EAF (pretas, resultante do carregamento a frio de sucata). Isso porque o contato com a água promove a hidratação rápida do óxido de cálcio, causando uma rápida expansão volumétrica. Já o óxido de magnésio possui hidratação lenta, causando uma expansão mais espaçada.

Entretanto, a principal desvantagem do emprego da escória LD, assim como a EAF, é a expansão (instabilidade volumétrica) causada pela hidratação do MgO reativo e do CaO livre. A escória de aciaria LD possui quantidade de partículas consideráveis de aço ou de ferro metálico que ficam grudadas na escória no sopro de oxigênio e que podem contribuir para a expansão desta devido a produção de corrosão e oxidação do ferro metálico residual. A mudança nas formas alotrópicas do silicato dicálcico ou ortosilicato de cálcio (C_2S) também pode ser uma fonte em potencial de instabilidade volumétrica para as escórias LD (Rizzo, 2006).

2.3.2. Características Físicas

Freitas (2018) cita que caracterizar fisicamente a escória de aciaria por meio de ensaios como umidade, granulometria, massa específica, absorção e porosidade aparente permite analisar e determinar qual a aplicação mais adequada. Já Altun e Yilmaz (2002) declaram, em seus estudos laboratoriais e práticos sobre a empregabilidade da escória de aço em construção de estradas, que as principais propriedades a se considerar são: resistência à compressão, resistência ao desgaste e às intempéries, além de estabilidade volumétrica.

Em contrapartida, Motz e Geiseler (2001) elencam algumas das propriedades técnicas mais importantes dos agregados processados e empregados na construção civil, sendo estas: a) densidade aparente; b) forma; c) resistência ao desgaste (resistência ao impacto e esmagamento); d) absorção de água; e) resistência ao congelamento e descongelamento; f) estabilidade de volume; e g) resistência à abrasão.

Melo (2020), em seus estudos sobre emprego de escória de aciaria LD em concretos com baixo volume de cimento, fez um comparativo com as características físicas de areia quartzosa, brita gnaiss e escória. A autora encontrou, para os dados de massa específica ($3,77 \text{ g/cm}^3$), massa unitária ($1,945 \text{ g/cm}^3$) e absorção de água (1,54%), valores maiores para a escória de aciaria em relação aos outros agregados naturais. Esta justificou a maior taxa de absorção, devido a superfície porosa que o coproduto siderúrgico apresenta. Canal *et al.* (2020), ao caracterizar fisicamente três resíduos de rochas ornamentais, escória de aciaria LD e EAF observou a mesma tendência apresentada por Melo (2020) para os parâmetros de escória LD e EAF, respectivamente, para massa específica ($3,33 \text{ g/cm}^3$; $3,40 \text{ g/cm}^3$), massa unitária ($1,52 \text{ g/cm}^3$; $1,42 \text{ g/cm}^3$) e absorção de água (0,86%; 2,09%). Onde os valores dos resíduos foram mais baixos em relação às escórias dos dois tipos. Canal *et al.* (2020) analisaram, ainda, compressão axial e abrasão Los Angeles dos materiais. Os resultados para as escórias foram de 100MPa (LD) e 136 MPa (EAF), quando os resíduos de rocha não ultrapassaram 92 MPa, com corpos de provas feitos com partes grandes de escórias lapidadas até 7 cm. Quanto à abrasão, as escórias tiveram uma perda de massa em torno de 21%, já os resíduos ornamentais excederam os 48% (rocha verde) chegando a 55% (rocha amarela). Entretanto o valor exigido pelo Manual de Pavimentação do DNIT (2006) é de inferior ou igual a 50% de desgaste para as frações graúdas para camadas de base granular.

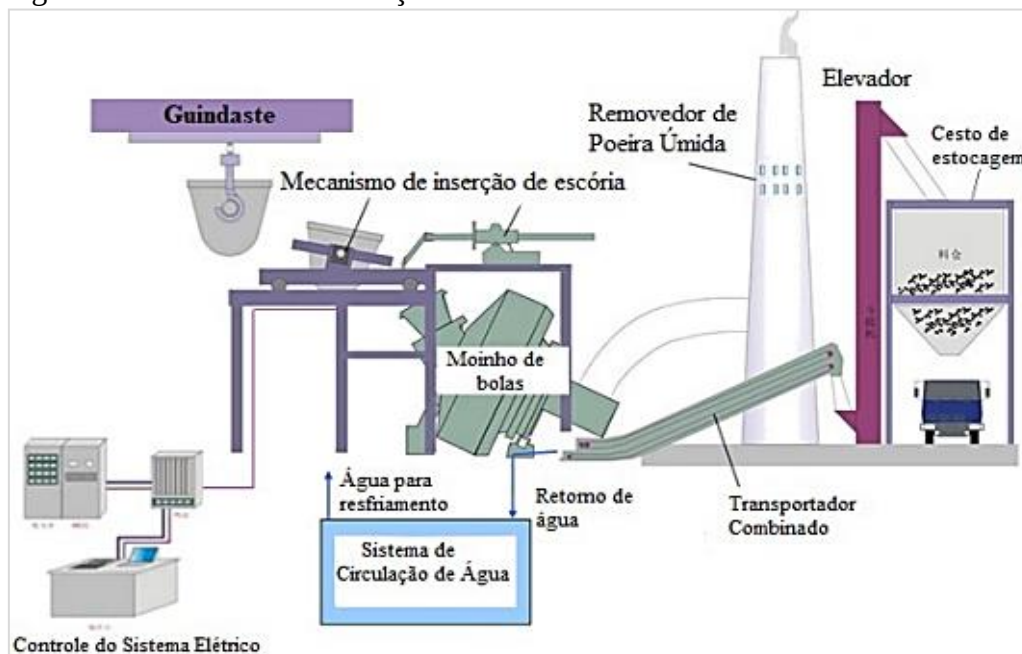
2.3.3. Tecnologia de Processamento da Escória de Aciaria LD BSSF

A *Baoshan Iron & Steel Co., Ltd.* (conhecida por *Baosteel*), no ano de 1995, desenvolveu a tecnologia de processamento de escória de aço fundido denominada *Baosteel's Slag Short Flow* (BSSF), considerado um processo de fluxo curto, onde a escória produzida pode ser utilizada imediatamente (Liu & Wang, 2011).

O *Baosteel's Slag Short Flow* (BSSF) é uma forma de beneficiamento e resfriamento de escória atualmente empregada (Benitez *et al.*, 2022). No processo BSSF, a escória anteriormente líquida é colocada em um cilindro rotativo especial de granulação, onde é injetado água e esta permanece por três a cinco minutos, e nesse processo o material residual

não se mistura com a escória na etapa de descarregamento (Souza, 2016). A Figura 4 apresenta o fluxograma do processo de beneficiamento da escória BSSF.

Figura 4 – Processo de fabricação da escória de aciaria LD BSSF.



Fonte: China Baowu Group (2022).

Diversos trabalhos que investigaram o emprego de escórias de aciaria, como a LD e a EAF, mencionam o teor de cal livre como causadora da expansibilidade das escórias e esta, por sua vez, sendo a principal desvantagem do emprego dessas escórias (Machado, 2000; Masuero, 2001; Rohde *et al.*, 2003; Graffitti *et al.*, 2005). Entretanto, no processo BSSF, o resfriamento ocorre mais rápido e logo a extinção da cal livre e do magnésio na escória é concluído. A escória granulada formada possui tamanho pequeno (menor que 15 mm), estabilidade e pode ser separada do aço diretamente por separação magnética. Após isso, um pulverizador remove a poeira no vapor gerado pelo processamento da escória, e o vapor é liberado através de uma chaminé. O consumo de água é de uma tonelada para cada tonelada de escória e 60% dessa água volta à circulação após ser filtrada. Quanto a cal livre após o processo BSSF, esta é de aproximadamente 1% na escória tratada (Li & Guo, 2014). Entretanto, outros estudos mostram que esse valor é bem maior que 1%, chegando a 47% de CaO em escórias BSSF (Tabela 3).

Localizada no estado do Ceará, a ArcelorMittal Pecém, conforme Amancio *et al.* (2021), é a única do ocidente a empregar o processo de BSSF. Tal processo granula a escória de aciaria e permite novas aplicações, além de reduzir o tempo de beneficiamento de meses para minutos, favorecendo o meio ambiente (ABM, 2021). Segundo China Baowu Group

(2022), um conjunto dessa tecnologia tem a capacidade de tratar 2-3 ton/min em uma área pequena, dentro de recipiente fechado sem necessidade de despejo diretamente em solo. O Tabela 3 apresenta a composição química de escórias de aciaria LD pelo processo BSSF encontradas em estudos nacionais e internacionais.

Tabela 3 – Composição química de escórias de aciaria LD pelo processo BSSF.

Estudo	Origem	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cr ₂ O ₃
Liu <i>et al.</i> (2022)	BSSF-Taiwan	47,00	34,00	7,60	0,70	3,00	-	4,40	-	0,20
Benitez <i>et al.</i> (2021)	BSSF-Brasil	37,00	14,00	13,20	1,40	3,50	0,10	1,40	0,60	0,10
Amancio <i>et al.</i> (2020)	BSSF-Brasil	33,00	53,00	5,84	0,63	5,09	0,04	1,01	0,63	0,21
Silva <i>et al.</i> (2019)	BSSF-Brasil	33,00	53,00	5,84	0,63	5,09	0,04	1,01	0,63	0,21
Li <i>et al.</i> (2017)	BSSF-China	42,00	21,00	14,97	2,55	-	-	1,82	-	-
Wang & Chen (2016)	BSSF-Taiwan	42,00	30,00	8,76	1,77	-	-	-	-	-

Fonte: A autora (adaptado) (2023).

2.4. Avaliação Ambiental de Escórias e Resíduos

Na Conferência da Terra realizada em 1992 no Brasil, foi adotada a política dos 3Rs da Sustentabilidade. Tal conceito propõe práticas que conduzam ao desenvolvimento sustentável e pode ser aplicado para todos os tipos de resíduos, líquidos, efluentes, sólidos e gasosos. Os 3Rs significam Reduzir, Reutilizar e Reciclar (Pozzetti & Caldas, 2019).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), no artigo 2º de sua Resolução nº 313, define os resíduos sólidos industriais como sendo aqueles originados de atividade industriais e que se encontrem nos estados sólido, semissólido, gasoso e líquido e que devido suas particularidades, seja inviável: descarte na rede pública de esgoto, em corpos hídricos ou que necessitem de soluções técnicas viáveis para destino correto.

De acordo com NBR 10.004 (ABNT, 2002) são definidas duas classes para os resíduos sólidos, com riscos e definições apresentadas de forma objetiva abaixo:

i) Resíduo de classe I – perigosos: estes podem apresentar corrosividade, toxicidade, periculosidade com risco à saúde pública ou ao meio ambiente, se gerenciado de forma inadequada.

ii) Resíduo de classe II – não perigosos: nesta classe se enquadram os resíduos de alimentos, sucatas ferrosas e não ferrosas, areia de fundição, resíduos de madeira, borracha e têxteis e outros resíduos que apresentem periculosidade.

- Resíduo de classe II A – não inerte: são considerados os materiais que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou de resíduos classe II B e que podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Resíduo de classe II B – inerte: são considerados os resíduos que submetidos ao contato dinâmico e estático com água destilada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações maiores que os padrões de água potável, excetuando-se aspecto, sabor, turbidez, dureza e cor.

Sobre a escória de aciaria, Ferreira (2010) reitera a importância da caracterização ambiental além da física, pois esta tem por objetivo evidenciar o potencial poluente do material para o meio ambiente e para a saúde pública. O fenômeno de migração de poluentes para o meio pode ser dado pela passagem de um fluido através ou ao redor do sólido permitindo que poluentes sejam dissolvidos ou carregados da superfície do material (Cauduro, 2003).

Com objetivo de verificar o enquadramento do resíduo nas classes estabelecidas pela NBR 10.004 (ABNT, 2002) são necessários dois ensaios, o de lixiviação e o de solubilização (Costa, 2014). A NBR 10.005 (ABNT, 2004) traz as diretrizes para o procedimento de extração de lixiviado de resíduos sólidos com a finalidade de diferenciar os resíduos classificados pela NBR 10.004 (ABNT, 2002) 02 como classe I – perigosos e classe II – não perigosos. Já a NBR 10.006 (ABNT, 2004) traz as orientações do ensaio de extração de solubilizado de resíduo sólido com intuito de diferenciar os materiais agrupados na NBR 10.004 (ABNT, 2002) como classe II A (não inertes) e classe II B (inertes).

Através de ensaios de lixiviação, realizados em laboratório, o potencial de liberação por diluição, arraste ou dessorção de certos componentes sob condições de referência é avaliado e os dados obtidos podem ser aplicados em modelos matemáticos. Isso favorece na prevenção de poluição, além de ajudar na melhor escolha de pré-tratamento antes da utilização ou disposição final (Cauduro, 2003). Ferreira (2010) reforça que, mesmo após aplicação em campo de resíduos de escória, avaliações ambientais devem ser realizadas de forma periódica com intuito de observar a ocorrência de reações que tornem o material não inerte após longo prazo.

Vidal *et al.* (2018) afirmam que os ensaios de solubilidade permitem avaliar o potencial de desprendimento de componentes constituintes de certos materiais para a água potável.

Freitas (2018) em seus estudos sobre escória de aciaria LD na fabricação de tijolos, analisaram os resíduos através de ensaio de solubilidade e estes foram classificados como classe II B (não perigoso e inerte), com as concentrações dos elementos solubilizados dentro da faixa de referência dada pelo Anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2002). Oliveira *et al.* (2018) analisaram relatórios de ensaios de lixiviação e solubilização de amostra de escória da aciaria da ArcelorMittal Monlevade S.A., coletada em 05 de dezembro de 2014. Os resultados obtidos permitiram classificar a escória como resíduo não perigoso, já no ensaio de solubilização todos os limites ficaram dentro dos valores permitidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), entretanto o valor de alumínio foi o único a exceder (0,591 mg/L) os limites normativos para resíduo inerte que é de 0,2 mg/L.

As escórias de aciaria, de acordo com Della *et al.* (2005), podem ser submetidas a um processo chamado de recuperação metálica, onde é possível recuperar ao máximo os metais contidos na escória. O produto gerado é um subproduto com aplicabilidade econômica. Dessa forma, os autores supracitados buscaram caracterizar esse subproduto oriundo de escórias de aço inoxidável para auxiliar na síntese do pigmento cerâmico. O subproduto da escória foi doado pela empresa Recmix S/A localizada em Minas Gerais. Foram realizados ensaios de lixiviação, solubilização, fluorescência de Raio X (FRX) e difração de Raio X (DRX) em difratômetro Phillips modelo Xpert, com tubo de Cu ($K\alpha$). A caracterização ambiental pelo ensaio de lixiviação apresentou resultados não detectáveis (ND) para os elementos analisados, exceto para o cromo total (Cr), que mesmo assim não ultrapassou o Valor Máximo Permitido (VMP) presente na NBR 10.004 (ABNT, 2004). O ensaio de solubilização do subproduto mostrou resultados também ND para todos os parâmetros inorgânicos, exceto cromo total (Cr) que apresentou uma concentração de 0,11 mg/L *versus* VMP de 0,05 mg/L. Dessa forma, foi possível classificar o subproduto como resíduo de classe II-não inerte, dado que pelo menos um de seus constituintes apresentou concentração superior ao VMP especificado na NBR 10.004 (ABNT, 2004). A análise química por FRX detectou uma maior presença de compostos como os óxidos de cálcio, silício e magnésio. Já pela análise por DRX os autores identificaram as seguintes fases: silicato de sódio (Ca_2SiO_4), mervinita ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$), gehlenita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) e enstatita ($(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$). Della *et al.* (2005) concluíram que a utilização do subproduto na obtenção de pigmentos cerâmicos a base de cromo como alternativa à disposição final mais sustentável desse tipo de resíduo, reduzindo o passivo ambiental gerando um outro produto com maior valor comercial.

Barbosa (2013) realizou caracterização geoambiental de cinco amostras de escórias oriundas de cinco estados brasileiros (Bahia, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Rio

Grande do Sul) variando entre escória de aciaria elétrica e escória de aciaria LD, objetivando aplicação em pavimentação. A caracterização foi constituída de ensaios físicos, químicos e ambientais. Pelos parâmetros de lixiviação, nenhuma das escórias apresentaram elementos excedentes. Entretanto, ao analisar os parâmetros de solubilização a autora verificou que as escórias de São Paulo, Rio de Janeiro e Bahia apresentaram, para alguns de seus constituintes, concentração acima da permitida pela legislação brasileira. Sendo estes, o cromo para a escória de SP e RJ e o alumínio para SP, RJ e BA. Dessa forma, as escórias foram classificadas todas como resíduo Classe II, ou seja, não perigoso. Duas amostras foram enquadradas como resíduo inerte (Classe IIB) e três como não inerte (Classe IIA) e que segundo Barbosa (2013), gera baixo impacto em seu gerenciamento e para o meio ambiente (Quadro 1). A autora recomenda, em concordância com os órgãos ambientais de SP, RJ e RS, que as escórias sejam armazenadas e curadas durante um período de 6 meses, objetivando atingir os parâmetros de lixiviação e solubilização adequados.

Quadro 1 – Amostras de escórias de cinco estados brasileiros.

Local	Escória	Parâmetro Excedente		Classificação do Resíduo
		Lixiviação	Solubilização	
Pindamonhangaba - SP	EAF	-	Alumínio e Cromo	Classe IIA – Não Inerte
Rio de Janeiro - RJ	EAF	-	Alumínio e Cromo	Classe IIA – Não Inerte
Sapucaia do Sul - RS	EAF	-	-	Classe IIB – Inerte
Simões Filho - BA	EAF	-	Alumínio	Classe IIA – Não Inerte
Barão de Cocais - MG	LD	-	-	Classe IIB – Inerte

Fonte: Barbosa (2013).

A reciclagem de Pavimentos Asfálticos Fresados (PAF) ou mais conhecido como RAP (do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*), de acordo com Lopes *et al.* (2015), pode ser incorporado em uma nova mistura asfáltica favorecendo possíveis benefícios económicos e ambientais.

Partindo disso, Moraes *et al.* (2022), em seus estudos, investigaram a toxicidade dos PAF por meio da determinação de metais, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) e testes de toxicidade aguda com *Daphnia magna* (microcrustácio). Foram analisadas amostras de RAP de diferentes locais de Curitiba – PR e, para fins de comparação foi analisada e uma amostra de asfalto recém-produzida por uma usina local. Realizaram dois tipos de ensaios de lixiviado, de coluna e por agitação, que foram feitos em triplicata, baseados na NBR 10.004

(ABNT, 2004). O pH foi ajustado para 4,90 e o fluido de extração e proporção de amostra de 20:1. O ensaio de solubilizado foi embasado pela NBR 10.006 (ABNT, 2004) e os elementos analisados nos dois ensaios foram cádmio (Cd), cromo (Cr), ferro (Fe), manganês (Mn), chumbo (Pb) e zinco (Zn). Para medir a toxicidade aguda das amostras, foram realizados bioensaios com *Daphnia magna*, onde foram cultivados e expostos a 25 ml das soluções de teste e mantidos por 48 h a 20°C no escuro. Os resultados são dados por fator de toxicidade onde a amostra é observada quanto a imobilidade dos microcrustáceos.

Quanto aos resultados obtidos por Moraes *et al.* (2022) todos os valores dos metais, obtidos por meio dos dois métodos de lixiviação, ficaram dentro dos limites permitidos. Avaliando o extrato solubilizado, observaram que o elemento manganês (Mn) ficou acima dos critérios brasileiros para duas amostras e, para a lixiviação, todos ficaram dentro dos limites permitidos. Entretanto, o zinco (Zn) foi o metal com maior concentração presente, apresentando um valor de 40,49 mg/L em uma das amostras. Os autores justificam esse fato pela composição natural do RAP ou em decorrência das pastilhas de freio e pneus com presença de zinco. A presença de cádmio (Cd) nos lixiviados foi atribuído pelos autores como decorrente da queima de óleos e graxas presentes nos lubrificantes usados em veículos, pelo desgaste das pastilhas de freio ou por fazer parte do betume usado em pavimentos. Quanto a concentração de metais observados no lixiviado e não no solubilizado, ou inversamente, os autores relatam que o fato se deve à maior mobilidade de determinados metais em meios ácidos e pelo fato do teste de lixiviação ser dinâmico e o de solubilização estático. E entre os dois métodos de extração de lixiviado, os resultados mostraram que o de coluna apresentou concentrações maiores em relação ao de agitação para todos os metais, exceto para o manganês (Mn). Concluíram que os métodos de extração de lixiviados podem variar as concentrações dos parâmetros avaliados e que o método de extração dinâmica se mostrou mais eficaz.

A viabilidade ambiental de misturas de solo laterítico e areia descartada de fundição (ADF) para uso em pavimentação, foi objeto de estudo de Ferreira *et al.* (2014). Realizaram misturas de solo e ADF em diversas proporções (20 a 80%, variando a cada 10%) e avaliaram a através de ensaios físicos, mecânicos, como ISC e ambientais, por solubilização e lixiviação. Pela caracterização do solo, este foi classificado como A-5 e ML (siltoso) e pela classificação MCT como argiloso (LG') e a areia como A-1b e SM. Quanto aos resultados de ISC, os autores observaram redução para as porcentagens compreendidas entre 20 e 60% de areia nas misturas. Apenas na mistura solo+ADF70% o ISC foi superior ao ISC do solo natural, saindo de 34% para 40%, aproximadamente. Na avaliação ambiental, foram ensaiados apenas a amostra de ADF e a mistura de solo+ADF70%. Quanto aos parâmetros de massa bruta e de extrato

lixiviado, os resultados foram condizentes com a norma. Os parâmetros de solubilizado analisados foram: alumínio (Al), ferro (Fe), índice de fenóis e surfactantes (como LAS). Na amostra ensaiada de ADF, o elemento alumínio (Al) (0,499 m/L) e índice de fenóis (0,17mg/L) apresentaram concentrações superiores aos valores admissíveis. Para a mistura de solo+ADF70% os parâmetros alumínio (Al) (1,1 mg/L), ferro (Fe) (0,927 ml/L), índice de fenóis (0,065 mg/L) e surfactantes (como LAS) (0,52 mg/L), todos ultrapassaram os valores permitidos. Em justificativa, os autores afirmam que as concentrações elevadas de alumínio e ferro são esperadas em solos argilosos, como o da pesquisa. Ferreira *et al.* (2014) reforçam que as propriedades tensoativas e detergentes do sulfactante detectado na mistura não inviabilizam o emprego da areia descartada de fundição em pavimentação, dado que este é tóxico apenas em ecossistemas aquáticos. A partir disso foi possível classificar a areia ADF e a mistura de solo+ADF70% como resíduo não perigoso e Classe II A- não inerte.

Pagio *et al.* (2022) realizaram caracterização física, química, mineralógica, microestrutural e ambiental de quatro resíduos siderúrgicos, sendo estes a escória granulada de alto-forno; escória de alto-forno resfriada ao ar; pó do despoeiramento do forno elétrico a arco (FEA) e Terra de Shredder (material oriundo da reciclagem de sucata em equipamento Shredder com aspecto de solo) para emprego em construção civil. Os resíduos foram obtidos da empresa ArcelorMittal do Espírito Santo (escórias) e de São Paulo (pó de FEA e Terra de Shredder) e passaram por processo de moagem (Figura 5). As análises químicas dos resíduos foram através da espectrometria por fluorescência de Raio X. Os autores obtiveram resultados de composição semelhantes para as duas escórias, onde constataram predominância de CaO e de SiO₂, como no cimento Portland, assim como Al₂O₃, Fe₂O₃ e MgO. O ensaio de FRX mostrou a presença significativa de ferro e de zinco na composição do pó de FEA. Justificam que isso se deve ao tipo de sucata com quantidades elevadas de aço galvanizado que durante a fusão, se volatilizam com outros materiais e depositando-se junto às partículas de poeira.

No resíduo Terra de Shredder, Pagio *et al.* (2022) observaram concentração significativa de sílica cristalina e ferro, isso ocorre em razão da composição dos materiais que a constituem, como areia e peças automotivas. Na caracterização ambiental o pó de FEA apresentou concentrações de cádmio, chumbo e selênio acima dos limites estabelecidos, logo foi classificado como resíduo Classe I – perigoso. O resíduo Terra de Shredder não apresentou nenhum elemento com concentrações acima do permitido, quanto ao ensaio de lixiviado, entretanto, quanto ao extrato solubilizado, este apresentou solubilidade em água para manganês, chumbo e arsênio, sendo classificado como resíduo não Classe II – não perigoso (lixiviação) e Classe IIA – não inerte (solubilização). Já a escória de alto-forno resfriada ao ar

apresentou solubilidade ao selênio em água e por isso enquadrada com não perigoso e Classe IIA – não inerte. E por fim, a escória granulada de alto-forno não apresentou nenhum de seus componentes com concentrações superiores aos limites admissíveis segundo a norma e pode ser classificada como um resíduo não perigoso de Classe IIB – inerte. Os autores ressaltam que mesmo os resíduos classificados como classe IIA e classe IIB não apresentem os mesmos riscos ao meio ambiente como os resíduos classe I (perigosos), a norma tem relevante importância na aplicação de limites permissíveis para utilização de materiais de forma segura no panorama ambiental.

2.5. Aplicações das Escórias de Aciaria

Como explanado anteriormente, a geração do coproduto escória representa aproximadamente 10% da produção de aço (CSP, 2022). Segundo dados do Instituto Brasileiro do Aço (IBA, 2022), a produção mundial acumulada até o 3º trimestre de 2022 (julho, agosto, setembro) foi de $1.403.043 \times (10^3)$ t. Dessa forma, torna-se urgente a realização de pesquisas que busquem novas utilizações para as escórias que sejam consideradas e favoreçam na melhor destinação para esse coproduto siderúrgico. Yi *et al.* (2012) afirmam que o tipo de emprego da escória de siderúrgica está diretamente associado às suas características químicas e físicas, e apresentam uma lista que relaciona as características e suas aplicações (Quadro 2). De acordo com Sofilic *et al.* (2012), as aplicações vão desde agregado na construção civil ao uso em tratamento de águas residuais.

Quadro 2 – Características e aplicações de escórias de aciaria.

Características	Aplicações
Dureza, resistência ao desgaste e rugosidade	Agregados para construção rodoviária e hidráulica
Porosidade, alcalinidade	Tratamento de água poluída
Compostos de FeO_x , Fe	Recuperação de ferro
Componentes CaO, MgO, FeO, MgO, MnO	Fundente para produção de aço
Componentes cimentícios (C_3S , C_2S e C_4AF)	Produção de cimento e concreto
Compostos de CaO, MgO	Captura de CO_2 e dessulfuração de gás de combustão
Compostos de FeO, CaO, SiO_2	Matéria-prima para clínquer de cimento
Componentes de fertilizante (CaO, SiO_2 , MgO, FeO)	Fertilizantes e corretivos de solo

Fonte: Yi *et al.* (2012).

2.6. Escória de Aciaria Aplicada em Pavimentação

A demanda de recursos financeiros para implantação de rodovias, a constante preocupação com esgotamento dos recursos naturais e a conservação da natureza levam pesquisadores no mundo inteiro a investigarem tecnologias ou materiais que englobam, parcial ou completamente, essas premissas.

O emprego de materiais alternativos, que substituam os naturais, pode ser justificável por razões técnicas, econômicas e ecológicas, além do setor e os tipos de aplicação (Pasetto & Baldo, 2011). Nesse contexto, tem-se o emprego de coprodutos siderúrgicos em pavimentação, como a escória de aciaria. Seu uso pode minimizar danos ambientais gerados pela extração acentuada de agregados naturais, além de vantagens econômicas principalmente em regiões onde se produz aço (Pedrosa, 2010; Amancio *et al.*, 2021). Freitas (2018) afirma que as propriedades físicas da escória têm sido estudadas e comparadas com as dos agregados naturais.

Segundo a *National Slag Association* (NSA) (2022), a construção da primeira estrada de escória foi no ano de 1813, na Inglaterra. Já na América, esse feito foi apenas no ano de 1880, dezessete anos depois. A escória de aciaria possui qualidades físicas que habilitam o seu emprego na área de pavimentação rodoviária. Porém, alguns de seus componentes químicos sofrem modificações, causando expansibilidade quando não tratada e estabilizada de forma correta (Pedrosa, 2010).

Costa e Santos (2020) realizaram estudos de estabilização de solo para camadas de pavimento rodoviário misturando um solo argiloso e escória de aciaria elétrica em teores de 15% e 30%. Esses autores realizaram ensaios para caracterização geotécnica do solo como granulometria, massa específica e limites de Atterberg. Ensaio mecânicos como compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão foram executados com o solo e com as misturas. O solo foi classificado como um A-4 (areia com finos) no sistema *Transportation Research Board* (TRB) e como ML (silte de baixa plasticidade) no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). O diâmetro máximo da escória foi de 19 mm, enquadrando-se como brita 01. As curvas de compactação mostraram comportamento de redução de umidade ótima de acordo com o aumento do incremento de escória. As misturas com 15 e 30% de escória apresentaram, respectivamente, ISC de 21,30%, e 22,40%, contra 18,80% do solo natural. Em relação à expansão, os valores tenderam ao zero com o acréscimo do teor de escória.

Rohde *et al.* (2003) afirmam que as escórias de aciaria também podem ser substitutas para agregados pétreos ou como estabilizante de solos, objetivando aumento de resistência

mecânica desses materiais *in natura*. Com objetivo de caracterizar a escória de aciaria elétrica foram realizados ensaios de granulométrica, durabilidade ao sulfato de sódio, abrasão Los Angeles, além de compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC). Foi empregado ainda o método ASTM - D4792 (ASTM, 2001) para avaliação da expansibilidade do agregado. Os autores observaram que a escória de aciaria elétrica em sua granulometria natural não se enquadrava em nenhuma das faixas do DNER (1994), fazendo-se necessário correção granulométrica através de britagem ou composição. Durante a execução do ensaio de compactação, os autores relataram dificuldade na obtenção de uma boa compactação, logo optaram pela correção da granulometria. Dessa forma, foram analisados dois tipos de escória: a bruta e a escória corrigida granulometricamente (ECG). Os valores de ISC da escória ECG foram de aproximadamente 200%, já o da escória bruta variavam de 80 a 100%. No ensaio de abrasão Los Angeles, a perda de massa foi de 38%. Quanto à expansibilidade, o estudo mostrou que 4 meses de cura por estocagem a céu aberto foram suficientes para que o agregado não apresentasse expansibilidade significativa.

Boldrini e Pacheco (2022) analisaram misturas de escória de aciaria LD comercial, chamada REVSOL e produzida pela siderúrgica da Grande Vitória-ES, e solo com propriedades lateríticas para emprego em camada de base rodoviária. O estudo apresenta valores para compactação (sem deixar claro a energia compactada), ISC, além de microscopia de Raio-X e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os teores das misturas se deram em volume de 50/50, 30/70 e 20/80 de solo e escória, respectivamente. A escória do estudo se enquadrava na faixa C do DNIT (DNIT, 2006). O solo foi classificado como uma argila de alta plasticidade e de média/alta compressibilidade pelo SUCS. Observaram que nos ensaios de compactação, o incremento no teor de coproduto promoveu aumento nos valores de massa específica seca máxima, conseqüentemente, reduzindo os valores de umidade ótima. Quanto à resistência mecânica do solo, o valor de ISC foi de 15,20%. Entretanto, a adição da escória de aciaria LD favoreceu valores superiores. Para a mistura com 50%, 70% e 80% de REVSOL, os valores de ISC foram, respectivamente, 234,60%, 315,10% e 367,50%. Entretanto, mesmo com valores aceitáveis para emprego em camadas de bases rodoviárias, as expansões das misturas excederam o permitido em DNIT 406 (DNIT, 2017) que exige valores inferiores a 3,0% para serviços de base rodoviária estabilizada granulometricamente com Açobrita®.

Rodrigues *et al.* (2022) avaliaram misturas de escória de aciaria elétrica primária (EAEP) e solos tropicais de jazidas de empréstimo no estado de Minas Gerais para emprego em pavimentação. Realizaram ensaios de caracterização geotécnica do solo, como: granulometria, limite de plasticidade, massa específica dos grãos e compactação na energia

normal. Para a caracterização da EAEP, primeiramente moeram as amostras até o diâmetro de 0,6mm, para aumento da superfície específica. Em seguida, realizaram ensaios físicos, sendo estes: finura por peneiramento, superfície específica pelo método de Blaine, massa específica e distribuição granulométrica do material por difração a laser. As porcentagens de escória utilizadas nas misturas foram de 5%, 12,50% e 20%. Realizaram também ensaios mecânicos de resistência a compressão não confinada (RCSC) e ISC. Como resultados, as misturas com o solo siltoso apresentaram valores de ISC e RCSC, respectivamente, de 11,20% e 0,286 MPa (0% de escória) a 24,50% e 0,3692 MPa (20% de escória). Já as misturas executadas com areia argilosa, os ISC e RCSC, respectivamente, partiram de 8,20% e 0,132 MPa (0% de escória) a 14% e 0,194 MPa (20% de escória). Quanto à expansão, as misturas obtidas a partir dos dois tipos de solo, apresentaram tendência ao zero quando a quantidade de EAEP subia.

O Tabela 4 traz um compilado comparativo de características e resultados obtidos em estudos anteriores sobre aplicação de escória de aciaria na pavimentação, sendo estes: classificação dos solos, local de coleta, teor e tipo de escória e resultados de ensaios de densidade, abrasão *Los Angeles*, ISC e MR.

Tabela 4 – Estudos anteriores sobre escória de aciaria em camadas de pavimentos.

Autor/Ano	Local	Clas. Solo (TRB/SUCS)	Tipo de escória (%)	Teores de Escória (%)	Dens. real dos grãos	ISC (%)		MR (MPa)		Abrasão L. A. (%)
Rohde <i>et al.</i> (2003)	Porto Alegre-RS	-	EAE ¹	100	3,400	90		-		38
			EAE (CG) ²			200				
Costa & Santos (2020)	Porto Nacional-TO	A-4; ML	EA ³	solo	-	19		-		-
				15		21				
				30		22				
Rodrigues <i>et al.</i> (2022)	Santa Maria-MG	1) A-7-5; SC	EAES ³	solo 1	2,690	7	-	-		-
				solo 2	2,780	-	6			
		2) A-4; SC		10	-	13	30			
				20		17	16			
Boldrine & Pacheco (2022)	Contorno da Serra-ES	A-6; CL	EA-LD ⁴	solo	-	15		-		-
				50		235				
				70		315				
				80		368				
Rezende <i>et al.</i> (2022)	Viçosa-MG	1) A-7-5; MH	EAEP ⁵	solo 1	2,869	-		33	-	-
				solo 2	2,657			-	28	
		2) A-2-6; SC		5	-			61	32	
				12,5				75	31	
				20				81	41	

Fonte: A autora (2023).

¹escória de aciaria elétrica.

²escória de aciaria corrigida granulometricamente.

³escória de aciaria elétrica secundária.

⁴escória de aciaria a oxigênio.

⁵escórias de aciaria primária.

2.7. Avaliação do Módulo de Resiliência e da Deformação Permanente de Resíduos e Solos Estabilizados com Resíduos

Em se tratando de pavimento, cargas aplicadas sobre a superfície deste geram determinado estado de tensões na estrutura, que dependem diretamente de como cada uma das camadas e ou o conjunto destas se comportam mecanicamente (Balbo, 2007). Dessa forma, faz-se necessário conhecer o comportamento mecânico dos diversos materiais, como solos, agregado naturais ou não, resíduos, em que se pretende aplicar em pavimentação. O módulo de resiliência e a deformação permanente são dois dos ensaios que podem dar uma previsão de como o material se comportará após aplicado.

Sobre módulo de resiliência (MR), o Guia de Dimensionamento de Pavimentos da AASHTO (2002) define o MR como sendo a razão da tensão axial cíclica pela tensão axial resiliente. Em infraestrutura rodoviária, as solicitações do tráfego sobre o pavimento promovem deformações que se dividem em duas parcelas: aquelas que são permanentes (plásticas) e as recuperáveis ou resilientes (elásticas). Tal afirmação faz alusão à lei de Hooke (1678) que descreve sobre qualquer material que tenha sobre si uma força aplicada, sofrerá deformações e essas deformações são proporcionais à força aplicada. Em resumo, isso significa que as deformações elásticas findam após a aplicação da carga, já as plásticas dão origem às deformações permanentes que são irrecuperáveis (Zago *et al.*, 2021).

Barros *et al.* (2019) afirmam que o acúmulo das deformações plásticas no solo e em materiais granulares utilizados em infraestrutura rodoviária são resultantes de alguns fatores como clima, tráfego, grau de compactação, teor de umidade, propriedade dos materiais etc.

Segundo Osten *et al.* (2012), as camadas de solo podem apresentar deformações permanentes sobretudo pelo incremento adicional oriundo do tráfego e por ruptura ao cisalhamento. Os autores afirmam que para evitar esses tipos de problemas é preciso selecionar materiais adequados juntamente com uma compactação satisfatória aliados a projeto estrutural objetivando conter as tensões atuantes aos níveis aceitáveis e seguros.

Quanto a definição de solos de comportamento geotécnico laterítico, Nogami e Villibor (1995) afirmam que estes são caracterizados por possuir uma série de propriedades que levam a classificá-lo como solo de comportamento laterítico segundo classificação MCT (miniatura

compactado tropical). Já no ponto de vista da pedogênese, esses solos são uma variedade de solos superficiais pedogenético típico das partes bem drenadas de regiões tropicais úmidas.

Entretanto, de acordo com Balbo (2007), os solos lateríticos ou tropicais não são abarcados pelo sistema classificatório tradicional para solos para pavimentação, podendo levar ao equívoco ou subutilização de muitos solos tropicais com características excelentes para pavimentação, mostrando a inviabilidade do emprego desse tipo de classificação para a maioria dos solos brasileiros.

Além do sistema de classificação tradicional de solos, a sistemática tradicional também apresenta vários problemas quanto aos solos arenosos finos lateríticos (SAFL), entre eles, pode-se citar: a dificuldade na determinação do comportamento geotécnico laterítico dos SAFL; dificuldades intrínsecas a metodologia dos ensaios tradicionais; deficiência na previsão de importantes problemas construtivos e de comportamento nas bases feitas com SAFL (Villibor & Nogami, 2009).

Parente *et al.* (2003) buscaram investigar o desempenho mecânico de misturas de solo e escória de aciaria, tomando por base resultados de ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e MR. O solo coletado foi do subleito da BR-116, próximo a Fortaleza-Ce. Este foi classificado como A-6 (TRB) e como SC (SUCS), com limite de liquidez de 30% e índice de plasticidade de 12%. Já o agregado siderúrgico foi proveniente da indústria siderúrgica Gerdau S/A, localizada no município de Maracanaú-CE situada a 30 km de Fortaleza. Após a coleta, o material foi estocado a céu aberto regando-o duas vezes ao dia por um período de três meses para o processo de cura. Foram realizadas misturas de solo-brita com objetivo de comparação às misturas solo-escória. Para as misturas foram empregadas duas porcentagens de escória e de brita, 50% e 70%, para ambas.

Os autores relataram dificuldade para realização do ensaio de compactação da escória, devido à falta de coesão do material. Após inúmeras tentativas, a solução selecionada foi fabricar a granulometria do agregado colocando boa parte de material não fracionado. A massa específica seca máxima obtida foi de 2,516 g/cm³ e umidade ótima de 6,4%. Para o ensaio de ISC, a amostra de solo apresentou valor de 17%, na energia intermediária. As misturas de solo+escória50% e solo+escória70% apresentaram valores de 50% e 70%, respectivamente, maiores que o ISC das misturas de 30% para o solo+brita50% e 35% para o solo+brita70%. As misturas com o agregado siderúrgico apresentaram expansão nula. Para o comportamento resiliente dos materiais, esses autores verificaram que o modelo que considera a tensão confinante juntamente com a tensão desvio representou melhor os materiais. O coeficiente de correlação (R^2) para esse modelo, chamado de composto, também foi maior em relação aos

modelos simples. Foi possível observar que os valores de MR decresceram com o aumento da tensão desvio em todas as misturas analisadas, dado que os valores de K_2 foram todos negativos, mostrando a influência dessa tensão sobre o comportamento resiliente das amostras. Entretanto os MRs foram superiores para as misturas solo-escória quando comparados aos MRs das misturas solo-brita e solo sem agregado.

Gómez (2016) realizou estudos sobre o comportamento mecânico de resíduos de construção e demolição (RCD) sob os efeitos de carregamentos cíclicos. O material de RCD foi gerado a partir da demolição do estádio Mané Garrincha, localizado em Brasília. O RCD foi classificado como um agregado reciclado de concreto (ARC), pois a porcentagem de materiais de origem cimentícias (G1) e pétreas (G2) passavam os 90% exigidos em norma. O material, entretanto, passou por processo de britagem com objetivo de enquadrá-lo na faixa C do DNER-ES 303 (DNER, 1997). Realizou-se ensaios de caracterização física, química e mecânica do RCD. Dos ensaios físicos, têm-se: absorção, expansão, abrasão *Los Angeles*, equivalente de areia, limite de liquidez e índice de forma. Ensaios de difração de raio X (DRX), análise geoquímica, fluorescência de raio X (FRX), análise elementar (CHN) e ensaio de pH permitiram caracterizar quimicamente o resíduo. Para a análise mecânica foram feitos ensaios de ISC, RCS (Resistência a Compressão Simples), MR e resistência ao cisalhamento, valores obtidos por Gómez (2011). As energias de compactação empregadas foram a intermediária e a modificada. Realizou-se, ainda, ensaio de DP (deformação permanente) do RCD unicamente na energia modificada. Em seu programa experimental, Gómez (2016) executou todas as compactações a partir de uma curva granulométrica definida, pois o material sofre degradação das partículas após as compactações e os carregamentos cíclicos. Dessa forma, foram realizados ensaios de granulometria após cada ensaio objetivando determinar a alteração do material.

Os valores de ISC foram, na energia intermediária, de 95% sem imersão e de 114% com imersão. Na modificada, foram de 163% sem imersão e de 218% imerso. Os valores médios de MR foram de 190 MPa e de 140 MPa nas energias intermediária e modificada, respectivamente. Quanto ao RCS, este foi feito apenas na intermediária apresentando valor de 220 kPa. Já para obtenção de dados de cisalhamento, analisou 6 tempos de cura indo de 0 (zero) a 90 dias, devido a heterogeneidade dos materiais que podem gerar cadeias cimentantes e aumentar a resistência após um tempo. O material com 30 dias de cura apresentou maior resistência ao cisalhamento (303 kPa) e menor resistência com 0 (zero) dia de cura (245 kPa).

Já em Gómez (2016), diferente dos obtidos em Gómez (2011), os MRs foram submetidos a tempos de curas que na energia intermediária variaram de 60 kPa a 450 kPa. A

autora observou que o comportamento resiliente do material dependia do tempo de cura, ou seja, para menores tempos de cura menores os valores de MR e para tempos de cura maiores, como o de um ano, os valores de MR foram de 200 MPa a 450 MPa *versus* 50 MPa a 250 MPa para 15 dias de cura. Tal fenômeno foi associado às duas hipóteses, onde a primeira seria alguma perda de umidade durante o tempo de cura e a segunda seria possibilidade de hidratação do cimento restante dentro da fração fina do RCD. Em relação a influência da energia de compactação, de forma geral, observou que esta não apresentou diferenças significativas para o RCD estudado. Entretanto, os valores de MR, segundo a autora, podem ser comparáveis com agregados naturais de basalto e calcário. Quanto à DP, o número de ciclos projetado foi $N = 10^6$. O valor de deformação para o RCD foi de 0,6% ou 1,2 mm com relação aos 200 mm do corpo de prova. Observou que a DP aumentava quando a umidade e a relação de tensão também aumentavam. Por fim, a autora concluiu que o RCD estudado é uma alternativa viável para substituição parcial ou total para ser aplicado em camadas granulares de base e sub-base na construção de pavimentos.

No estado do Ceará, Vasconcelos *et al.* (2019) avaliaram a estabilização de solo com cinzas de carvão mineral e cal, visando o emprego em pavimentação. A cinza foi oriunda na termelétrica do Pecém-CE, o solo usado foi coletado próximo a termelétrica e a cal era do tipo CH-I. No estudo foram realizados ensaios físicos, mecânicos [como de compactação, ISC e Expansão, MR, DP, RCS e Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD)], na energia intermediária, e químicos como FRX e lixiviação e solubilização para avaliação ambiental. Além disso, as estabilizações com cal foram analisadas considerando tempos de cura como 0, 7, 14 e 28 dias. Os ensaios de DP foram baseados na norma europeia BS EN 13286-7, que considera 10.000 ciclos para cada par de tensão, sendo ensaiados apenas para as estabilizações que apresentaram melhores comportamentos mecânico para uso em camadas de base e sub-base de pavimentos. Foram empregadas tensões de confinamento de 40 kPa e tensões desvio de 40, 80, 120 e 160 kPa.

Os resultados de Vasconcelos *et al.* (2019) mostraram que quanto a análise química, os compostos com maior frequência nas 32 amostras foram sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de cálcio (CaO). Devido à heterogeneidade da cinza, dependendo do local de coleta e a profundidade, algumas amostras foram classificadas como resíduos Classe I-perigosos por apresentarem valor de fluoreto (341 mg/L) acima do permitido e outra como Classe IIA - Não Inerte por apresentar concentrações altas de sulfato no ensaio de solubilização. Pela caracterização geotécnica dos materiais, foi possível classificar o solo como areia fina A-2-4 e a cinza como silte-argiloso do tipo A-4, ambos pela classificação TRB-AASTHO. Os

autores observaram que o aumento do teor de cinza contribuiu para o aumento da úmida ótima nos resultados de compactação. Quanto aos valores de ISC, os autores observaram que o incremento de cinza não forneceu comportamento de estabilização ao solo, entretanto ao incrementar a cal foi possível obter valores elevados de ISC. A mistura composta de solo47,5%+ cinza47,5%+cal5% apresentou ISC de 370% para 7 dias de cura *versus* 4% para a amostra apenas com cinza. Quanto à expansão, a cal favoreceu a redução desse parâmetro. Para os valores de MR, o modelo composto foi o que melhor caracterizou esses materiais, e que os maiores tempos de cura (misturas com cal) propiciou maior rigidez e favoreceram os valores de MR em relação às amostras apenas de solo natural ou de cinza. A mistura composta de solo47,5%+ cinza47,5%+cal5% apresentou MR médio de 1.007 MPa. Para os resultados de deformação permanente, os autores observaram que para todos os ensaios o acúmulo total de DP ficou concentrado nas primeiras 6.000 aplicações de carga e mostrando tendência de estabilização nos demais. A cinza e a mistura de solo50%+cinza50% apresentaram valores elevados de deslocamento, sendo de 13,54 mm e 10,17 mm, respectivamente, acumulados ao fim do ensaio. Já para as misturas de solo+cinza+cal e cinza+cal, verificaram que houve diminuição da DP com o aumento de cal e do tempo de cura. O acréscimo de cal nas amostras com cinza conferiu um deslocamento irreversível acumulado de 0,636 mm para os corpos de prova rompidos sem tempo de cura. Vasconcelos *et al.* (2019) concluíram que, por se tratar de misturas quimicamente tratadas, o tempo de cura gera influência no comportamento mecânico delas, se tratando de resistência e de deformabilidade.

Cabral *et al.* (2022) analisaram propriedades de MR e DP de solos empregados em camadas de pavimentos na análise de dimensionamento mecanísticos-empírico e empírico. Os autores propuseram modelos para estimativa de MR e DP de solos regionais. Os dois solos do estudo foram oriundos de Mossoró-RN e misturados a brita. Os materiais passaram por caracterização geotécnica e por ensaios mecânicos convencionais na energia intermediária. Para a análise dos resultados de MR foi empregado o *software* Lab Fit (Silva, 2004) com escolha do modelo com maior coeficiente de correlação (R^2). Para a análise dos resultados de DP utilizaram o ensaio triaxial de carga repetidas de múltiplo estágios (RLT). Neste ensaio adotaram relações de σ_d/σ_3 de 1, 2, 3 e 4 totalizando 12 ensaios, ou seja, cada sequência era constituída de um σ_3 fixo e quatro σ_d diferentes obedecendo as relações entre ambos pré-fixadas. Para cada par de tensões foram aplicados 10.000 ciclos, totalizando 40.000 ciclos em um único corpo de prova. Cabral *et al.* (2022) ressaltaram que a procedimento empregado tinha o objetivo de verificar diferentes simulações de cargas nos materiais testados para avaliar o comportamento e a capacidade estrutural dos solos através de acréscimo da intensidade da

energia vertical. Para determinação dos parâmetros de deformabilidade (k) preliminares, os autores utilizaram o modelo sugerido por Guimarães (2009), $\varepsilon_p^{esp} = K_1 \times \sigma_3^{K_2} \times \sigma_d^{K_3} \times N^{K_4}$, para prever a DP total (δp) das amostras empregando técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA). Os autores obtiveram como resultados para o solo M1 classificação como A-2-6, ISC de 11,3% e expansão de 0,07%. O solo AB, um A-2-4, apresentou ISC de 41,9% e a mistura solo AB+brita um ISC de 66,3% e ambos com expansão zero. O modelo composto ($MR = k_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_3}$) proposto por Guimaraes (2009), entre outros testados, foi o que apresentou melhor desempenho quanto ao comportamento resiliente dos materiais e foi o que apresentou maiores coeficientes de correlação (R^2). Verificaram que o comportamento resiliente das amostras mostrou uma relevante variação nos ciclos iniciais e uma acomodação nos ciclos finais. O analisar os gráficos de DP, os autores relatam que as amostras, no geral, mostraram tendência de estabilização em todas os pares de carregamentos antes que fosse concluído os 10.000 ciclos, e todos apresentaram valores abaixo dos admissíveis encontrados na literatura para DP em pavimentos, de 13,0mm e 12,5mm. Diante disso, concluíram que de acordo com os valores de DP obtidos, os materiais estudados são aptos para o emprego em obras de pavimentação.

Pires *et al.* (2019) avaliaram a viabilidade do uso de escória siderúrgica de dessulfuração do processo do reator Kambara (escória KR) como estabilizador de solo. Essa escória é subproduto resultante do processo de retirada do excesso de enxofre do ferro-gusa. Dessa forma, foram realizadas nove misturas com diferentes porcentagens de escória, solo e de aditivos (cimento Portland). Além das análises de laboratório realizaram duas seções de campo experimental com utilização de simulador de tráfego pesado e análises de campo. Analisaram dois tipos de solo: a) solo 1: classificado como A-7-6, com limite de liquidez elevado e muito plástico, argiloso laterítico e com ISC de 22,7% e 25,3% para energia intermediária e modificada, respectivamente; b) solo 2: caracterizado como A-2-6, com média plasticidade e ISC de 49,9% e 89,1%, nas energias intermediária e modificada, respectivamente, considerado de bom a excelente para uso em subleito. Já o cimento Portland utilizado foi o CP III-40RS com resistência a sulfetos. A escória apresentou um valor de resistência a abrasão de 24%, uma massa específica de 3,2 g/cm³ e expansão de 2,7%. Quanto aos dados de DRX, a escória KR apresentou picos de cristalinidade bem definidos e os principais minerais observados foram portlandita, quartzo, calcita, etringita e magnesioferrita.

No estudo de Pires *et al.* (2019) foram ainda realizadas misturas com os dois tipos de solo e escória, nas variações de 15%, 20% e 25% (massa de solo) e compactadas na energia modificada e intermediária, além de misturas de solo-cimento com porcentagens de 5% e 10%

para o solo 1 e de 3%, 4%, 5%, 6% e 7% de cimento, considerando tempos de cura de 7 e 28 dias. Para as misturas de solo 01 e escória verificaram elevados valores de ISC, sendo mais evidentes nas amostras com menor porcentagem de escória e na energia modificada. Os valores de MR também foram bem expressivos atingindo valores maiores que 2.000 MPa (solo01+escória15%). Para as misturas com o solo 02 e escória o mesmo comportamento foi observado, entretanto os valores de MR não ultrapassaram os 400 MPa, mesmo com valores de ISC maiores que os das misturas com solo 01. A nível de comparação, os autores mediram o comportamento resiliente de uma mistura de solo02-cimento3% e o valor obtido foi de 587 MPa e ISC de 128,1% na energia modificada. Os autores sugerem um valor ótimo para a escória KR, relatam que os valores de ISC das misturas tenderam a reduzir quando a porcentagem superava os 20% e justificam o fenômeno pelo mecanismo de estabilização de solos argilosos ser devido à troca catiônica. No trecho experimental foi empregado a mistura solo01+escória20% na sub-base e a mistura solo02+cimento3% como base e comparado com outra seção formada solo02+cimento3% como base e sub-base. De acordo com as análises de campo e testes de tráfego, concluíram que ambas as soluções apresentaram comportamentos semelhantes, mostrando que a mistura de solo-escória KR como camadas de base e sub-base funcionou tão bem quanto a mistura dita convencional (solo-cimento).

2.8. Normativas de Resíduos Siderúrgicos Quanto à Aplicação em Pavimentação

Neste item serão apresentadas normas brasileiras que abordem especificações de parâmetros físicos ou métodos de ensaios para aplicação de materiais de origem siderúrgica em pavimentação. O Quadro 3 apresenta as normas e a descrição de cada uma.

Quadro 3 – Normas aplicadas a coprodutos siderúrgicos para pavimentação.

Norma	Descrição
DNER 262 (DNER, 1994b)	Escória de aciaria para pavimentos rodoviários
DNIT 114 (DNIT, 2009a)	Pavimentação rodoviária – Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria – ACERITA® – ES
DNIT 115 (DNIT, 2009b)	Pavimentação rodoviária – Base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria – ACERITA® – ES
NBR 16364 (ABNT, 2015)	Execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária – Procedimento

DNIT 406 (DNIT, 2017a)	Pavimentação rodoviária – Base estabilizada granulometricamente com Açobrita® – ES
DNIT 407 (DNIT, 2017b)	Pavimentação Rodoviária – Sub-base Estabilizada Granulometricamente com Açobrita®

Fonte: A autora (2023).

2.8.1. *Escória de aciaria para pavimentos rodoviários - DNER 262 (DNER, 1994b)*

Outra especificação de material da escória de aciaria para pavimento rodoviário é a DNER 262 (DNER, 1994b), definindo-a como resíduo silicoso originada da fabricação de aço. As escórias de aciaria devem atender aos seguintes critérios: a) avaliação de potencial de expansão não deve ultrapassar o valor de 3% ou o valor especificado em projeto; b) teor de impurezas deve ser zero, além de isenta de contaminação por escória de alto forno, solo ou outro material que possa prejudicar as especificações do projeto; c) quanto a granulometria deve ser mantida a proporção de 40% na faixa de até 1/2” (1,27 cm) e de 60% na faixa de 1/2” (1,27 cm) até 2” (5,08 cm) da abertura nominal; d) absorção de água de 1% a 2%; e) massa específica de 3 g/cm³ a 3,5 g/cm³; f) massa unitária de 1,5 kg/dm³ a 1,7 kg/dm³; g) desgaste a abrasão no máximo igual a 25% e h) durabilidade a sulfato de sódio em cinco ciclos entre 0 e 5%. A Tabela 5 traz um resumo dos parâmetros descritos.

Tabela 5 – Resumo dos parâmetros exigidos em DNER 262 (DNER, 1994).

Parâmetro (Pavimentos rodoviários)	Escória de Aciaria
Absorção de água (%)	1 a 2
Massa específica (g/cm ³)	3 a 3,5
Massa unitária (kg/dm ³)	1,5 a 1,7
Desgaste a Abrasão (%)	≤ 25
Durabilidade ao sulfato de sódio (%)	0 a 5

Fonte: Adaptado de DNER (1994).

2.8.2. *Pavimentação rodoviária – Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria – ACERITA® – ES - DNIT 114 (DNIT, 2009a) e Pavimentação rodoviária – Base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria – ACERITA® – ES - DNIT 115 (DNIT, 2009b)*

Em DNIT 114 (DNIT, 2009a) são apresentadas as especificações de serviço para execução de sub-base rodoviária estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - Acerita® e DNIT 115 (DNIT, 2009b) apresenta os requisitos necessários para o emprego de

Acerita® em camadas de base rodoviária estabilizada granulometricamente. São estabelecidas sistemáticas para a execução, onde as misturas, para ambas as camadas, não podem ultrapassar a proporção granulométrica de 80% e de no mínimo 50% em peso, misturadas a solos de comportamento laterítico. A Acerita® é definida como escória de aciaria LD, obtida na etapa de refino do aço líquido tratada com molhagem e aeração para redução da expansão, produzida pela Arcelor Mittal-Tubarão. Em DNIT 115 (DNIT, 2009b) a composição granulométrica da escória deve satisfazer a faixa apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 – Faixa Granulométrica de Acerita® para base.

Peneiras	% em peso passando	Tolerâncias de faixa de projeto
1"	100	± 7
3/8"	50 - 85	± 7
Nº4	35 - 65	± 5
Nº10	25 - 50	± 5
Nº40	15 - 30	± 2
Nº200	5 - 15	± 2

Fonte: DNIT (2009b).

A escória LD Acerita® deve apresentar ISC igual ou superior a 80% na energia intermediária de compactação, uma resistência a abrasão *Los Angeles* inferior a 40%, um potencial de expansão médio de 3 corpos de prova inferior a 3%, além de módulo de resiliência de igual ou superior a 300 MPa. Para o solo a ser empregado nas misturas, este deve apresentar comportamento laterítico e pertencer a um dos grupos LA, LA' ou LG' da classificação MCT e se enquadrar na faixa granulométrica apresentada no Quadro 5 e as misturas de solo e Acerita® na faixa apresentada no Quadro 6.

Quadro 5 – Faixa Granulométrica do Solo.

Peneiras	Faixas, % em peso passando
1"	100
3/8"	90 - 100
Nº4	89 - 99
Nº10	85 - 97
Nº40	63 - 80
Nº100	52 - 67
Nº200	45 - 65

Fonte: DNIT (2009b).

Quadro 6 – Faixas Granulométricas das misturas (ACERITA® + Solo) camada de base.

Peneiras	% em peso passando		Tolerância da faixa de projeto
	A	B	
1"	100	100	± 7
3/8"	50 - 85	60 - 100	± 7
Nº4	35 - 65	50 - 85	± 5
Nº10	25 - 50	40 - 70	± 5
Nº40	15 - 30	25 - 50	± 2
Nº200	5 - 15	10 - 35	± 2

Fonte: DNIT (2009b).

As exigências para as misturas de solo-Acerita® são apresentar um ISC superior a 60% e expansão máxima de 0,5% na energia intermediária, um MR também igual ou superior a 300 MPa e potencial de expansão da escória inferior a 1,5%. A Tabela 6 mostra um resumo com as exigências já citadas sobre DNIT 115 (DNIT, 2009b).

Tabela 6 – Resumo dos parâmetros exigidos por DNIT 115 (DNIT, 2009b).

Parâmetro (base)	Acerita®	Misturas (com solo laterítico)
ISC (intermediária) (%)	≥ 80	> 60
Expansão (ISC) (%)	-	< 0,5
MR (MPa)	≥ 300	≥ 300
Potencial de Expansão (%)	< 3	< 1,5
Desgaste a Abrasão (%)	< 40	-
Tipo de Solo (MCT)	-	LA, LA', LG'

Fonte: Adaptado de DNIT (2009b).

DNIT 114 (DNIT, 2009a) estabelece faixa granulométrica da escória Acerita® apresentada no Quadro 5. Para ser empregada em sub-base de camadas de pavimentação, a escória Acerita® deve ter $ISC \geq 60\%$, na energia intermediária. Quanto ao desgaste a abrasão deve ser inferior a 40% e potencial de expansão médio inferior a 3%. O valor de MR segue com a exigência de maior ou igual a 300 MPa. O solo da mistura deve ser de comportamento laterítico, podendo ser LA, LA' ou LG' pela classificação MCT. Ressalta-se que o material pode ter até 15% retido, em peso, na peneira nº 10 e ter composição granulométrica conforme anteriormente apresentado no Quadro 5. As misturas com Acerita® devem satisfazer as seguintes exigências: a) composição de granulometria em uma das duas faixas apresentadas no Quadro 5; b) ISC maior que 20% expansão máxima de 1% com energia intermediária e c) Expansão obtida pelo ensaio de avaliação do potencial de expansão inferior a 1,5%. A Tabela 7 apresenta um compilado dos parâmetros descritos.

Tabela 7 – Parâmetros necessários para uso de misturas de Acerita®.

Parâmetro (sub-base)	Acerita®	Misturas (com solo laterítico)
ISC (intermediária) (%)	≥ 60	> 20
Expansão (ISC) (%)	-	< 1
MR (MPa)	≥ 300	-
Potencial de Expansão (%)	< 3	< 1,5
Desgaste a Abrasão (%)	< 40	-
Tipo de Solo (MCT)	-	LA, LA', LG'

Fonte: Adaptado de DNIT (2009a).

2.8.3. Execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária – Procedimento - NBR 16364/2015 (ABNT, 2015)

A NBR 16.364 (ABNT, 2015) trata das diretrizes de execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária. Ela define agregado siderúrgico como material originado da produção e refino de aço formado por óxidos e silicatos com alta resistência ao desgaste, empregado em obras de pavimentação e com as mesmas funções dos agregados naturais não renováveis. Para que o agregado siderúrgico possa ser aplicado em camadas de sub-base e base, este deve atender os seguintes requisitos: a) ISC igual ou superior a 80% na energia modificada de compactação; b) resistência a abrasão deve ser inferior a 55%; c) média de potencial de expansão inferior a 3%; d) MR igual ou superior a 90 MPa para o menor valor de tensão confinante aplicada; e) índice de forma superior a 0,5 e partículas lamelares com porcentagem menor ou igual a 10% e f) distribuição granulométrica conforme faixa apresentada no Quadro 7.

Quadro 7 – Faixa granulométrica para agregado siderúrgico.

Peneiras	% em peso passando	Tolerâncias de faixa de projeto
2"	100	± 7
1"	80 - 100	± 7
3/8"	50 - 85	± 7
Nº4	35 - 65	± 5
Nº10	20 - 50	± 5
Nº40	5 - 30	± 2
Nº200	0 - 15	± 2

Fonte: ABNT (2015).

Para as misturas de solo e agregado siderúrgico, a NBR 16.364 (ABNT, 2015) apresenta as seguintes exigências quando o solo for laterítico: a) limite de liquidez menor ou igual a 40% e b) índice de plasticidade menor ou igual a 15%. Mas, caso o solo não possua comportamento laterítico este deve ter $LL \leq 25\%$ e $IP \leq 6\%$. Para aplicação em sub-base o ISC e a expansão

devem ser $\geq 20\%$ e $\leq 1\%$, respectivamente. Para camada de base a mistura dever apresentar $ISC \geq 60\%$ e expansão $\leq 0,5\%$, para $N \leq 5 \times 10^6$ e $ISC \geq 80\%$ e expansão de $\leq 0,5\%$ para $N > 5 \times 10^6$. Quanto a distribuição granulométrica das misturas para base, esta deve seguir a faixa apresentada no Quadro 8. Já a Tabela 8 apresenta um resumo com os parâmetros exigidos pela NBR 16.364 (ABNT, 2015).

Quadro 8 – Faixas granulométricas para misturas de solo-agregado para base rodoviária.

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$			Para $N < 5 \times 10^6$			Tolerâncias da faixa de projeto
Peneiras	A	B	C	D	E	F	
	% em massa passante						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75 - 90	100	100	100	100	± 7
3/8"	35 - 65	60 - 100	50 - 85	60 - 100	-	-	± 7
Nº4	25 - 55	50 - 85	35 - 50	50 - 85	55 - 100	10 - 100	± 5
Nº10	15 - 40	40 - 70	25 - 50	40 - 70	40 - 100	55 - 100	± 5
Nº40	8 - 20	25 - 50	15 - 30	25 - 45	20 - 50	30 - 70	± 2
Nº200	2 - 8	10 - 35	5 - 15	10 - 25	6 - 20	8 - 25	± 2

Fonte: ABNT (2015).

Tabela 8 – Parâmetros exigidos pela NBR 16.364 (ABNT, 2015).

Parâmetro	Agregado Siderúrgico	Mistura (Solo-agregado)		
		Sub-base	Base	
			$N \leq 5 \times 10^6$	$N > 5 \times 10^6$
ISC (modificada) (%)	≥ 80	≥ 20	≥ 60	≥ 80
Expansão (ISC) (%)	-	≤ 1	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$
Desgaste a Abrasão (%)	≤ 55	-	-	-
MR (MPa)	≥ 90	-	-	-
Potencial de Expansão (%)	< 3	-	-	-
Índice de Forma	0,5	-	-	-
Partículas Lamelares (%)	≤ 10	-	-	-
Solo		Laterítico	Não laterítico	
LL (%)	-	≤ 40	≤ 15	
IP (%)	-	≤ 15	≤ 6	

Fonte: Adaptado de ABNT (2015).

2.8.4. **Pavimentação rodoviária – Base estabilizada granulometricamente com Açobrita® – ES - DNIT 406 (DNIT, 2017a) e Pavimentação Rodoviária – Sub-base Estabilizada Granulometricamente com Açobrita® - DNIT 407 (DNIT, 2017b)**

A especificação de serviço DNIT 406 (DNIT, 2017a) traz diretrizes para execução de camada de base de pavimentos rodoviários estabilizadas granulometricamente com emprego

de Açobrita®, além de definir a metodologia e os requisitos que esse material deve apresentar para ser utilizado. Já DNIT 407 (DNIT, 2017b) apresenta a sistemática a ser empregada para execução de sub-base estabilizada granulometricamente com Açobrita®. Essas normas definem Açobrita® como sendo um material oriundo da produção e do refino do aço, com alta resistência ao desgaste, tratado com molhagem e com aeração a céu aberto para redução da expansão e aplicado em obras de pavimentação.

Essa especificação DNIT 406 (DNIT, 2017a) exige que para ser empregada, a Açobrita® deve apresentar as seguintes características: a) estar enquadrada na faixa granulométrica apresentada no Quadro 9; b) o valor de ISC deve ser igual ou superior a 80% na energia modificada; c) o valor de desgaste a abrasão não deve passar dos 55%; c) no ensaio de potencial de expansão da escória de aciaria o valor deve ser inferior a 3,0%; d) quanto ao módulo de resiliência o valor de ser igual ou maior que 300 MPa e e) índice de forma deve ultrapassar 0,5 e as partículas lamelares devem ser menor ou igual a 10%.

Quadro 9 – Faixa granulométrica exigida para Açobrita®.

Peneiras	% em peso passando	Tolerâncias de faixa de projeto
2"	100	± 7
1"	80 - 100	± 7
3/8"	50 - 85	± 7
Nº4	35 - 65	± 5
Nº10	20 - 50	± 5
Nº40	5 - 30	± 2
Nº20	0 - 15	± 2

Fonte: DNIT, 2017.

Já para as misturas de solo e Açobrita® deve seguir uma das faixas granulométricas apresentadas no anexo da norma supracitada. Caso o solo da mistura tenha características lateríticas, este deve satisfazer o valor de 40% ou menor para LL e IP menor ou igual a 15%. Para os solos não lateríticos, LL deve ser $\leq 25\%$ e IP $\leq 6\%$. A mistura deve apresentar ISC de no mínimo 60% para um número $N \leq 5 \times 10^6$ e expansão $\leq 0,5\%$ e ISC superior a 80% para um número $N > 5 \times 10^6$ e expansão inferior ou igual 0,5%, ambos na energia de compactação modificada. O valor do ensaio de potencial de expansão deve ser $\leq 1,5\%$ para um número $N \leq 5 \times 10^6$ e expansão de 1,0% para um número $N > 5 \times 10^6$. A Tabela 9 apresenta um resumo dos parâmetros exigidos em DNIT 406 (DNIT, 2017a) para uso de Açobrita® em camadas de base e das misturas desse agregado com solo.

Tabela 9 – Parâmetros apresentados em DNIT 406/2017 (DNIT, 2017a).

Parâmetro (base)	Açobrita®	Misturas	
		$N \leq 5 \times 10^6$	$N > 5 \times 10^6$
ISC (modificada) (%)	≥ 80	60	80
Expansão (ISC) (%)	-	$< 0,50$	$< 0,50$
MR (modificada) (MPa)	≥ 300	-	-
Potencial de Expansão (%)	< 3	$\leq 1,5$	< 1
Índice de Forma	0,5	-	-
Partículas Lamelares (%)	> 10	-	-
Desgaste a Abrasão (%)	≤ 55	-	-
Solo		Laterítico	Não laterítico
LL (%)		≤ 40	≤ 25
IP (%)		≤ 15	≤ 6

Fonte: Adaptado de DNIT (2017a).

Em DNIT 407/2017 (DNIT, 2017a) são evidenciados os parâmetros físicos necessários para que o agregado de Açobrita® seja aplicado em camadas de sub-base rodoviária. A granulometria deve seguir a mesma já especificada no Quadro 8. O valor de ISC deve ser $\geq 20\%$ na energia intermediária para o agregado e para as misturas de solo-agregado, e para este a expansão deve ser menor ou igual a 1% na mesma energia. O desgaste a abrasão também não deve ultrapassar o valor de 55% e o MR deve ser maior ou igual a 300MPa. O índice de forma e a forma das partículas seguem as mesmas exigências de DNIT 406 (DNIT, 2017a), sendo de 0,5 e menor que 10%. Acrescenta-se que a água utilizada deve ser isenta de sais, ácidos, álcalis, matéria orgânica ou substâncias nocivas em teores que possa prejudicar os materiais. A Tabela 10 apresenta o resumo dos critérios descritos para uso de Açobrita® em sub-base.

Tabela 10 – Parâmetros para uso de Açobrita®.

Parâmetro (sub-base)	Açobrita®	Misturas
ISC (intermediária) (%)	≥ 20	≥ 20
Expansão (ISC) (%)	-	≤ 1
MR (MPa)	≥ 300	-
Potencial de Expansão (%)	< 3	$\leq 1,5$
Índice de Forma	0,5	-
Partículas Lamelares (%)	> 10	-
Desgaste a Abrasão (%)	≤ 55	-

Fonte: Adaptado de DNIT (2017b).

2.9. Considerações Finais

Quanto a fabricação de aço e a geração de escórias, é atual a busca por melhorias nos processos de geração desses resíduos. Que, ao serem investigados e apresentarem viabilidade técnica e econômica, deixam de ser resíduos e passam a ser coprodutos. Representando ganhos para o meio ambiente, quando estes são avaliados de forma sustentável levando em consideração o repensar, o reduzir, o reutilizar e o reciclar. O que ocorre com a escória BSSF, que apenas com processo de beneficiamento torna esse resíduo em um produto com valor agregado.

Nos estudos sobre escória de aciaria LD e EAF apresentados relatam que a principal desvantagem dessas variações de escória é a expansibilidade. O que pode apresentar patologias com o tempo ou ainda necessidade de tempo demasiado de cura, chegando nos 6 meses. Já a escória BSSF, por passar por processo de beneficiamento e resfriamento rápido, não apresenta esse tipo de comportamento sendo mais vantajoso em relação aos outros tipos de escória.

Embora as normas técnicas vigentes para pavimentação não abordem os critérios dos materiais quanto a parte ambiental, é importante avaliar através de ensaios químicos quando se trata de materiais novos e não convencionais. Ressalta-se, a importância da realização de ensaios de lixiviação para que a resolução de um problema, no caso empregar agregado siderúrgico em substituição a agregados naturais, e causar outros, poluição de lençóis freáticos, etc.

Existem diversos estudos quanto ao emprego de escórias, tanto de alto-forno como de aciaria, para camadas de pavimentos rodoviários. Alguns desses estudos serviram de base na presente pesquisa, a partir da ausência de estudos nacionais e internacionais quanto ao emprego de escória de aciaria BSSF para uso em estabilização de solos. Entretanto, assim como o observado neste estudo, outros autores relatam as diversas vantagens quanto à substituição de agregados naturais por agregados oriundos da siderurgia, como a escória.

É importante apresentar parâmetros geotécnicos e mecânicos para outros tipos de resíduos com objetivo de ampliar a investigação. Além de apresentar conceitos que servem de base para justificar as discussões dos resultados.

Com base nas normas apresentadas, é possível afirmar que existe uma lacuna, onde ainda não existe norma para especificação do agregado siderúrgico BSSF abordado neste estudo. Devido a essa ausência, o agregado e os demais materiais foram avaliados com base em normas destinada aos outros materiais de origem siderúrgica.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais Utilizados

3.1.1. Solo

O solo (coloração avermelhada) utilizado nesta pesquisa é proveniente do distrito de Catuana (Figura 5), localizado no município de Caucaia, Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). O material foi empregado na camada de base na obra de duplicação de uma rodovia cearense, somente após estabilização granulométrica e química, com 3% de cimento e 28,5% brita (em massa). Após a coleta, o material foi levado para o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC) onde foram realizados os ensaios de caracterização geotécnica e mecânica.

Figura 5 – Local de coleta do solo.



Fonte: Google Earth (2022).

3.1.2. Agregado Siderúrgico pelo Processo BSSF

O agregado siderúrgico produzido pelo processo BSSF foi doado pela empresa SR Refratário LTDA, empresa parceira da Arcelor Mittal Pecém, localizada na estrada da CE-422 no município de São Gonçalo do Amarante, distante aproximadamente 62 km de Fortaleza. O material foi coletado na data de 25 de janeiro de 2023, e levado para o Laboratório de Mecânica

dos Solos (LMS) do Instituto Federal do Ceará (IFCE) *campus* Fortaleza (Figura 6) onde passou por homogeneização e posterior caracterização.

Figura 6 – Coleta do agregado siderúrgico (a) e amostra dos grãos (b).



Fonte: A autora (2023).

3.2. Métodos Empregados

A parte metodológica foi dividida em 4 etapas. A primeira foi iniciada com a coleta e secagem dos materiais. A segunda consistiu na execução de ensaios de caracterização física individualmente de cada insumo, solo e o agregado siderúrgico BSSF. Na terceira, foram definidas as porcentagens das misturas solo-agregado e os ensaios mecânicos. A quarta e última etapa consistiu na realização de ensaios químicos e análise dos resultados do solo, do agregado e das misturas de solo-agregado (Figura 7).

Figura 7 – Fluxograma das etapas do programa experimental da pesquisa.



Fonte: A autora (2023).

Os ensaios realizados e suas respectivas normas podem ser observados na Tabela 11, além do tipo de caracterização (mecânica, química ou física) e quais materiais utilizados em cada ensaio.

Tabela 11 – Normas de referência para a realização dos ensaios.

Caracterização	Ensaio	Norma	Material
Física	Preparação de Amostra	DNER-ME 041/94	Solo e Agregado
	Granulometria por Peneiramento	DNER-ME 080/94	Solo e Agregado
	Granulometria por Sedimentação	DNER-ME 051/94	Solo
	Limite de Liquidez (LL)	DNER-ME 122/94	Solo e Agregado
	Limite de Plasticidade (LP)	DNER-ME 082/94	Solo e Agregado
	Densidade Real dos Grãos	DNER-ME 093/94	Solo e Agregado
	Densidade Real Agregado Miúdo	DNER-ME 084/95	Agregado
	Equivalente de Areia	DNER-ME 054/97	Solo e Agregado
	Classificação MCT	DNER-ME 258/94 DNER-ME 256/94	Solo
	Permeabilidade	NBR 14.545/21 NBR 13.292/21	Solo, Agregado e Misturas
Mecânica	Resistencia à Abrasão	DNER-ME 035/98	Agregado
	Compactação	DNER-ME 162/94	Solo e Misturas
	Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão	DNIT 172/2016 - ME	Solo e Misturas
	Módulo de Resiliência (MR)	DNER-ME 134/2018	Solo e Misturas
	Deformação Permanente (DP)	DNIT 179/18	Solo e Misturas
Química	FRX	-	Solo, Agregado e Misturas
	DRX	-	Solo, Agregado e Misturas
	Caracterização dos resíduos sólidos Lixiviação e Solubilização	NBR 10.004/10.005/ 10.006 (2004)	Solo, Agregado e Mistura M2 (SN50+AS50)

Fonte: A autora (2023).

3.2.1. Preparação das Amostras de Solo Natural (SN) e Agregado Siderúrgico (AS)

As amostras de solo e agregado siderúrgico, após a coleta em campo, foram levadas para o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da UFC e para o Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) do Instituto Federal do Ceará (IFCE), onde foram deixadas ao ar

para secagem. Após isso, foram destorroadas e preparadas para a realização dos ensaios de caracterização dos materiais embasados por DNER-ME 041 (DNER, 1994) (Figura 8).

Figura 8 – Secagem do solo natural (a) e do agregado siderúrgico (b) coletados.



Fonte: A autora (2023).

3.2.2. *Caracterização Física do Solo, Agregado Siderúrgico e Misturas*

A caracterização do solo natural e do agregado começou pelos ensaios físicos, onde foram executados para o solo natural os ensaios de granulometria por peneiramento e por sedimentação, densidade real dos grãos, limites de Atterberg (plasticidade e liquidez), equivalente de areia, ensaios de mini-MCV e perda de massa por imersão para caracterização MCT. Para a caracterização do agregado siderúrgico, realizaram-se os ensaios de granulometria por peneiramento, densidade real do agregado miúdo e equivalente de areia.

3.2.2.1. *Análise Granulométrica, Limites de Consistências e Densidade Real dos Grãos*

Por meio de identificação tátil-visual verificou-se que o solo, possui predominância de frações granulométricas inferiores a fração pedregulho. Logo, a análise granulométrica foi realizada tomando-se por diretriz DNER-ME 080 (DNER, 1994). Além do peneiramento, executou-se ainda, a análise granulométrica do solo por sedimentação com uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio) seguindo DNER-ME 051 (DNER, 1994) e tomando por base uma repetição de ensaio. Para o agregado siderúrgico foi realizado o ensaio apenas por peneiramento, com utilização de base vibratória, tomando por base a norma de solos já supracitada e repetido por três vezes (Figura 9).

Figura 9 – Lavagem (a) e peneiramento (b) do agregado siderúrgico



Fonte: A autora (2023).

De acordo com Souza *et al.* (2000), para a engenharia, uma das propriedades mais importantes é a consistência do solo, isso porque ajuda a prever o comportamento diante de tensões e deformações. Dessa forma, é essencial, principalmente para obras rodoviárias, a determinação dos limites de consistência do solo. Neste estudo, os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade basearam-se, respectivamente em DNER-ME 122 (DNER, 1994) e DNER-ME 082 (DNER, 1994). Entretanto, não foi possível realizar o ensaio de LL e LP com a amostra do agregado siderúrgico, pois o material não apresenta propriedades coesivas para a realização do procedimento, sendo caracterizado como não plástico (NP) e não líquido (NL).

Os métodos contidos em DNER-ME 093 (DNER, 1994) embasaram a execução do ensaio de densidade real dos grãos para o solo, que foi realizado a partir de seis determinações. Com emprego de picnômetros, determinou-se pelo menos dois valores com diferença que não ultrapassasse 0,009 da média de no mínimo duas determinações. Para determinação da densidade real do agregado, aplicou-se os procedimentos dispostos em DNER-ME 084 (DNER, 1995) a partir de duas determinações com diferença de no máximo 0,02 entre si (Figura 10).

Figura 10 – Densidade real dos grãos do AS: pesagem (a) e banho-maria (b).

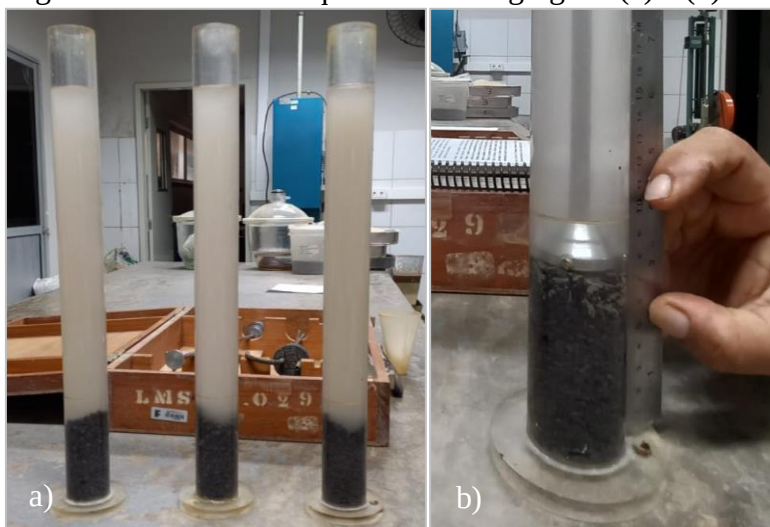


Fonte: A autora (2023).

3.2.2.2. Equivalente de Areia

O manual do DNIT (2006) define equivalente de areia como sendo a relação entre a altura de areia depositada no fundo de uma proveta e a altura total de areia e de finos em suspensão em solução aquosa de cloreto de cálcio, a fim de controlar a quantidade de finos para emprego em pavimentação. Nessa pesquisa, de modo a tornar mais completo a quantidade de dados sobre o solo e sobre o agregado, realizou-se o ensaio de equivalente de areia de acordo com DNER-ME 054 (DNER, 1997), através de três repetições para cada material (Figura 11).

Figura 11 – Ensaio de equivalente do agregado (a) e (b).



Fonte: A autora (2023).

3.2.2.3. Ensaio de Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão - Classificação MCT

O ensaio de Mini-MCV é de suma importância para a classificação MCT, pois é através dele que o coeficiente c' (coeficiente angular da parte mais inclinada e retilínea da curva obtida no Mini-MCV) é determinado. Para a realização do ensaio foi necessária a preparação prévia da amostra. Após seca ao ar, a amostra foi destorroada e pesada aproximadamente 2500 g. o material foi passado na peneira de 2 mm (nº10). Em seguida, executou-se a separação de 5 amostras contendo 500 g cada uma. Cada porção foi umedecida com umidades acrescentes, variando em 2% cada teor, tendo como referência a amostra do meio (nº3) umedecida com a umidade ótima de compactação na energia intermediária. As amostras foram homogeneizadas, acondicionadas em sacos hermeticamente fechados e deixadas em repouso por 24 horas até o instante do ensaio (Figura 12).

Figura 12 – Preparação de amostra - ensaio de mini-MCV.



Fonte: A autora (2023).

O procedimento do ensaio começou com a homogeneização e pesagem de 200 g da porção anteriormente umedecida com a menor umidade. Do material restante, foi retirado uma amostra para a verificação da umidade. Os 200 g pesados foram então colocados no molde cilíndrico de compactação de mini-MCV. A superfície do solo foi cuidadosamente regularizada e em seguida um disco de plástico perfurado foi adicionado. Feito isto, a compactação efetivamente se iniciou com a leitura do extensômetro apenas do pistão sobre o solo, chamado de golpe número zero. Em seguida, foi efetuado o golpe número 1 e feita mais uma vez a leitura do extensômetro. Os golpes e as leituras foram feitos seguindo a seguinte série de golpes: 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192 e 256. Tal procedimento foi realizado para todas as cinco amostras. Os procedimentos descritos em DNER-ME 258 (DNER, 1994) embasaram

a realização deste ensaio. Para os cálculos foram usadas as equações apresentadas em DNER-ME 258 (DNER, 1994).

É através do ensaio de perda de massa por imersão que se é determinado o coeficiente e' (índice que determina se o solo é laterítico ou não e calculado a partir do coeficiente d'), usado para classificar os solos pela classificação MCT. O procedimento do ensaio consistiu em retirar de forma cuidadosa o cilindro com o corpo de prova do compactador (mini-MCV). Feito isto, com auxílio de um extrator, empurrou-se o corpo de prova compactado até que este ficasse 5 mm para fora do cilindro. Em seguida foram todos colocados na horizontal e imergidos em tanque e com auxílio de uma cápsula usada para coletar a perda de material (Figura 13).

Figura 13 – Ensaio de perda por imersão.



Fonte: A autora (2023).

A imersão durou cerca de 20 horas, em seguida a cápsula com o material desprendido foi levada para a estufa e pesado após secagem, para determinação da perda de massa. Os procedimentos realizados e as equações utilizadas foram baseados em DNER-ME 256 (DNER, 1994).

3.2.2.4. Ensaio de Permeabilidade

A permeabilidade pode ser determinada como sendo a capacidade do solo de permitir o escoamento da água entre seus vazios. E essa permeabilidade é uma das propriedades com

maior faixa de variação de valores motivados por fatores como índice de vazios do solo, temperatura, estrutura, grau de saturação e estratificação do terreno (Gomes & Costa, 2016).

Com a finalidade de obter o coeficiente de permeabilidade (k) do solo, do agregado siderúrgico e das misturas, executou-se o ensaio de permeabilidade seguindo o procedimento descrito na norma NBR 14.545 (ABNT, 2021) que apresenta a metodologia para determinação coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. O preparo do ensaio deu-se pela moldagem dos corpos de prova na energia de compactação modificada na umidade ótima em cilindro pequeno e soquete grande, onde aplicou-se 5 camadas com 27 golpes para cada. Em seguida o corpo de prova (CP) foi extraído e colocado no permeâmetro e as laterais preenchidas por bentonita, assegurando que apenas a superfície superior do CP fosse canal para a passagem de água, sem influência das laterais (Figura 14). Para o solo e as misturas com menores teores de agregado, esperou-se cerca de 3 a 4 dias até a total saturação do solo. Feito isso, realizou-se leituras, no mínimo cinco leituras, com intervalos de tempo iguais e anotou-se quanto o nível de água havia baixado dentro da bureta para o cálculo do k . Já para o agregado siderúrgico, realizou-se o ensaio de permeabilidade com carga constante, seguindo os procedimentos descritos em NBR 13.292 (ABNT, 2021) no mínimo cinco leituras. O material foi acomodado no permeâmetro, sem compactação, e em seguida realizadas as medidas de vazão que atravessam o corpo de prova.

Figura 14 – CP em permeâmetro (a) e ensaio a carga variável (b).



Fonte: A autora (2023).

3.2.3. Ensaios de Caracterização Mecânica

Com a finalidade de verificar o comportamento mecânico dos insumos e das misturas de solo-agregado, a terceira etapa dos métodos adotados consistiu na realização de ensaios de resistência à abrasão Los Angeles, compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC), Módulo de Resiliência (MR) e Deformação Permanente (DP). Os ensaios de ISC das misturas foram realizados no LMS do IFCE. Já os ensaios de MR e DP do solo e das misturas foram realizados no LMP da UFC.

Denominou-se de Mistura M1 (SN75+AS25) a junção de 75% de solo natural e 25% de agregado siderúrgico, de Mistura M2 (SN50+AS50) a amostra formada de 50% de solo natural e 50% de agregado siderúrgico e de Mistura M3 (SN25+AS75) a composição de 25% de solo natural mais 75% de agregado. Acrescentou-se a letra “I” (intermediária) e “M” (modificada) para identificar a energia empregada em cada amostra, de modo a facilitar o entendimento dos gráficos.

3.2.3.1. Resistência à Abrasão

No ensaio de resistência à abrasão empregou-se o equipamento Los Angeles seguindo os preceitos da norma DNER-ME 035 (DNER, 1998) objetivando avaliar a resistência do material siderúrgico quanto às ações do tráfego rodoviário. O ensaio foi realizado apenas com o agregado.

Executou-se a separação de três amostras, cada uma pesando 2,50 kg, de material lavado e seco em estufa, todas encaixadas na faixa “C” do DNER-ME 035 (DNER, 1994). Em seguida, as amostras foram colocadas, uma por vez, no cilindro rotativo com adição de 8 esferas e rotação durante 16 minutos. Por fim realizou-se a retirada do material e a pesagem em seguida, obtendo-se a porcentagem de perda por abrasão do agregado a partir de três determinações.

3.2.3.2. Compactação e ISC dos Materiais e das Misturas

O ato de compactar resulta no aumento da massa específica aparente de um dado material (solo, agregado etc.), isso porque ocorre a expulsão de ar, favorecendo o entrosamento entre as partículas do material que recebe a aplicação da pressão, impacto ou vibração (DNIT, 2006). A partir do ensaio de compactação é obtida a curva de compactação, primordial para o

ensaio de ISC. Pois é através da curva que se obtém os valores de massa específica aparente seca máxima e de umidade ótima, dados usados na moldagem dos corpos de prova de ISC. Para a amostra de solo natural, empregou-se duas energias de compactação, intermediária e modificada, ambas seguindo DNER-ME 162 (DNER, 1994). Para a realização do ensaio de compactação com as misturas empregou-se a energia intermediária, onde o procedimento exige a execução de 5 camadas e 26 golpes/camada em cilindro grande, com repetição única para cada amostra. Entretanto, enfrentou-se dificuldade para a execução do ensaio de compactação para o agregado puro, pois o material não permitiu a formação de corpo de prova firme e compactado, apresentando fácil desagregação ao ser retirado do cilindro Proctor, além de drenagem de água logo no primeiro ponto do ensaio.

O ISC ou CBR (*California Bearing Ratio*) é largamente empregado no meio rodoviário. Um dos métodos de dimensionamento de pavimentos utilizados no Brasil ainda hoje é baseado no ISC (Motta & Medina, 2006). Dessa forma, seguindo os critérios do DNER-ME 172 (DNER, 2016) foram moldados um único corpo de prova (CP) para cada amostra nas umidades ótimas obtidas no ensaio de compactação, nas energias intermediária e modificada para o solo natural e para as misturas solo-agregado. Após 96 horas submersos em água, estes foram rompidos com auxílio de prensa mecânica a fim de obter os valores de ISC para cada mistura, além dos valores de expansão com utilização de extensômetro (Figura 15).

Figura 15 – Ensaio de ISC com CP em tanque (a) e em prensa (b).

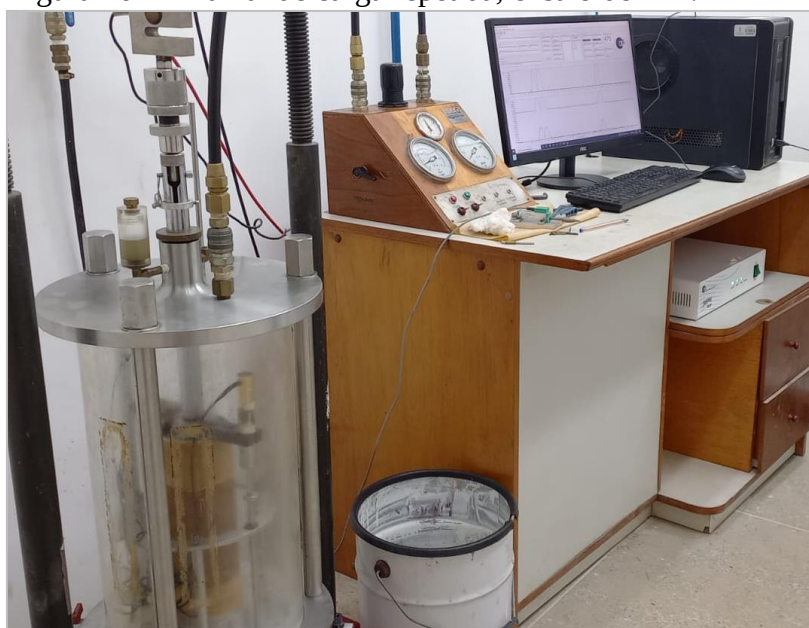


Fonte: A autora (2023).

3.2.3.3. Módulo de Resiliência

Nesta pesquisa, utilizou-se o equipamento triaxial de cargas repetidas, empregando-se os 18 pares de tensão referenciados na norma do DNIT 134 (DNIT, 2018) para a determinação do Módulo de Resiliência (MR). Seguindo isto, foram moldados corpos de prova em cilindro tripartido, com diâmetro e altura de 10 cm e 20 cm, respectivamente, para cada energia de compactação analisada na pesquisa com repetição única. Cada mistura, após adição do volume de água correspondente à umidade ótima, foi deixada aproximadamente 24 horas para total umidificação. Para a compactação do solo, utilizou-se aproximadamente 4 kg de solo seco mais água após correção de umidade. Foram empregadas 10 camadas e 10 golpes/camada para a energia intermediária e 10 camadas e 21 golpes/camada na energia modificada. A frequência da carga repetida foi de 1 Hz, com 500 ciclos de repetição realizado em cada par de tensão e de 100 ciclos na fase de condicionamento (Figura 16).

Figura 16 – Triaxial de carga repetida, ensaio de MR.



Fonte: A autora (2023).

De acordo com Motta e Medina (2015), os módulos de resiliência têm sido representados pelos modelos descritos na Tabela 12. O modelo que considera a tensão confinante para análise de solos arenosos, o modelo que considera a tensão desvio para solos argilosos e o composto para análise de qualquer tipo de solo. Dessa forma, tais modelos foram aplicados para análise dos dados de MR do solo desta pesquisa.

Tabela 12 – Equações dos modelos empregados para análise de MR.

Equação	Nome do modelo	Autor (a)
$MR = K_1 \times \sigma_3^{K_2} \quad (1)$	Em função da tensão confinante	Preussler (1978)
$MR = K_1 \times \sigma_d^{K_2} \quad (2)$	Em função da tensão desvio	Svenson (1980)
$MR = K_1 \times \sigma_3^{K_2} \times \sigma_d^{K_3} \quad (3)$	Composto	Macedo (1996)

Fonte: A autora (2023).

Em que:

MR = Módulo de resiliência (MPa);

σ_3 = Tensão confinante (MPa);

σ_d = Tensão desvio (MPa);

K = Constantes determinadas experimentalmente (adimensional).

Motta e Medina (2006) afirmam que a maior parte dos solos apresenta comportamento tensão-deformação elástico não linear e que os modelos simples (Tabela 12) foram largamente empregados em estudos, entretanto o modelo composto (Equação 3) tomou espaço por ser mais abrangente e não necessitar de conhecimento prévio sobre o comportamento do solo.

Os valores de K_1 , K_2 e K_3 (constantes determinadas experimentalmente) e os coeficientes de determinação (R^2) do solo foram determinados com auxílio do programa Lab Fit Ajuste de Curvas (Silva, 2004), largamente empregado para análise e tratamento de dados. A análise quanto aos modelos se representam ou não os materiais foram considerados a partir dos valores de R^2 (<0,85). Além dos sinais (positivo ou negativo) das constantes K_1 , K_2 e K_3 para analisar a interferência destas nas variáveis correspondentes e consequentemente nos resultados de MR. Os módulos de resiliência médios foram determinados através da média dos valores fornecidos pelo sistema do equipamento triaxial de carga repetida. Assim como os valores médios de MR médio modelado, obtidos a partir da média dos valores para todos os pares de tensão aplicados.

3.2.3.4. Deformação Permanente

Com o objetivo de determinar a deformação das amostras, utilizou-se o equipamento triaxial de cargas repetidas, o mesmo empregado para o ensaio de módulo de resiliência. Foram moldados 6 corpos de prova, um para cada par de tensão (pré-selecionados) com repetição única em cilindro tripartido com diâmetro e altura de 10 cm e 20 cm, conforme DNIT 179 (DNIT, 2018), para a energia de compactação modificada utilizando a umidade ótima obtida no ensaio de compactação. Exceto aquele que apresentaram problemas quanto a ensaio e resultados fora do comum, estes foram refeitos de modo a sanar equívocos. A frequência da

carga repetida adotada foi de 2 Hz, com 100 ciclos na fase de condicionamento e com 150.000 ciclos de repetição realizado em cada par de tensão. Empregou-se 3 valores de tensão confinante. Para cada escolheu-se dois valores de tensão desvio, totalizando seis pares de tensões, apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Pares de tensões empregados.

Tensão Confinante (σ_3) (kPa)	Tensão Desvio (σ_d) (kPa)	σ_d / σ_3
40	40	2
	120	4
80	80	2
	240	4
120	240	3
	360	4

Fonte: A autora (2023).

Para determinação dos coeficientes de regressão (Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_3 e Ψ_4) e de determinação (R^2), empregou-se o modelo matemático proposto por Guimarães (2009) representado pela Equação 4. Os valores de R^2 ($< 0,85$) foram considerados como fator de análise para determinar se o modelo representou de forma satisfatória ou não os dados fornecidos pelo equipamento. Além dos sinais (positivo ou negativo) das constantes Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_3 e Ψ_4 para analisar a interferência destas nas variáveis correspondentes e consequentemente nos resultados de DP.

$$\varepsilon_p^{esp} (\%) = \Psi_1 \times (\sigma_3)^{\Psi_2} \times (\sigma_d)^{\Psi_3} \times (N)^{\Psi_4} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que:

ε_p^{esp} = Deformação específica plástica ou permanente acumulada;

Ψ = Parâmetros de regressão;

σ_3 = Tensão confinante;

σ_d = Tensão desvio;

N = Número de ciclos de aplicação de carga.

Para a análise de ocorrência de acomodamento ou *shakedown* foi empregado o modelo Dawson e Wellner, citado por Werkmeister (2003) para elaboração de gráficos de deformação permanente vertical acumulada *versus* taxa de acréscimo de deformação permanente total e análise de comportamento. A taxa de acréscimo de deformação permanente foi calculada a partir da subtração do deslocamento (n) pelo deslocamento (n-1) dividido pela subtração do n° de ciclo (n) pelo n° ciclo (n-1) em metros/ciclo de carga. E para formar os valores do eixo x,

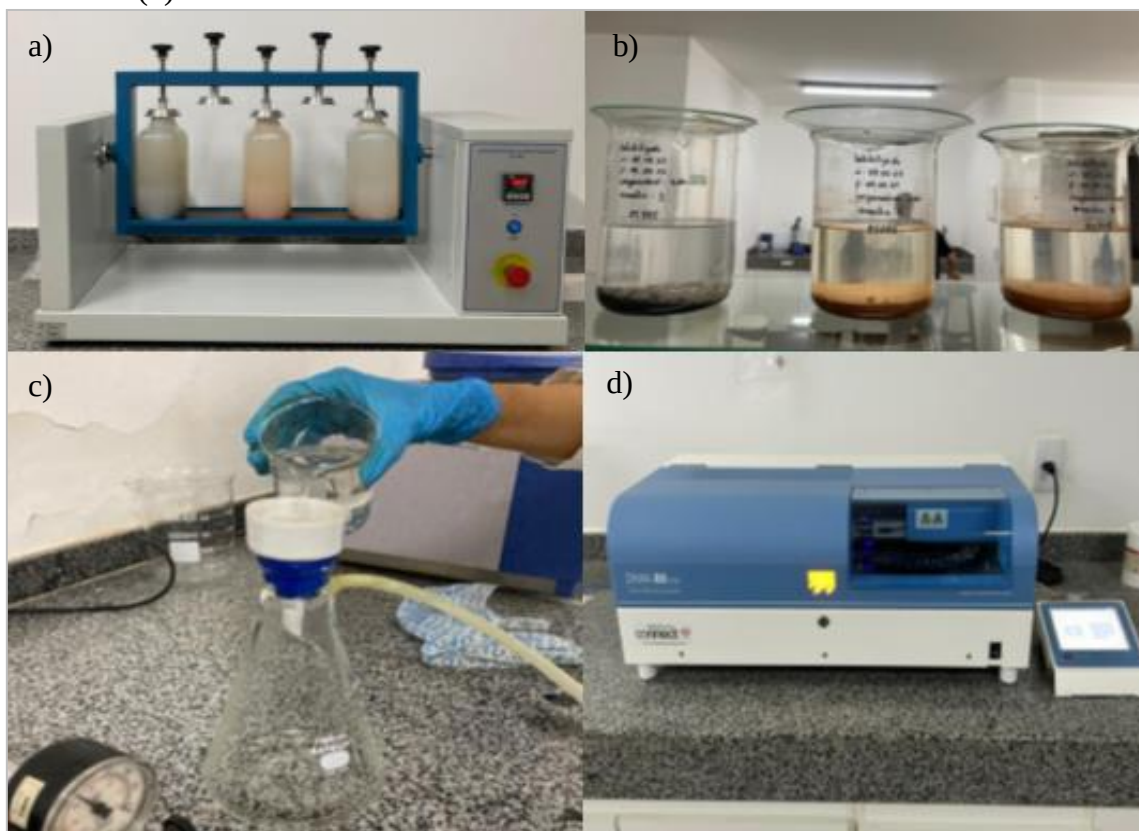
tomou-se os valores de deformação permanente vertical acumulada dado em cm pelo equipamento e converteu-se para metros.

3.2.4. Ensaios de Caracterização Química

3.2.4.1. Extrato Lixiviado e Solubilizado

Foram realizados ensaios de solubilização e lixiviação (diluição), seguindo o procedimento de ensaio para materiais não voláteis e 100% sólidos, objetivando a caracterização ambiental dos materiais, solo e agregado siderúrgico e da amostra M2 (S50+E50), devido à limitação de recursos. Os procedimentos foram realizados pelo Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC) localizado dentro da UFC e patrocinado pela Arcelor Mittal Pecém. Os procedimentos tomaram como base a NBR 10.004 (ABNT, 2004), NBR 10.005 (ABNT, 2004) e NBR 10.006 (ABNT, 2004) para a realização dos ensaios. A Figura 17 apresenta alguns dos procedimentos dos ensaios realizados para obtenção de parâmetros para classificação dos resíduos sólidos dos materiais analisados.

Figura 17 – Ensaios de lixiviação (a), solubilização (b), filtração (c) e determinação de mercúrio (d).



Fonte: A autora (2023).

3.2.4.2. *Fluorescência de Raio X (FRX) e Difração de Raio X (DRX)*

De acordo com a NBR ISO 12.677 (ABNT, 2014), a espectrometria de Raio X (FRX) é uma técnica que correlaciona a intensidade dos Raio X característicos dos elementos químicos com seu teor na amostra e que emprega as propriedades ondulatórias das radiações fazendo uso de uma estrutura cristalina para discriminar os diversos comprimentos de onda presentes nos feixes de Raio X, além de quantificar a intensidade da radiação selecionada para cada elemento químico através de detectores.

Melo Junior (2007) define a análise de FRX como sendo um método qualitativo e quantitativo multielementar que se baseia na intensidade dos Raio X característicos emitidos pelos elementos que formam o material e são ativadas por partículas como elétrons, prótons ou íons produzidos em aceleradores de partículas ou ondas eletromagnéticas. O ensaio de difração de Raio X foi realizado com objetivo de complementar os resultados encontrados nas análises de FRX e fazer conhecer as fases que compõem os materiais, em especial o agregado siderúrgico. Pois as escórias sem o tratamento realizado no processo BSSF apresentam comportamento expansivo e conhecer quimicamente as amostras favorece a correção de eventuais patologias por expansão.

Já o equipamento de DRX foi um Hybrid Monochi 2xGe220 Co Asym 9MPD) e o de FRX um Rigaku ZSX mini II. Partindo disso e objetivando conhecer quimicamente os materiais estudados, foram realizados ensaios de FRX e DRX para todas as amostras. As análises foram realizadas no laboratório de Raio X da UFC.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Caracterização Física dos Materiais

4.1.1. Caracterização e Classificação dos Materiais

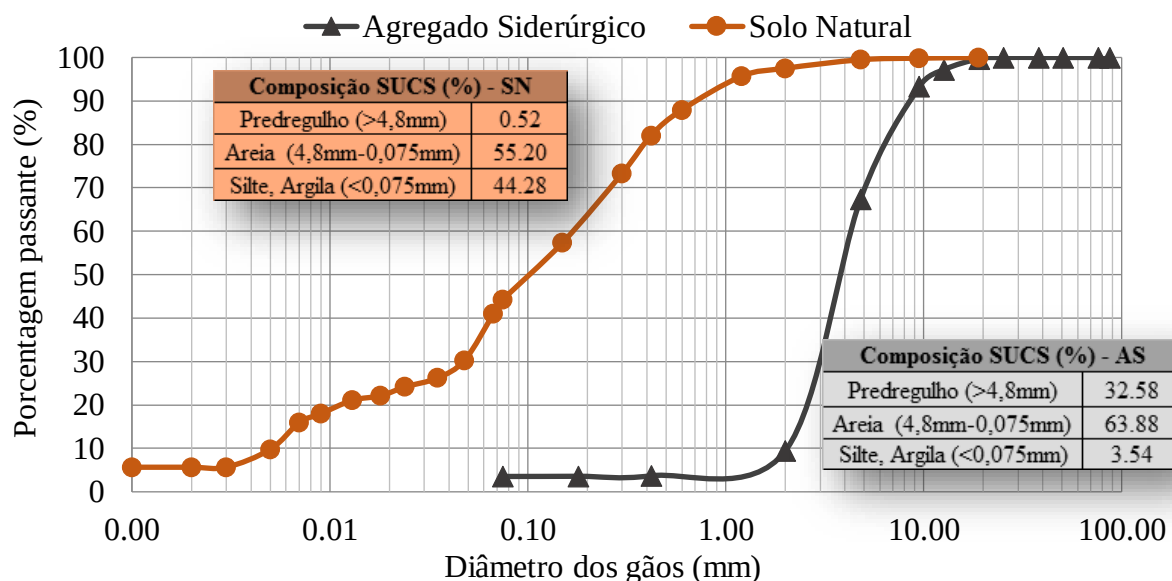
Quanto a caracterização da plasticidade, o limite de plasticidade (LP) obtido para o solo foi de 15% e o limite de liquidez (LL) foi de 24%, consequentemente, com 9% de índice de plasticidade (IP). O agregado siderúrgico, como já esperado, devido à baixa porcentagem de finos, apresentou comportamento não plástico (NP) e não líquido (NL), reforçado por outros autores que relatam esse comportamento para agregados oriundos de siderurgia.

Conforme DNIT (2006), para emprego em camadas de pavimentos rodoviários é exigido um valor máximo de 25% para LL e de 6% para IP. Todavia, de acordo com Nogami e Villibor (1995), para solos em condições ambientais tropicais estes limites não são mais aplicáveis. De acordo com os autores, nem sempre os materiais com valores altos de LL irão expandir ou expandirão muito pouco após compactados e submergidos em água.

A partir dos ensaios de granulometria DNER-ME 080 (DNER, 1994) e DNER-ME 051 (DNER, 1994), o solo apresentou 55,2% de areia (4,8mm-0,075mm), 38,6% de silte e 5,7% de argila (<0,075mm) e apenas 0,5% de pedregulho (>4,8mm) em sua composição, sendo considerado como A-4, solo siltoso, com propriedades de fraco a pobre, pela classificação TRB-AASHTO (*Transportation Research Board - American Association of State Highway and Transportation Officials*) (AASHTO, 1973). E classificado como areia argilosa (SC) pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), com coeficiente de uniformidade (C_u) de 45 e o coeficiente de curvatura (C_c) de 3,2, solo desuniforme e mal graduado de granulação aberta, pois $C_u > 15$ e $C_c > 3$.

O agregado siderúrgico apresentou uma granulometria predominantemente arenosa, com 63,9% de areia (4,8mm-0,075mm), com 32,6% de pedregulho (>4,8mm) e 3,5% de silte e argila (<0,075mm), foi classificado como A-1-a, pedra britada pela classificação TRB-AASHTO. Pela classificação SUCS este foi identificado como SP (areias mal graduadas ou pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino). Já pela classificação TRB-AASHTO (AASHTO, 1973), o agregado foi classificado como A-1-a que considera materiais com predominância de pedra britada, pedregulho e areia. A Figura 18 representa a curva granulométrica do solo e do agregado siderúrgico.

Figura 18 – Curva granulométrica do solo natural.



Fonte: A autora (2023).

De acordo com Lambe e Whitman (1969), a uniformidade de um solo pode ser expressa pelo coeficiente de uniformidade, que é definido pela razão entre os diâmetros correspondentes a 60% (D_{60}) e 10% (D_{10}) que é o valor correspondente a 10% mais fino. Um solo com um coeficiente de uniformidade menor que 2 é considerado uniforme (Lambe & Whitman, 1969). Caputo (2017) afirma que quanto menor seu valor mais uniforme é o solo e para C_u menores que 5 classifica-se o material como muito uniforme, para C_u maiores que 15 são considerados desuniformes e entre 5 e 15 o solo é considerado de uniformidade média. Já o coeficiente de curvatura (C_c) é dado pela relação do D_{30} (diâmetro a 30% passante) ao quadrado pela multiplicação do D_{60} por D_{10} , e que define o material como bem graduado se seu valor for entre 1 e 3 (Caputo, 1988). Dessa forma, é possível afirmar que o solo em estudo se trata de um material desuniforme e mal graduado.

A partir da análise da curva granulométrica do agregado (Figura 18) é possível observar a baixa porcentagem da fração fina (<0,075mm). Pequenas porcentagens de finos foram encontradas por Raposo (2005) em escória de aciaria LD pura e não tratada e classificada como areia bem graduada (SW) pelo sistema SUCS e como A-1-a no sistema TRB-AASHTO (AASHTO, 1973). Bicalho *et al.* (2006), ao analisar cinco amostras de escórias de aciaria LD e EAF, oriundas de 4 estados brasileiros, identificaram que todas apresentaram porcentagens de finos (<0,075mm) menores que 10%.

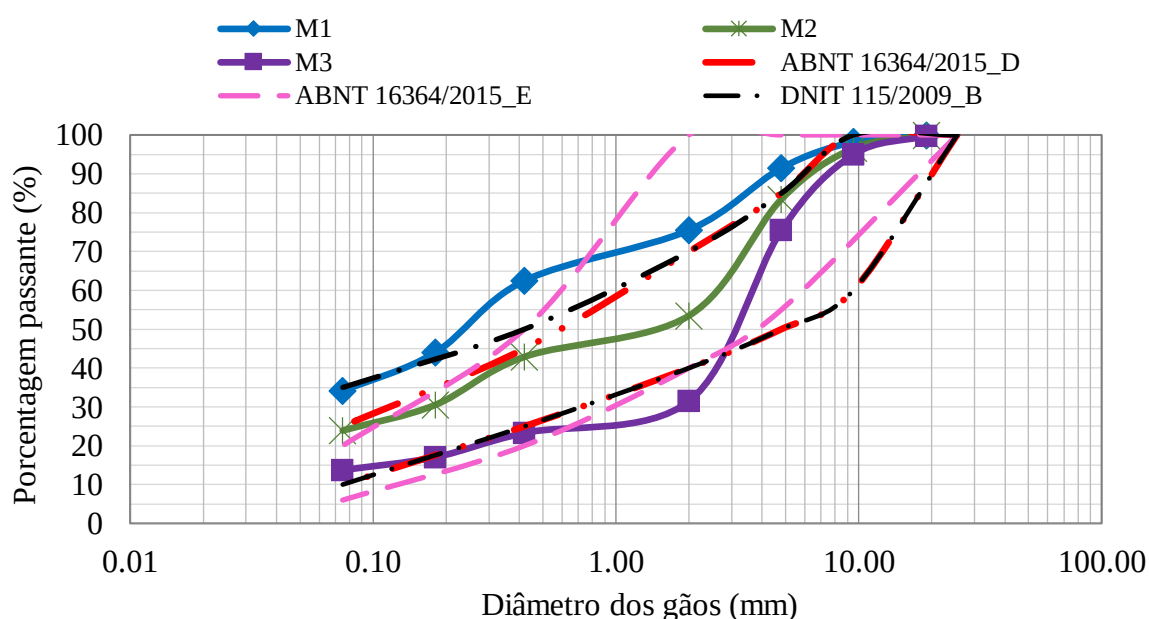
O coeficiente de uniformidade (C_u) encontrado foi de 2,20 e o coeficiente de curvatura (C_c) foi de 1,02. Como já mencionado, de acordo com Lambe e Whitman (1969), o $C_u < 2$

classifica o solo como uniforme. Dessa maneira, pode-se inferir que o agregado siderúrgico deste estudo possui graduação uniforme, logo mal graduado.

Para a verificação do enquadramento das misturas nas normas brasileiras para misturas de escória de aciaria e solo, foram plotadas oito faixas granulométricas das normas DNIT 115 (DNIT, 2009b) / DNIT 114 (DNIT, 2009a), ABNT 16.364 (2015) que tratam das diretrizes para emprego de agregado siderúrgico em pavimentação como agente estabilizante. Selecionou-se três dessas faixas onde pelo menos uma das misturas se encaixasse.

Nessa verificação, a mistura M2 (SN50+AS50) se encaixou nas três faixas, com necessidade de mínimo ajuste na peneira n° 200 (0,075mm) para enquadramento total na faixa E da ABNT 16.364 (2015). Já a amostra M3 (SN25+AS75), para estar dentro dos limites das três faixas, necessitaria de ajuste na peneira n°10 (2,00mm). E a mistura M1 (SN75+AS25) não se enquadrou em nenhuma das faixas analisadas. Na Figura 19 são apresentadas as faixas selecionadas para plotagem.

Figura 19 – Curvas granulométricas das misturas.



Fonte: A autora (2023).

Dayrell e Fernandes (2014) obtiveram valores semelhantes, com C_u de 1,94 e C_c de 1,09 para escória de aciaria LD. Bicalho *et al.* (2006), para seis amostras de escórias de aciaria LD e EAF, encontraram valores ainda mais elevados para ambos os coeficientes, C_u variando de 30,00 a 76,47 e C_c de 0,48 a 16,29, mostrando que tais coeficientes podem variar consideravelmente. Vale ressaltar que o C_u e o C_c , por dependerem da granulometria do

material, estes podem alterar de acordo com o processo de britagem que as escórias possam ser submetidas.

Além das classificações tradicionais granulométrica TRB-AASHTO (AASHTO, 1973) e SUCS criadas para classificar solos de regiões temperadas, criou-se a metodologia MCT de classificação (miniatura compactado tropical) de modo a sanar incompatibilidades entre as regiões. Essa classificação de solos foi desenvolvida para solos tropicais brasileiros, baseado em características mecânicas e hídricas a partir de ensaios de compactação com redução das dimensões (Villibor *et al.*, 2007). Com o objetivo de verificar o comportamento laterítico do solo, foram realizados os ensaios para classificação MCT do solo.

Os ensaios de mini-MCV e de Perda de Massa por Imersão são os principais ensaios que compõem a Classificação MCT (Nogami & Villibor, 1981). O ensaio de mini-MCV forneceu o coeficiente de deformabilidade c' , além do coeficiente d' , já o ensaio de Perda de Massa por Imersão forneceu o coeficiente de perda por imersão (P_i). A partir disso, o coeficiente e' foi enfim calculado. Os dados encontrados são mostrados na Tabela 14.

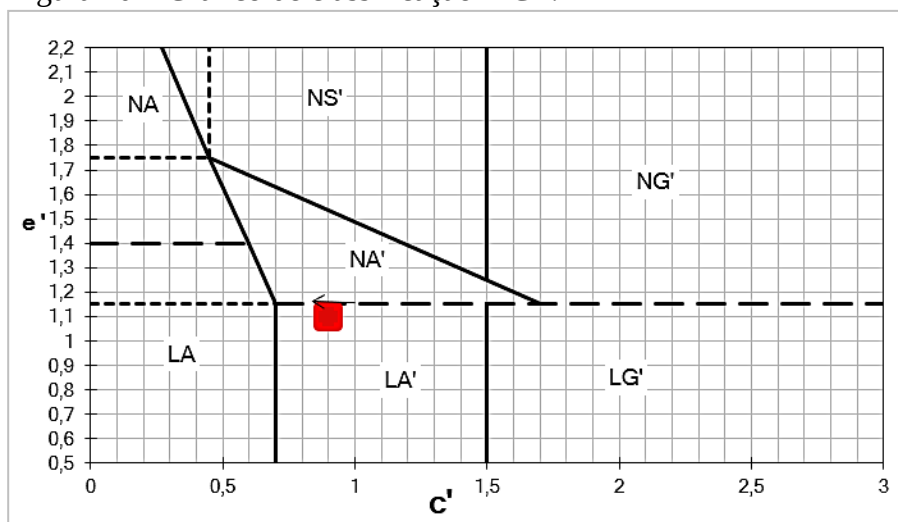
Tabela 14 – Dados Classificação-MCV.

Parâmetro	Solo
P_i (%)	105
d'	74,42
c'	0,9
e'	1,1
Classificação MCT	LA' (arenoso laterítico)

Fonte: A autora (2023).

Villibor *et al.* (2007) afirmam que o valor do coeficiente c' acima de 1,5 caracterizam solos argilosos, se for abaixo de 1,00 caracterizam as areias e os siltes não plástico. Mas se c' ficar no intervalo de 1,0 e 1,5 podem ser enquadrados solo como argilas arenosas, argilas siltosas, areias siltosas e areias argilosas. Já o coeficiente e' está relacionado ao comportamento laterítico do solo (Nogami & Villibor, 1995). Dessa forma, justifica-se a classificação do solo deste estudo como arenoso com comportamento laterítico (LA'). Na Figura 20 é apresentada a classificação MCT para o solo.

Figura 20 – Gráfico de classificação MCT.



Fonte: A autora (2023).

Os solos que pertencem ao grupo LA' apresentam valores de c' que vão de 0,7 a 1,5 e coeficiente e' na faixa de 0,6 a 1,15, devendo considerar melhores, aqueles que apresentem valores próximos a 0,6. Os materiais pertencentes à essa faixa apresentam facilidade para compactação, coesão apropriada e experiências de campo, em execução de bases, mostram que as melhores jazidas estão incluídas nesse grupo de solo (Villibor & Nogami, 2009).

De acordo com DNIT (2006), espera-se de um solo LA' um comportamento resiliente de grau de resiliência médio abaixo. Entretanto, esse mesmo manual menciona que estudos anteriores encontraram dificuldades em associar as classificações TRB (AASHTO, 1973), SUCS e MCT (Nogami & Villibor, 1981). A Tabela 15 mostra uma comparação entre as classificações de solos.

Tabela 15 – Comparativo entre os sistemas de classificação de solos.

Sistema de classificação	Classificação	Qualidade para pavimentação
SUCS	SC	Ruim
TRB-AASHTO	A-4	Fraco a pobre
MCT	LA'	Excelente

Fonte: A autora (2023).

Entretanto, ao enquadrar o presente solo nas classificações tradicionais (SUCS e TRB) e levando em consideração o alto percentual de finos, este se tornaria inadequado para o emprego em camadas superiores de pavimentos. Isso mostra a importância da metodologia de classificação MCT para prever o comportamento de solos lateríticos para pavimentação.

Todavia, de acordo com Barroso (2002), a classificação MCT deve ser aplicada com adaptações para os materiais encontrados na região metropolitana de Fortaleza. A autora, ao

analisar 60 amostras de solos da RMF, concluiu que a maioria dos solos ensaiados se encontram na zona intermediária entre comportamento laterítico e não laterítico.

Foi realizado o ensaio de densidade real dos grãos do solo, cujo valor obtido foi de 2,574. Entretanto, o valor é inesperado para esse grupo de solos, dado que são caracterizados pela presença de ferro (Fe) e alumínio (Al) (Nogami & Villibor, 1995). É também abaixo das médias de densidade real encontradas, comumente, na literatura para solos não lateríticos constituídos principalmente por feldspato e quartzo, conferindo um valor em torno de 2,65 e 2,70 (Pires *et al.*, 2019; Vasconcelos *et al.*, 2019; Dyer *et al.*, 2021).

O agregado siderúrgico apresentou densidade real dos grãos de 3,651, obtido entre duas determinações sem diferir 0,02 entre si. A elevada densidade pode ser atribuída à composição química e mineralógica do agregado, dado que este apresenta relevante concentração de ferro. O valor é corroborado por outros autores, como Rohde (2002) que obteve variação de densidade real de 3,390 e 3,520 para EAF; Likoydis e Liapis (2011) obteve valor de 3,549 para escória de aciaria elétrica e Barbosa (2013) que obteve valores na faixa de 3,06 a 3,73 para quadro amostras de escórias de aciaria de diferentes estados brasileiros. Pagio *et al.* (2022), em pesquisas realizadas com quatro resíduos siderúrgicos, obtiveram valores de densidade real dos grãos menores que 3,00, sendo encontrado valor de 2,84 para escória granulada de alto-forno, 2,98 para escória de alto-forno resfriada ao ar, 4,66 para pó do despoeiramento do forno elétrico a arco e 2,85 para Terra de Shredder (material oriundo da reciclagem de sucata em equipamento Shredder com aspecto de solo). A cinza de carvão mineral oriunda de termelétrica, objeto de estudos de Vasconcelos *et al.* (2019), apresentou densidade real de 2,44, mesmo com elevada concentração de ferro em sua composição química.

Rohde (2002) defende que a densidade elevada das escórias pode ser um ponto negativo, em comparação aos agregados convencionais, pois pesam mais para um mesmo volume. Todavia, a autora ressalta que para a estabilização por gravidade tal comportamento pode ser visto como vantagem.

A NBR 16.364 (ABNT, 2015) traz diretrizes de execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária determina que, as misturas de solo e agregado siderúrgico, devem apresentar as seguintes exigências quando o solo for laterítico: $LL \leq 40\%$ e índice de plasticidade $\leq 15\%$. Esses limites de $LL (\leq 40\%)$ e $IP (\leq 15\%)$ também são igualmente definidos em DNIT 406 (DNIT, 2017a) que normatiza o uso de Açobrita® em camadas de base e de misturas desse agregado (Açobrita®) com solo laterítico. Dessa forma e baseado nesses parâmetros, o solo laterítico

estudado mostra-se adequado para aplicação em misturas com agregado siderúrgico para pavimentação.

Embora a fração areia (4,8mm-0,075mm) do solo tenha sido superior aos 50%, o valor obtido no ensaio de equivalente de areia (EA) do solo foi de 6%. Carneiro *et al.* (2001) também encontraram valor de EA de 14% para um solo laterítico LA (areia laterítica) com 80% de fração areia.

Segundo DNIT (2006), que trata das diretrizes de execução de bases estabilizadas granulometricamente, e a NBR 11.804 (ABNT, 1991), que estabelece os parâmetros necessários para uso de materiais em base e sub-base de pavimentos, o valor de EA deve ser de no mínimo 30%. A porcentagem de areia obtida no ensaio de equivalente de areia do agregado foi resultado de três determinações. Entretanto, a não formação de suspensão argilosa, impossibilitou a leitura do topo da suspensão, pois esta se depositou sobre a parte arenosa (Figura 21).

Figura 21 – Ensaio de equivalente de areia.



Fonte: A autora (2023).

Dessa forma, optou-se por realizar as leituras antes e após a introdução do pistão. Assim, o valor médio encontrado foi de 98,6%, atendendo as especificações de DNIT 141 (DNIT, 2010), que estabelece porcentagem mínima de 30% para emprego de escória em pavimentação. Isso é fortalecido devido a granulometria predominantemente arenosa do agregado e a baixa presença de finos (<0,075mm).

Resultados semelhantes foram obtidos por Likoydis e Liapis (2011) para escória de aciaria elétrica da Grécia e por Ferreira (2010), que encontrou valores de EA de 100% para escória de aciaria portuguesa. Ao comparar o agregado siderúrgico com agregados naturais, observa-se que são encontrados valores semelhantes de EA, como obtido por Lima e Motta (2015) para brita graduada (>55%) e por Coelho *et al.* (2019) para areia de rio (98,3%). A Tabela 16 resume os dados geotécnicos do solo e da escória de aciaria BSSF.

Tabela 16 – Dados geotécnicos do solo e do agregado.

Parâmetro	SN	AS
Densidade Real	2,574	3,651
Limite de Liquidez (%)	24	NL
Limite de Plasticidade (IP) (%)	15	NP
Índice de Plasticidade (%)	9	-
Equivalente de Areia (%)	6	98,6
Classificação SUCS	SC	SP
Classificação AASHTO	A-4	A-1-a
Classificação MCT	LA'	-

Fonte: A autora (2023).

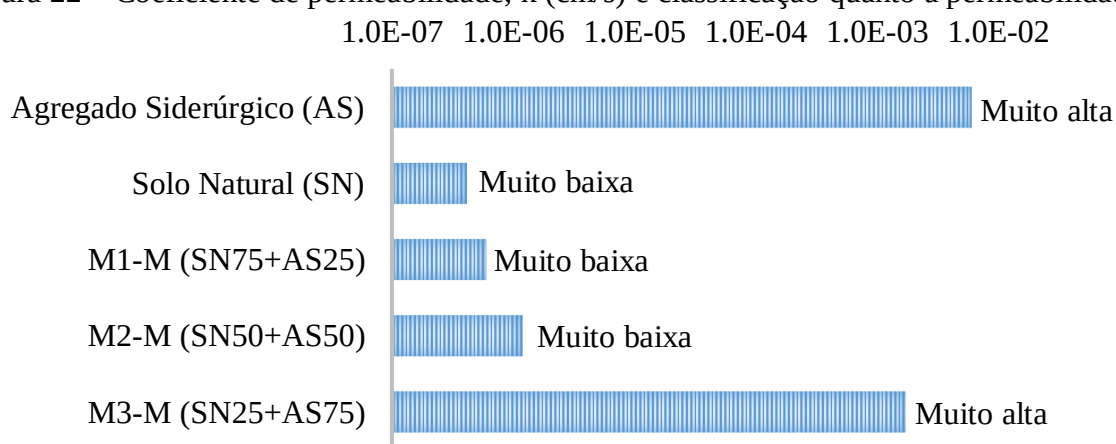
A permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento de água através dos seus vazios sob a ação de um gradiente hidráulico, é expressa numericamente pelo coeficiente de permeabilidade (k), definido como sendo a velocidade de escoamento de água que passa pelos vazios do solo quando o gradiente hidráulico é unitário. Sendo os materiais pedregulhosos e arenosos razoavelmente permeáveis, os argilosos pouco permeáveis e os granulares de graduação aberta mais permeáveis do que os de graduação densa (DNIT, 2006).

O ensaio de permeabilidade foi executado com objetivo de coletar o material percolado pelos corpos de prova do solo, agregado e misturas, com intuito de determinar os componentes lixiviados e solubilizados, simulando camadas de pavimento quando compactados. Este estudo ainda está em desenvolvimento no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do IFCE.

Entretanto, aproveitando a oportunidade, prosseguiu-se com a obtenção dos valores de k dos materiais, onde foram submetidos aos ensaios de determinação do coeficiente de permeabilidade à carga constante (agregado siderúrgico) (NBR 13.292/21) e à carga variável (misturas e solo natural) (NBR 14.545/21). É importante ressaltar que as misturas e o solo foram compactados neste ensaio na energia modificada. O agregado não passou por processo de compactação mecânica, foi apenas acomodado no permeâmetro. Os valores do coeficiente

de permeabilidade das misturas M1 e M2 foram mais próximas do valor obtido para o solo natural, já a mistura M3, que apresenta maior proporção do agregado siderúrgico dentre as misturas (75%), apresentou comportamento semelhante ao agregado siderúrgico com valor na mesma ordem de grandeza. Isso mostra que as características hidráulicas das misturas se assemelham às características dos materiais que as formam de forma predominante. Dessa forma, é possível observar uma tendência de aumento do coeficiente de permeabilidade com o aumento da porcentagem de agregado nas misturas. A Figura 22 apresenta os valores de k para cada material analisado.

Figura 22 – Coeficiente de permeabilidade, k (cm/s) e classificação quanto a permeabilidade.



Fonte: A autora (2023).

Segundo a classificação proposta por Mello e Teixeira (1967), frente aos valores de k , é possível afirmar que o agregado siderúrgico e a mistura M3 (maior porcentagem de agregado siderúrgico) se enquadram como areias/areias finas siltosas e argilosas, sendo o agregado mais permeável que a mistura (Figura 23). Tal valor é reforçado pela granulometria do agregado siderúrgico classificado como areias mal graduadas ou pedregulhosas, SP (SUCS). Já o solo, as misturas M1 (maior teor de solo) e M2 (SN50+AS50) apresentaram coeficiente de permeabilidade na ordem de 10^{-7} cm/s configurando materiais com comportamento de areias finas siltosa e argilosas, siltes argilosos e argilas. Por se tratar de um material composto predominantemente pela fração pedregulho (maior que 60%), é possível afirmar que o incremento de agregado ao solo forneceu maior permeabilidade para as misturas. Tal comportamento já era esperado, devido ao aumento de vazios nos corpos de prova eventualmente favorecidos pela presença do material granular. A Tabela 17 traz a classificação dos materiais quanto a permeabilidade tomando por base a classificação apresentada por Haan *et al.* (1994).

Figura 23 – Classificação de solos quanto ao coeficiente de permeabilidade.

K (cm/s)	10 ²	1	10 ⁻²	10 ⁻⁴	10 ⁻⁶	10 ⁻⁸
SOLO	pedregulhos		areias	areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos		argilas

Fonte: Mello e Teixeira (1967).

Tabela 17 – Classificação dos materiais quanto a permeabilidade.

Material	k (cm/s)	Permeabilidade (Haan <i>et al.</i> , 1994)
SA	$6,02 \times 10^{-3}$	Muito alta
NS	$4,15 \times 10^{-7}$	Muito baixa
M1 (NS75+SA25)	$5,98 \times 10^{-7}$	Muito baixa
M2 (NS50+SA50)	$1,20 \times 10^{-6}$	Muito baixa
M3 (NS25+SA75)	$1,72 \times 10^{-3}$	Muito alta

Fonte: A autora (2023).

Silva *et al.* (2019) observaram o mesmo comportamento ao analisar misturas de resíduo de construção e demolição (RCD) e solo areno-argiloso, onde o incremento de resíduo na mistura era diretamente proporcional ao aumento da permeabilidade, sendo o coeficiente de permeabilidade do solo na ordem de 10^{-9} m/s (aproximadamente 10^{-6} cm/s) e do RCD na ordem de 10^{-7} m/s (aproximadamente 10^{-5} cm/s), e as misturas dentro deste intervalo em corpos de prova moldados na energia intermediária e carga variável.

Raposo (2005) encontrou valores menores de coeficiente de permeabilidade para escória de aciaria LD tratada (cura por molhagem) e não tratada. Verificou que a escória compactada na energia normal apresentou valores maiores em relação à moldada na energia modificada, sendo de, respectivamente, 10^{-5} m/s (aproximadamente 10^{-3} cm/s) e 10^{-6} m/s (aproximadamente 10^{-4} cm/s) para a escória não tratada e na ordem de 10^{-6} m/s e 10^{-7} m/s (aproximadamente 10^{-5} cm/s) para a escória tratada.

4.2. Análise da Caracterização Mecânica do Solo, Agregado Siderúrgico e Misturas

4.2.1. Ensaio de Abrasão Los Angeles

O ensaio de resistência ao desgaste, abrasão *Los Angeles*, foi realizado apenas para o agregado siderúrgico, e após três determinações a perda de massa foi de 19%. O resultado é próximo ao encontrado por Canal *et al.* (2020), que foi de 21% para escórias de aciaria elétrica e LD e por Pires *et al.* (2019) que obtiveram valor de resistência a abrasão de 24% para escória

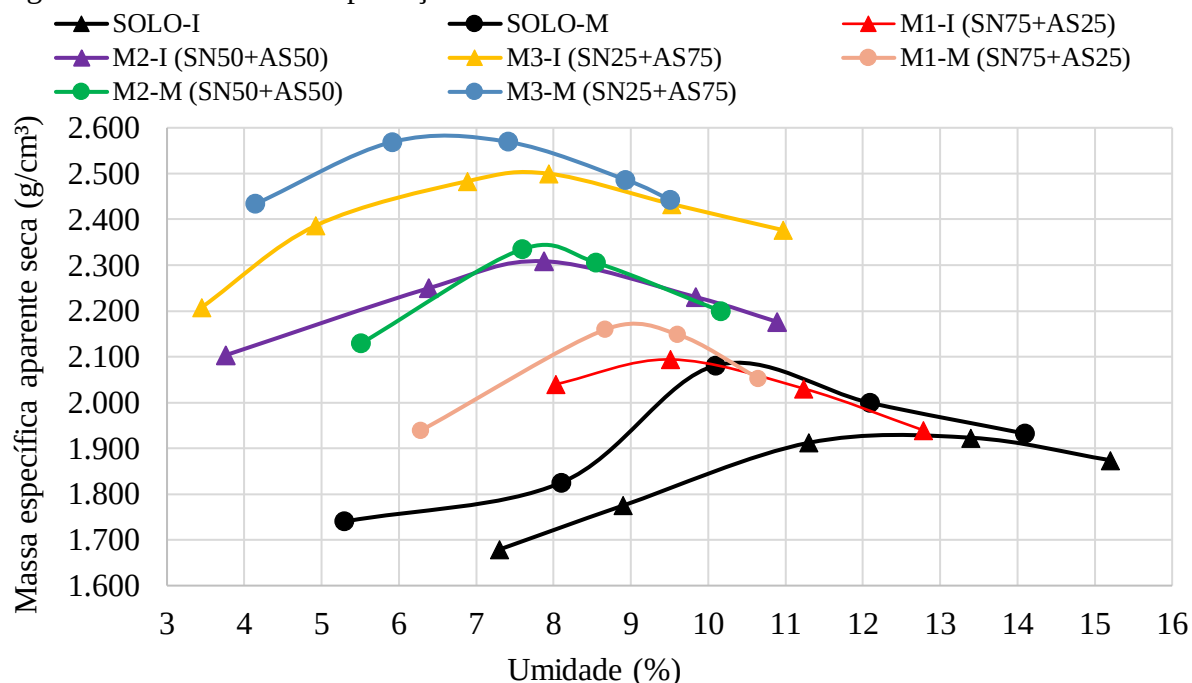
siderúrgica. A escória de aciaria elétrica avaliada por Rohde *et al.* (2003) apresentou valor mais alto de perda de massa, de 38%.

Em DNIT 407/2017 (DNIT, 2017a) e DNIT 406 (DNIT, 2017a) que determina parâmetros para uso de Açobrita® em camadas de sub-base e base rodoviária, respectivamente, o desgaste a abrasão não deve ultrapassar o valor de 55%. O mesmo valor também é determinado em NBR 16.364 (ABNT, 2015), quanto a execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com escória de aciaria. Em DNIT 115 (DNIT, 2009b) e DNIT 114 (DNIT, 2009a), sobre uso de escória Acerita® em base e sub-base, respectivamente, é exigido que esta apresente desgaste inferior a 40%. Baseado nisso, é possível afirmar que a escória de aciaria BSSF atende as diversas normas regulamentadoras para esse tipo de material quando a resistência a abrasão.

4.2.2. Ensaio de Compactação

Para o ensaio de compactação foram utilizadas duas energias de compactação, a intermediária e a modificada para todos os materiais. Dessa forma, foi possível obter as curvas de compactação para cada energia presentes na Figura 24. Ao analisar as curvas é possível observar que as umidades ótimas foram maiores na energia intermediária. Devido os valores de massa específica aparente seca máxima ($MEAS_{máx}$) serem inversamente proporcionais aos valores de umidade ótima, estes foram maiores para as amostras compactadas na maior energia, a modificada.

Figura 24 – Curvas de compactação das misturas estudadas.



Fonte: A autora (2023).

O solo compactado na energia modificada apresentou aumento da $MEAS_{máx}$, sendo esta de 2,081 g/cm³ na energia modificada e de 1,923 g/cm³ na energia intermediária, mostrando que a energia de compactação gera influência no entrosamento das partículas do solo. Os dados apresentados na Tabela 18 mostram que as misturas M2-I (SN50+AS50) e M3-I (SN25+AS75) tiveram umidades ótimas de 7,9% e 7,9%, e $MEAS_{máx}$ de 2,309 g/cm³ e 2,500 g/cm³, respectivamente. A mistura M1-I (SN75+AS25) apresentou umidade ótima de 9,5% e massa específica aparente seca de 2,094 g/cm³, valor mais baixo entre as três misturas citadas. Já as misturas M1-M (SN75+AS25), M2-M (SN50+AS50) e M3-M (SN25+AS75) apresentaram $MEAS_{máx}$ de 2,160 g/cm³, 2,335 g/cm³ e 2,569 g/cm³, respectivamente.

Tabela 18 – Dados de umidade ótima ($Hót$) e de massa específica aparente seca máxima ($MEAS_{máx}$) dos materiais

Amostra	$Hót$ (%)	$MEAS_{máx}$ (g/cm³)
Solo Natural-I	13,40	1,923
Solo Natural-M	10,10	2,081
M1-I (SN75+AS25)	9,51	2,094
M2-I (SN50+AS50)	7,87	2,309
M3-I (SN25+AS75)	7,94	2,500
M1-M (SN75+AS25)	8,67	2,160
M2-M (SN50+AS50)	7,60	2,335
M3-M (SN25+AS75)	7,41	2,569

Fonte: A autora (2023).

Os ensaios de compactação das misturas de solo-agregado siderúrgico e do solo natural foram realizados seguindo o procedimento descrito em DNER-ME 162 (DNER, 1994) com reuso de material. Como já mencionado, não foi possível a realização do ensaio de compactação para o agregado siderúrgico puro devido à ausência de coesão. Parente *et al.* (2003) também relatam dificuldade para realizar o ensaio de compactação da escória sem mistura, justificada pela ausência de coesão. Entretanto, assim como Rohde *et al.* (2003), optaram pela correção granulométrica, permitindo realização do procedimento.

A mistura M3-M (SN25+AS75), constituída de maior porcentagem de agregado siderúrgico na energia modificada, foi a que exibiu maior $MEAS_{máx}$ e menor umidade ótima. O agregado siderúrgico exigir menor quantidade de água e aliada ao uso de uma maior energia de compactação contribuíram para esse resultado. Em campo, esse fato revela-se vantajoso devido à menor necessidade de água na execução de camadas granulares e $MEAS_{máx}$ maiores. Em contrapartida, o solo natural na energia intermediária apresentou a maior umidade ótima e a menor massa específica aparente seca máxima entre os materiais.

Quanto às curvas de compactação das misturas, do solo e do agregado é possível descrever através das configurações das curvas, que se comportam como materiais arenosos. Tal comportamento já era esperado, dado que todos os materiais empregados foram classificados como predominantemente arenosos.

Boldrini e Pacheco (2022) também observaram tal comportamento ao analisarem escória de aciaria LD em diversos teores e na energia de compactação normal. Bastos (2013), objetivando estabilização granulométrica, misturou rejeito de minério de ferro e escória de aciaria LD nas porcentagens de 70%, 50%, 30% e 0% de escória e concluiu que o incremento do agregado siderúrgico provocou aumento da $MEAS_{máx}$ e diminuição da umidade ótima das misturas, na energia intermediária. Costa e Santos (2020) ao estudarem misturas de escória de aciaria elétrica e solo classificado como areia com finos (A-4) obtiveram umidades ótimas decrescentes quando o teor de escória aumentava.

Além das misturas analisadas, tentou-se realizar o ensaio de compactação para a amostra composta de 100% de agregado siderúrgico. Todavia, como já mencionado, não foi possível a execução do ensaio de compactação para o agregado puro. Devido à falta de finos os corpos de prova se tornaram friáveis e drenagem de água logo no primeiro ponto do ensaio (Figura 25).

Figura 25 – Tentativa de ensaio de compactação do agregado (a) e detalhe da presença de drenagem ao compactar (b).



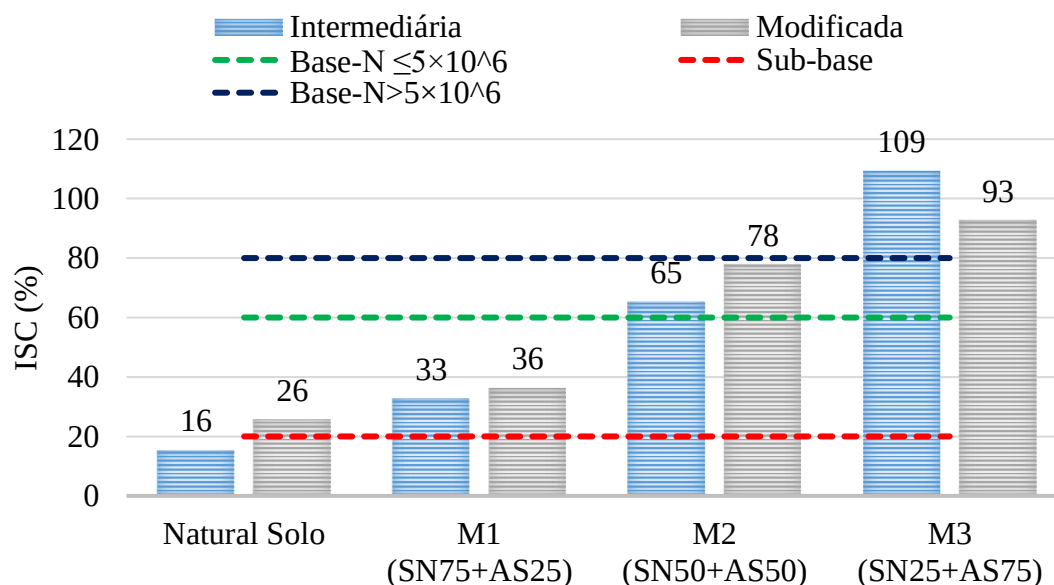
Fonte: A autora (2023).

Dessa forma, não foi possível a obtenção dos valores de umidade ótima e massa específica seca máxima da amostra de agregado siderúrgico, impossibilitando a realização de ensaios de ISC, MR e DP para ele. Tal dificuldade é relatada em Raposo (2005) em seus estudos com escória de aciaria LD e em Rohde *et al.* (2003) com escória de aciaria elétrica. A hipótese levantada é a ausência de finos suficientes que favoreçam a coesão e moldagem dos corpos de prova sendo necessário correção granulométrica.

4.2.3. Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão (E)

Os dados obtidos nos ensaios de determinação do ISC e expansão para as amostras trabalhadas estão dispostos no gráfico da Figura 26, em que se identifica que existe uma tendência de crescimento da capacidade de suporte diretamente proporcional ao acréscimo de agregado ao solo. O solo natural, na energia intermediária, apresentou valor de ISC de 15,5%, enquanto a mistura M3 (SN25+AS75) com substituição de 75% de solo por agregado siderúrgico apresentou ISC de 109%. A Figura 26 também apresenta os valores mínimos de ISC para emprego de agregado siderúrgico e misturas de solo e agregado em camadas granulares de base e sub-base rodoviária presentes na NBR 16.364 (ABNT, 2015).

Figura 26 – Dados de ISC dos materiais compactados nas duas energias.



Fonte: A autora (2023).

Comportamento de ganho de resistência com adição de agregado siderúrgico é apontado em Parente *et al.* (2003), que avaliaram mistura de escória de aciaria LD e solo igualmente classificado ao desta dissertação, como areia argilosa (SC). Onde o solo apresentou ISC de 17%, na energia intermediária, e as misturas de solo+escória50% e solo+escória70% apresentaram valores de 50% e 70% de ISC, além de apresentar expansão nula.

Rodrigues *et al.* (2022) observaram representativo ganho de resistência mecânica, ao misturarem solo SC (areia argilosa) e apenas 10% de escória de aciaria elétrica, partindo de 6% de ISC (solo natural) para ISC de 30% (mistura) na energia normal, também com redução da expansão. Boldrini e Pacheco (2022) obtiveram valores ainda mais expressivos de ISC para misturas de solo e escória LD com valores na ordem de 200% (mistura escória 50%+solo argiloso 50%). Rohde *et al.* (2003) obtiveram valores de ISC de para escória bruta (sem beneficiamento) em torno de 100%, todavia quando a granulometria foi corrigida o ISC da escória atingiu os 200%.

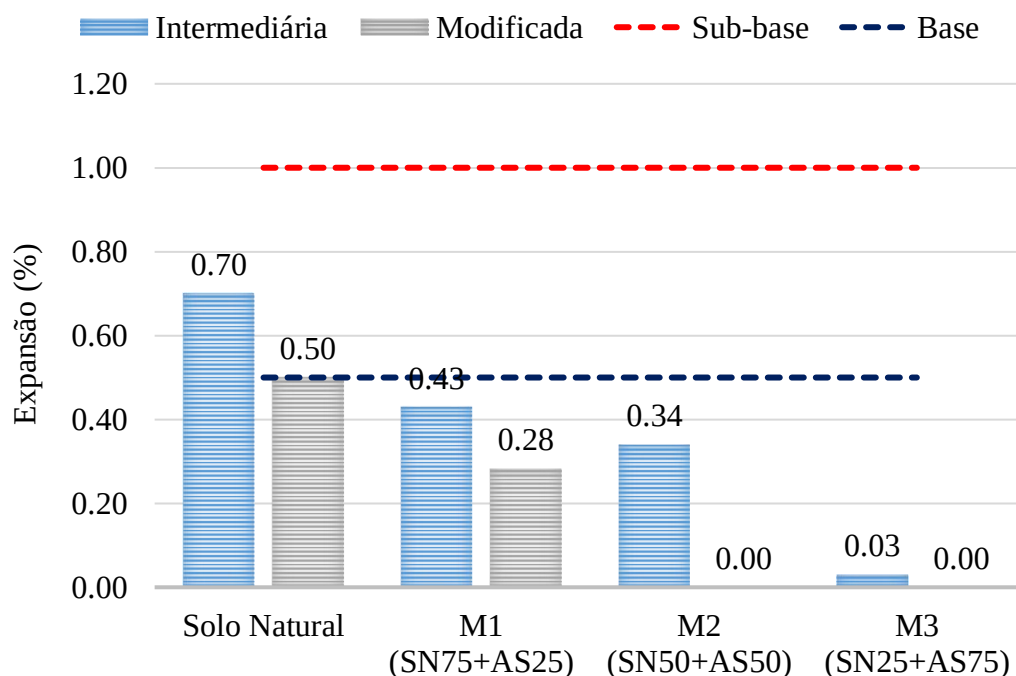
Entretanto, Costa e Santos (2020), ao analisar misturas de solo A-4 (areia com finos) e escória de aciaria elétrica em teores de 15% e 30%, não obtiveram ganhos significativos de resistência. A mistura com 15% de agregado siderúrgico apresentou e ISC de 21,3% e a mistura com 30%, ISC de apenas 22,4%, *versus* 18,8% do solo natural. Mas a expansão mostrou valores com tendência ao zero para as amostras com escória.

Quanto ao decréscimo do ISC da mistura M3 (SN25+AS75), na energia modificada, pode ser justificado pelo fato da amostra sofrer maior impacto nessa energia, podendo levar à

quebra dos grãos do agregado, já que nesta mistura está em maior porcentagem, interferindo assim na resistência. Além disso, esse resultado sugere um teor “ótimo” de agregado siderúrgico na estabilização de solos.

Quanto à expansão das amostras, estas mostraram tendência de redução com o acréscimo de agregado, atingindo valor nulo na mistura M2 (SN50+AS50) e na mistura M3 (SN25+AS75) na energia modificada. Como já citado, este fato é algo observado de forma recorrente em outros trabalhos com escória de aciaria, como em Costa e Santos (2020), Parente *et al.* (2003), Rodrigues *et al.* (2022), entre outros. A Figura 27 traz os dados de expansão obtidos, bem como os limites exigidos na NBR 16.364 (ABNT, 2015) para base e sub-base.

Figura 27 – Dados de Expansão dos materiais.



Fonte: A autora (2023).

Quanto às exigências normativas, DNIT 141 (DNIT, 2022) traz os critérios para execução de bases rodoviárias estabilizadas granulometricamente, e estabelece os valores de ISC e de expansão admissíveis, sendo estes: $ISC \geq 60\%$ para número $N \leq 5 \times 10^6$ e $ISC \geq 80\%$ para número $N > 5 \times 10^6$, e expansão máxima de 0,5%. DNIT 139 (DNIT, 2010) descreve as exigências para camadas de sub-base rodoviária estabilizadas granulometricamente, em que os valores de ISC devem ser $\geq 20\%$ e valores de expansão $\leq 1\%$. Já DNIT 115 (DNIT, 2009b) apresenta as diretrizes quanto à aplicação de escória de aciaria LD - Acerita® em camadas de base rodoviária, onde o valor de ISC exigido é de igual ou superior a 80%, na energia intermediária. A expansão não é especificada. Para as misturas de Acerita® e solo laterítico o

valor de ISC deve ser maior que 60% e expansão permitida menor que 0,5%. Em DNIT 114 (DNIT, 2009a) são descritos os parâmetros necessários para aplicação de Acerita® em sub-base de pavimento e o ISC determinado deve ser maior ou igual a 60%, na energia intermediária. Quanto às misturas com solo laterítico e Acerita® estas devem atender à um ISC superior a 20% e expansão menor que 1% para camada de sub-base. Além disso, DNIT 115 (DNIT, 2009b) e DNIT 114 (DNIT, 2009a) especificam que o solo para as misturas seja de comportamento laterítico e classificado com LA, LA' ou LG' pela classificação MCT.

Outro agregado siderúrgico especificado em norma e aplicado em obras de pavimentação é o Açobrita®. Para esse agregado, DNIT 406 (DNIT, 2017a) requisita que o valor de ISC seja igual ou superior a 80% na energia modificada para uso em bases de pavimentos. E as misturas formadas de Açobrita® e solo devem apresentar ISC de no mínimo 60% para um número $N \leq 5 \times 10^6$ e expansão $\leq 0,5\%$ e ISC superior a 80% para um número $N > 5 \times 10^6$ e expansão inferior ou igual 0,5%, na energia modificada. Já DNIT 407 (DNIT, 2017b), que trata de sub-bases de Açobrita® e misturas com esse tipo de agregado, exige valor de ISC maior ou igual a 20% (intermediária) para o agregado e para as misturas de solo e Açobrita®, além de expansão menor ou igual a 1% na mesma energia.

Para aplicação de bases e sub-base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico, a NBR 16.364 (ABNT, 2015) determina que o agregado apresente ISC igual ou superior a 80% na energia de compactação modificada para aplicação em camada de base. Já em misturas com solo para composição de base rodoviária, estas devem apresentar $ISC \geq 60\%$ e expansão $\leq 0,5\%$, para $N \leq 5 \times 10^6$ e $ISC \geq 80\%$ e expansão $\leq 0,5\%$ para $N > 5 \times 10^6$ e sub-base o ISC e a expansão devem ser de $\geq 20\%$ e $\leq 1\%$, respectivamente.

Baseado nas normativas supracitadas e nos resultados obtidos nos ensaios de expansão e de ISC, é possível afirmar que a mistura M2 (SN50+AS50), na energia intermediária e modificada pode ser aplicada em bases rodoviária onde o número N exigido seja menor ou igual a 5×10^6 . A mistura M3 (SN25+AS75), em ambas as energias, pode ser aplicada em bases onde o número N seja maior que 5×10^6 . A mistura 01 (modificada e intermediária) não atendem aos requisitos exigidos para esse tipo de camada. Quanto ao emprego em camadas de sub-base de pavimentos, todas as misturas podem ser empregadas considerando as duas energias de compactação trabalhadas. Quanto à aplicação do solo natural, este pode ser aplicado em camadas de sub-base na energia modificada e em reforço de subleito na energia intermediária de acordo com DNIT (2006).

4.2.4. Módulo de Resiliência

Segundo Rocha (2020), na pavimentação os materiais se comportam de maneiras diferentes sob determinada carga, dessa forma as relações tensão por deformação se mostram de diferentes formas. Com isso, esses materiais podem apresentar comportamento elástico linear, elástico não-linear (grupo dos solos coesivos), viscoelástico (grupo dos materiais asfálticos), além dos não-elásticos que podem manifestar deformação permanente.

De modo a verificar o comportamento resiliente do solo natural e das misturas foram realizados ensaios de determinação do módulo de resiliência nas duas energias de compactação, intermediária e modificada.

Como já supracitado, nesta pesquisa foram empregados três tipos de modelos matemáticos para representar os valores de MR. Assim, o coeficiente de determinação (R^2) foi tomado como referência para avaliar o modelo matemático que melhor representou os dados fornecidos pelo *software* do ensaio. A Tabela 18 traz os modelos empregados e os valores encontrados de K_1 , K_2 e K_3 para cada um, bem como os valores dos coeficientes de determinação (R^2) e os módulos de resiliência médios modelados (calculado pela média dos valores de todas as tensões) e medidos (a partir dos dados fornecidos pelo equipamento e realizada a média dos valores).

Ao analisar os dados da Tabela 19, é possível constatar que dentre os modelos utilizados, no geral, o composto apresentou maiores valores de R^2 para ambas as energias. Ou seja, dentro das presentes condições, este foi o que melhor representou os valores calculados nos ensaios de MR dos materiais. Entretanto, nem todos os R^2 apresentaram valores satisfatórios próximos de 1, como é o caso de M2 – M (SN50+AS50), cujo R^2 foi de 0,29.

Quanto aos valores de K_1 , K_2 , K_3 , Klinsky *et al.* (2014), em seus estudos sobre MR, pontuam que são apenas parâmetros de regulação do modelo baseados nos valores de módulo de resiliência obtidos no ensaio triaxial de carga repetida e que não representam propriedade mecânica ou física do solo. Entretanto, quando esses valores forem negativos estes indicam que o MR sofreu influência negativa em relação as tensões (Zargo, 2016). Ou seja, enquanto a tensão desvio e a tensão confinante aumentam, o MR sofre redução. Vale ressaltar que a energia de compactação também exerce influência no valor do MR do solo.

Tabela 19 – Dados dos modelos empregados para MR.

Material	Equação dos Modelos	R ²	MR médio modelado (MPa)	MR médio medido (MPa)
Solo Natural – I	$MR = 198,76 \times \sigma_3^{-0,24}$	0,79	399	396
	$MR = 239,73 \times \sigma_d^{-0,22}$	0,97	400	
	$MR = 220,34 \times \sigma_3^{-0,06} \times \sigma_d^{-0,17}$	0,99	390	
Solo Natural – M	$MR = 323,68 \times \sigma_3^{-0,18}$	0,59	545	543
	$MR = 388,62 \times \sigma_d^{-0,14}$	0,57	537	
	$MR = 322,58 \times \sigma_3^{-0,08} \times \sigma_d^{-0,12}$	0,66	537	
M1 – I (SN75+AS25)	$MR = 574,88 \times \sigma_3^{-0,19}$	0,57	997	607
	$MR = 462,85 \times \sigma_d^{-0,12}$	0,36	610	
	$MR = 709,88 \times \sigma_3^{0,32} \times \sigma_d^{-0,33}$	0,91	607	
M2 – I (SN50+AS50)	$MR = 892,84 \times \sigma_3^{0,14}$	0,19	601	605
	$MR = 576,18 \times \sigma_d^{-0,02}$	0,73	603	
	$MR = 1033,74 \times \sigma_3^{0,44} \times \sigma_d^{-0,31}$	0,76	601	
M3 – I (SN25+AS75)	$MR = 695,33 \times \sigma_3^{0,09}$	0,35	539	539
	$MR = 563,24 \times \sigma_d^{0,02}$	0,25	538	
	$MR = 738,18 \times \sigma_3^{0,2} \times \sigma_d^{-0,12}$	0,65	548	
M1 – M (SN75+AS25)	$MR = 710,87 \times \sigma_3^{0,01}$	0,41	691	687
	$MR = 582,68 \times \sigma_d^{-0,07}$	0,24	684	
	$MR = 825,84 \times \sigma_3^{0,26} \times \sigma_d^{-0,24}$	0,90	680	
M2 – M (SN50+AS50)	$MR = 623,12 \times \sigma_3^{-0,14}$	0,12	933	931
	$MR = 640,56 \times \sigma_d^{-0,17}$	0,27	949	
	$MR = 774,99 \times \sigma_3^{0,11} \times \sigma_d^{-0,24}$	0,29	983	
M3 – M (SN25+AS75)	$MR = 506,36 \times \sigma_3^{-0,20}$	0,58	904	920
	$MR = 577,32 \times \sigma_d^{-0,20}$	0,84	919	
	$MR = 563,36 \times \sigma_3^{-0,02} \times \sigma_d^{-0,19}$	0,84	923	

Fonte: A autora (2023).

Em que: MR - módulo de resiliência (MPa);

σ_d - tensão desvio (MPa);

σ_3 - tensão de confinamento (MPa);

I – intermediária;

M – modificada.

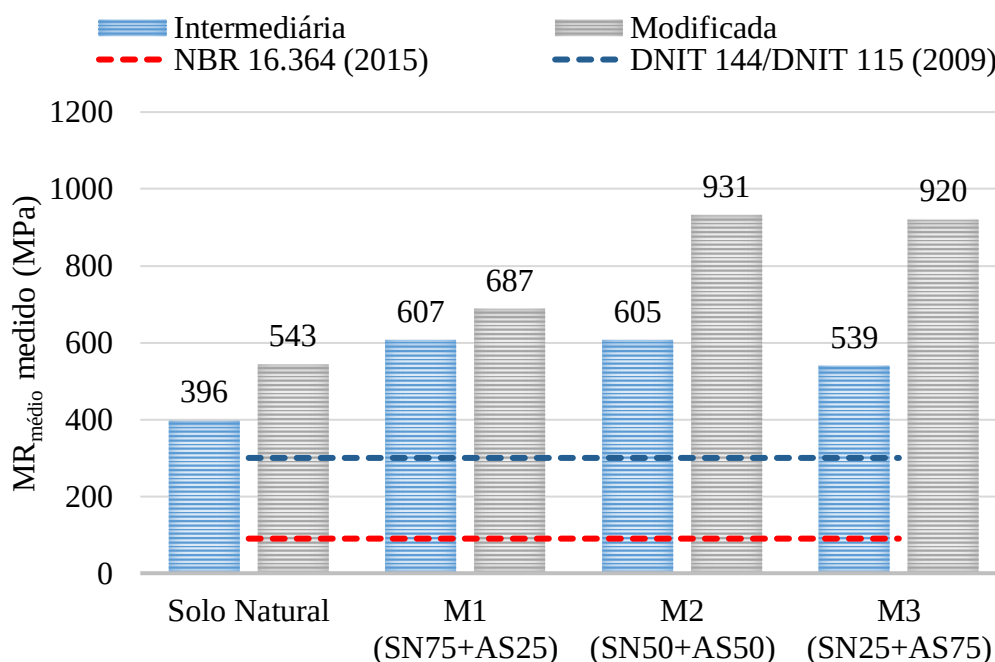
Alguns valores de K_2 e K_3 foram negativos. De acordo com a experiência em laboratório e na literatura, as constantes de regressão K_2 (referente ao σ_3 ou σ_d , dependendo do modelo) e K_3 (referente ao σ_d), tendem a diminuir à medida que o solo apresente granulometria mais fina. Ou seja, os valores negativos do solo natural e da mistura 01 podem ser justificados pela presença predominante da fração fina. Todavia, K_2 e K_3 negativos não são esperados para materiais granulares/arenoso como ocorreu na mistura M2 – M (SN50+AS50) e a mistura M3 – M (SN25+AS75). Conforme DNIT (2006) quanto ao comportamento resiliente de solos granulares, aqueles pertencentes ao Grupo B (solo com grau de resiliência intermediário, ver gráfico manual DNIT) podem ser aplicados em camadas de base, sub-base e reforço do

subleito, desde que as seguintes condições sejam atendidas: o valor de $K_2 \leq 0,50$ define como bom comportamento e $K_2 > 0,50$ o comportamento é dependente da espessura da camada e da qualidade do subleito.

Todos os valores de MR foram maiores na energia modificada quando comparados aos obtidos na energia intermediária. Diferentemente do ISC, onde o melhor resultado foi apresentado pela amostra M3 – I (SN25+AS75), em relação ao MR a mistura M2 – M (SN50+AS50) foi a que se destacou das demais, com valor de MR de 931 MPa. Tal divergência reforça a discussão presente no meio técnico quanto à limitação da metodologia ISC em relação ao MR, embora ambos os parâmetros sejam empregados no método de dimensionamento MeDiNa. Dado que na metodologia ISC, a mistura com menor porcentagem de finos, maior número de vazios (percebido no ensaio de permeabilidade) e com menor taxa de coesão apresentou o melhor resultado, em decorrência do confinamento proporcionado pelo cilindro metálico. Em contrapartida, no ensaio de módulo de resiliência, o material por ser submetido à uma tensão confinante controlada e atuante, semelhante ao que ocorre na prática, apenas com auxílio de uma membrana elástica e não de cilindro metálico, parece ser o que melhor simula o cenário encontrado em campo.

A Figura 28 apresenta os valores médios para os dados obtidos do equipamento triaxial e o valor mínimo de MR exigido na NBR 16.364 (ABNT, 2015), que é de 90 MPa, e DNIT 114 (2009) e DNIT 115 (2009), no mínimo 300 MPa, para escória de aciaria para uso em base e sub-base.

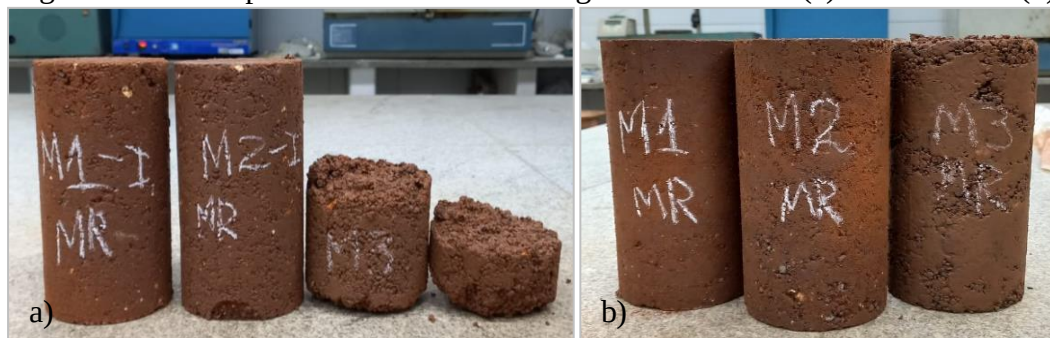
Figura 28 – Gráfico com valores de MR dos materiais analisados.



Fonte: A autora (2023).

Assim como no ensaio de ISC, a mistura M3 – M (SN25+AS75), por apresentar redução de MR em relação à mistura M2 – M (SN50+AS50), foi ensaiada em triplicata e o valor de 920 MPa mostrou um desvio padrão de 194 MPa e um coeficiente de variação de 21%. Uma das hipóteses para a redução é a quebra das partículas devido à uma maior energia de compactação aplicada. Ou ainda, a redução de material fino de modo a preencher os vazios gerados pela maior adição de agregado siderúrgico contribuindo para uma menor resistência. Além disso, conforme comentado anteriormente, esse resultado sugere um teor “ótimo” de agregado siderúrgico na estabilização de solos. A mistura M3 – I (SN25+AS75), segue a mesma tendência e cabe as mesmas justificativas. Tal fato pode ser observado na Figura 29, onde é possível ver que as superfícies dos corpos de prova dessas misturas em questão apresentam rugosidades e vazios, além de coesão reduzida. Quanto às demais misturas, estas foram ensaiadas apenas uma vez, devido à baixa quantidade de material e disponibilidade do equipamento.

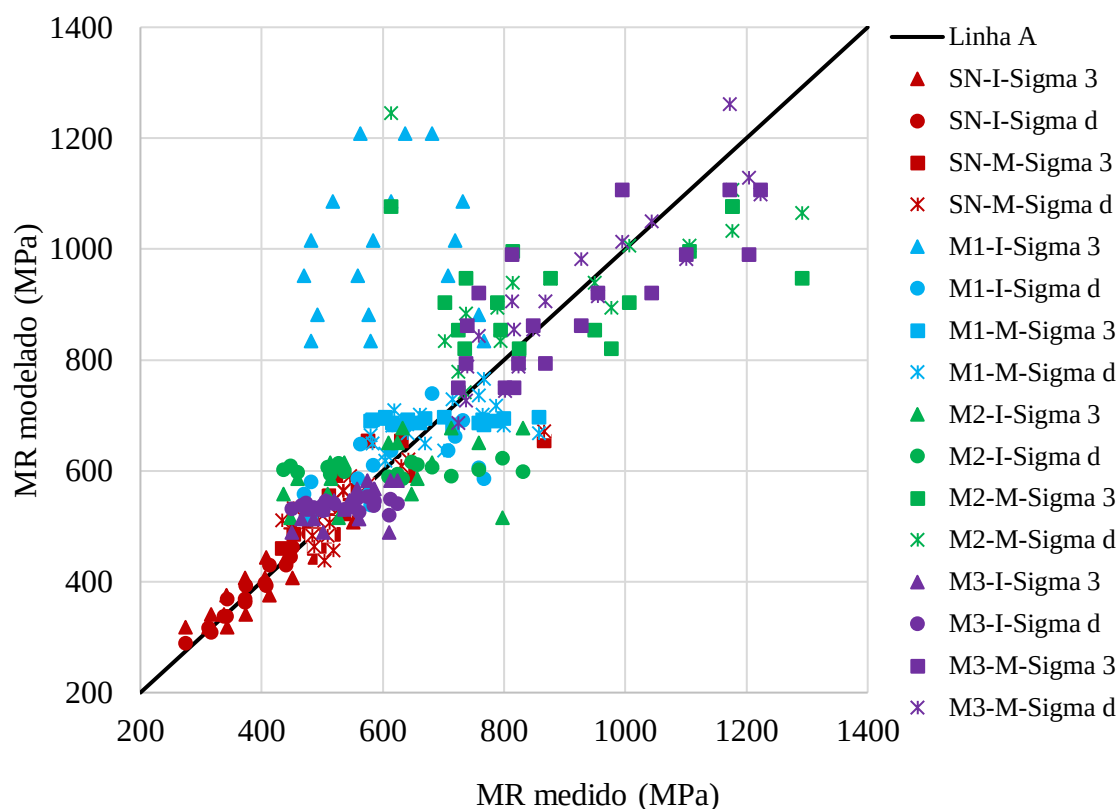
Figura 29 – CPs após ensaio de MR na energia intermediária (a) e modificada (b).



Fonte: A autora (2023).

Em muitos trabalhos, o modelo composto tem se mostrado o mais eficaz para representar os ensaios de módulo de resiliência. Moreira *et al.* (2020), para amostras de brita graduada simples (BGS) empregadas em campo, encontraram valores de MR variando de 100 a 500 MPa e observaram que o modelo composto foi o que melhor se adequou aos seus dados. Santos (2003), ao analisar um solo SC (SUCS) /A-4 (TRB-AASHTO) com utilização de oito tipos de modelos, observou que o modelo composto representou melhor seus dados em relação aos modelos que consideram apenas as tensões confinante e octaédrica de forma isolada. A Figura 31 apresenta os valores MR medido, fornecido pelo equipamento para cada par de tensão *versus* MR modelado, encontrado a partir do emprego dos modelos em função da tensão confinante (σ_3) (Preussler, 1978) e desvio (σ_d) (Svenson, 1980). A partir da Figura 30, observa-se que no geral os pontos ficaram bem dispersos para todas as misturas, excetuando-se as amostras de solo. Isso reforça os baixos valores de R^2 encontrado para os materiais com aplicação dos modelos simples.

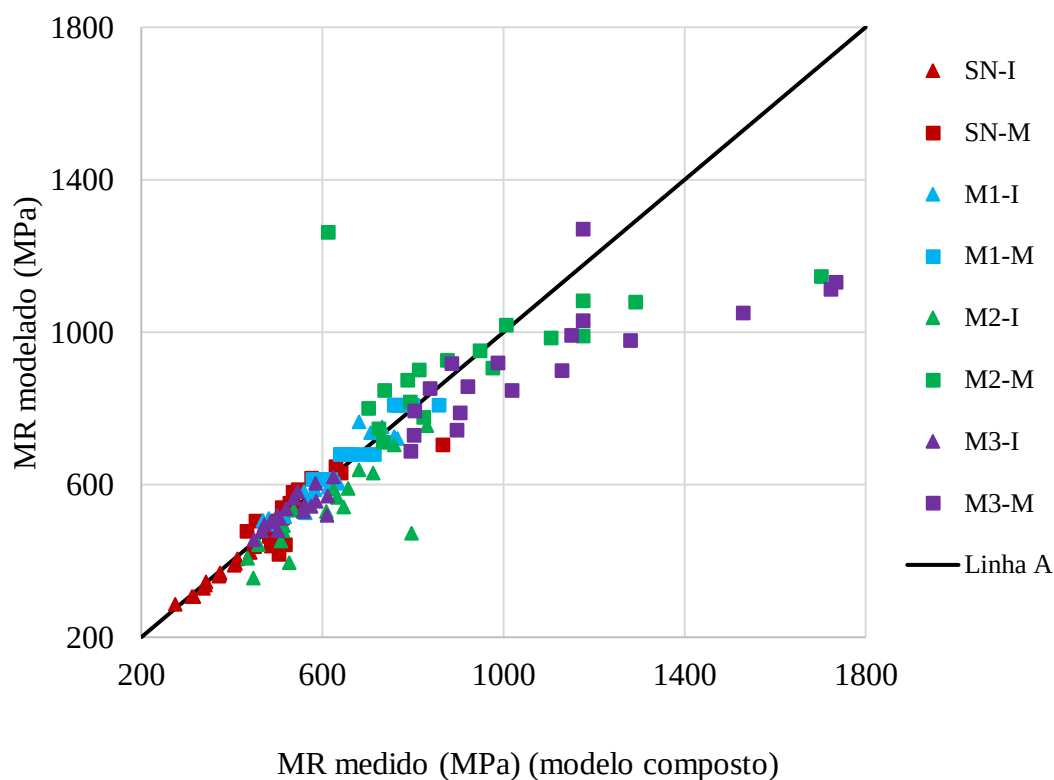
Figura 30 – MR medido *versus* MR modelado em função de σ_3 e σ_d .



Fonte: A autora (2023).

Já a Figura 31 é apresentado os resultados de MR medido *versus* MR modelado com emprego do modelo composto que considera tanto a tensão desvio como a tensão confinante. Os pontos no geral estão bem próximos da linha de identidade A, mostrando que o modelo composto, em quase todas as amostras, representou melhor os dados obtidos no ensaio de MR.

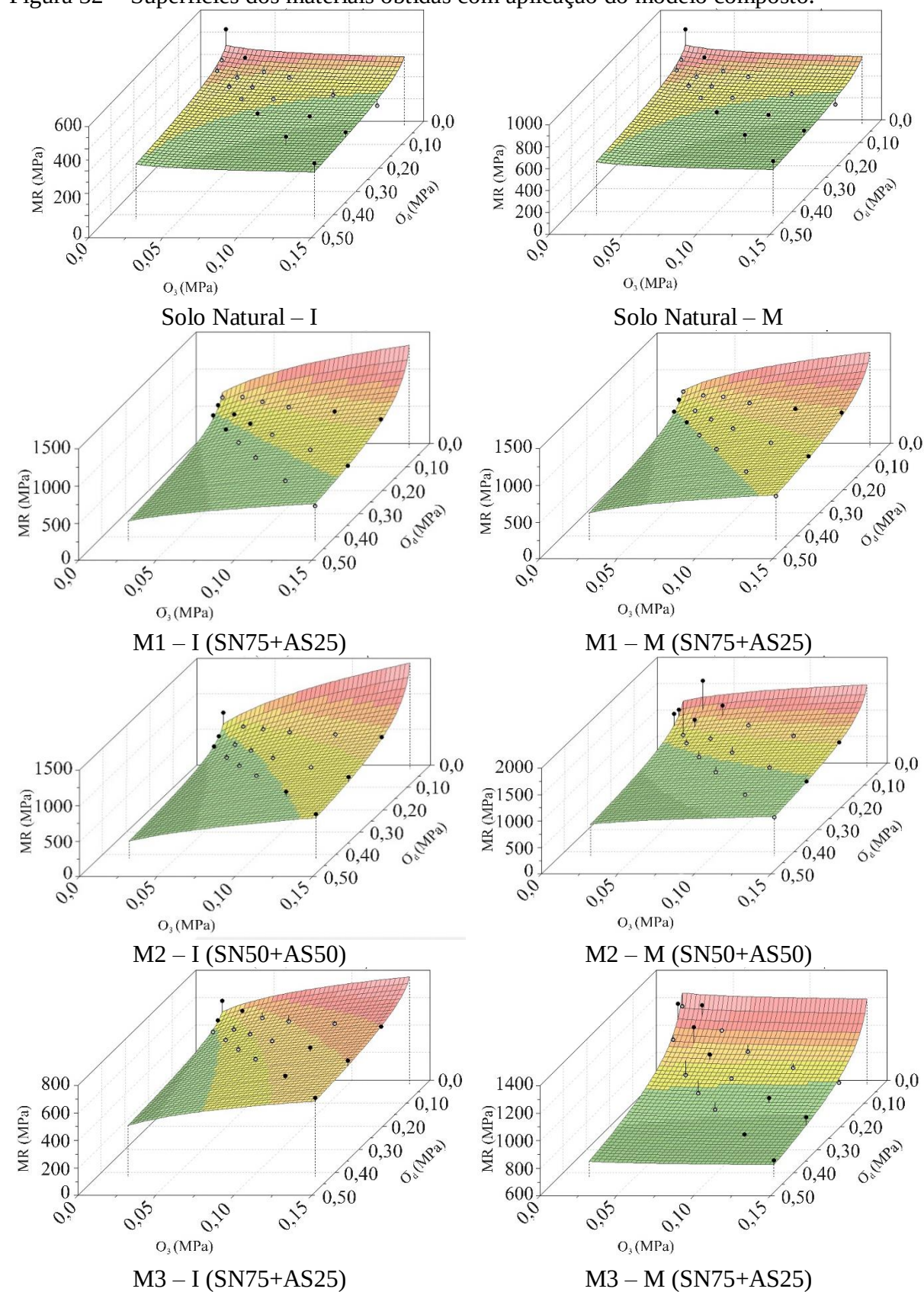
Figura 31 – MR medido versus MR modelado modelo composto.



Fonte: A autora (2023).

Com o auxílio do *software* Lab Fit Ajuste de Curvas (Silva *et al.*, 2004) foram geradas as superfícies resilientes das misturas de solo-agregado siderúrgico e do solo natural na energia intermediária e na modificada (Figura 32) com emprego do modelo composto, dado que este apresentou melhor ajuste matemático para os dados obtidos. A partir da análise das superfícies é possível afirmar que os valores de MR das misturas são, de modo geral, diretamente influenciados positivamente pelo aumento da tensão confinante. Com relação a tensão desvio, o aumento desta favoreceu na redução dos valores de módulo de resiliência.

Figura 32 – Superfícies dos materiais obtidas com aplicação do modelo composto.



Fonte: A autora (2023).

Parente *et al.* (2003) analisaram misturas de solo oriundo de Fortaleza-Ce e escória de aciaria e observaram que o modelo que considera a tensões confinante e desvio ao mesmo tempo apresentou melhor R^2 seguido do modelo que considera a tensão desvio. Os autores verificaram que o efeito da tensão desvio na redução do MR foi maior que o efeito da tensão confinante nos materiais, com presença de todos os K_2 negativos.

Pires *et al.* (2019) ao analisarem a viabilidade do uso de escória siderúrgica de dessulfuração como estabilizante de solos empregaram dois tipos de solos em misturas, um classificado como A-7-6 (solo argiloso) com comportamento de fraco a pobre e o outro como A-2-6 (areia siltosa/argilosa) com comportamento de excelente a bom para pavimentação. Nos ensaios de módulo de resiliência, os autores obtiveram valores significativos, maiores que 2.000 MPa para a mistura de solo01+escória15% e valores mais baixos para a mistura composta pelo solo 02 (excelente a bom) e escória, sendo de 400MPa. Rohde (2002) em seus estudos com escória de aciaria elétrica com granulometria corrigida, ao considerar uma tensão de confinamento de 100kPa da base de um pavimento flexível, obteve valores de MR de 478 MPa.

A nível de comparação com outros resíduos, como o RCD (resíduo de construção e demolição), Gómez (2011) obteve valores de MR na energia intermediária de 190 MPa e na energia modificada o valor foi mais baixo, de 140 MPa. Já Vasconcelos *et al.* (2019) avaliaram o comportamento resiliente de misturas de solo-cinza-cal (5%) e o resultado de MR médio foi de 1.007 MPa.

Quanto ao módulo de resiliência estabelecido nas normas vigentes, em DNIT 115 (DNIT, 2009b) é exigido um valor maior ou igual a 300 MPa, tanto para Acerita® como para misturas de solo-Acerita® para emprego em camadas de base rodoviária estabilizada granulometricamente, ambas na energia intermediária. Em DNIT 114 (DNIT, 2009a) o valor é o mesmo de ≥ 300 MPa para aplicação em sub-base de Acerita®, já para as misturas o valor não é especificado.

Já DNIT 406 (DNIT, 2017a) determina como requisito para execução de bases rodoviárias com Açobrita® um módulo de resiliência igual ou maior que 300 MPa. Assim como em DNIT 407 (DNIT, 2017a) que também exige o mesmo valor (300MPa) para uso de Açobrita® em sub-base, e ambos na energia intermediária. A NBR 16.364 (ABNT, 2015), que aborda sobre execução de base e sub-base estabilizadas com agregado siderúrgico, determina um MR igual ou superior a 90 MPa para o menor valor de tensão confinante aplicada.

Partindo do que foi exposto sobre comportamento resiliente dos materiais e levando em consideração os valores médios de MR é possível afirmar que as três misturas podem ser empregadas em camadas granulares de pavimentos, em ambas as energias de compactação. O

solo natural também pode ser destinado para esse tipo de aplicação, pois atende os valores mínimos exigidos nas normas vigentes.

Diante do que foi exposto e de posse dos resultados apresentados até aqui, é possível determinar quais amostras se enquadraram melhor ou não nos parâmetros exigidos nas normas abordadas. Os Quadros 10, 11, 12, 13, 14 e 15 trazem um resumo dos resultados obtidos de cada amostra e se esses foram atendidos de forma normativa (A) ou não (NA). Ao analisar os Quadros 10, 11, 12, 13, 14 e 15 observa-se que a amostra M2 enquadramento a todos os critérios das normas citadas, excetuando para a DNER 262 (DNER, 1994). A amostra M3 ficou como segundo melhor material, ocupando esse lugar principalmente pelo não atendimento à granulometria exigida nas normas. Nas normas com critérios para emprego de agregado siderúrgico/misturas com agregado siderúrgico em camadas de base, a mistura M2 (SN50+AS50) e M3 (SN25+AS75) apresentaram melhor desempenho, mostrando-se viáveis para esse objetivo. Para a camada de sub-base as duas misturas, supracitadas, também mostra-se viáveis para essa aplicação, atendendo aos parâmetros necessários para este fim.

Quadro 10 - Parâmetros exigidos em DNER 262 (DNER, 1994).

Pavimento Rodoviário					
DNER 262 (DNER, 1994)	SOLO	AS	M1	M2	M3
Absorção de água (%)	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø
Desgaste a Abrasão (%)	Ø	A	Ø	Ø	Ø
Durabilidade ao sulfato de sódio (%)	Ø	*	Ø	Ø	Ø
Granulometria (faixa)	NA	NA	NA	NA	NA

Fonte: A autora (2023).

Quadro 11 – Parâmetros exigidos em DNIT 115 (DNIT, 2009) para camada de base.

Base					
DNIT 115 (DNIT, 2009)	SOLO	AS	M1	M2	M3
ISC (intermediária) (%)	Ø	Ø	NA	A	A
Expansão (ISC) (%)	Ø	*	A	A	A
MR (MPa)	Ø	*	A	A	A
Desgaste a Abrasão (%)	Ø	A	*	*	*
Tipo de Solo (MCT)	A	Ø	Ø	Ø	Ø
Granulometria (faixa)	NA	NA	NA	A	NA

Fonte: A autora (2023).

Quadro 12 – Parâmetros exigidos em DNIT 114 (DNIT, 2009) para camada de sub-base.

Sub-base					
DNIT 114 (DNIT, 2009)	SOLO	AS	M1	M2	M3
ISC (intermediária) (%)	Ø	Ø	A	A	A
Expansão (ISC) (%)	Ø	*	A	A	A
MR (MPa)	Ø	*	A	A	A
Desgaste a Abrasão (%)	Ø	A	*	*	*
Tipo de Solo (MCT)	A	Ø	Ø	Ø	Ø
Granulometria (faixa)	NA	NA	NA	A	NA

Fonte: A autora (2023).

Quadro 13 – Parâmetros exigidos em DNIT 406 (DNIT, 2017) para camada de base.

Base					
DNIT 406 (DNIT, 2017)	SOLO	AS	M1	M2	M3
ISC (modificada) (%)	Ø	Ø	NA	A	A
Expansão (ISC) (%)	Ø	*	A	A	A
MR (modificada) (MPa)	Ø	*	A	A	A
Desgaste a Abrasão (%)	Ø	A	Ø	Ø	Ø
LL (%)	A	Ø	Ø	Ø	Ø
IP (%)	A	Ø	Ø	Ø	Ø
Granulometria (faixa)	Ø	NA	NA	A	A

Fonte: A autora (2023).

Quadro 14 – Parâmetros exigidos em DNIT 407 (DNIT, 2017) para camada de sub-base.

Sub-base				
DNIT 407 (DNIT, 2017)	AS	M1	M2	M3
ISC (intermediária) (%)	Ø	A	A	A
Expansão (ISC) (%)	*	A	A	A
MR (MPa) (intermediária)	*	A	A	A
Desgaste a Abrasão (%)	A	Ø	Ø	Ø
Granulometria (faixa)	NA	NA	A	A

Fonte: A autora (2023).

Quadro 15 – Parâmetros exigidos em NBR 16364 (ABNT, 2015) para camada de base e sub-base.

Base e Sub-base					
NBR 16364 (ABNT, 2015)	SOLO	AS	M1	M2	M3
ISC (modificada) (%)	Ø	Ø	Sub-base	Base	Base
Expansão (ISC) (%)	Ø	Ø	A	A	A
Desgaste a Abrasão (%)	Ø	A	Ø	Ø	Ø
MR (MPa)	Ø	Ø	A	A	A
LL (%)	A	Ø	Ø	Ø	Ø
IP (%)	A	Ø	Ø	Ø	Ø
Granulometria (faixa)	Ø	NA	NA	A	A

Fonte: A autora (2023).

Onde:

*: não realizado.

Ø: não especificado em norma.

A: atende

NA: não atende.

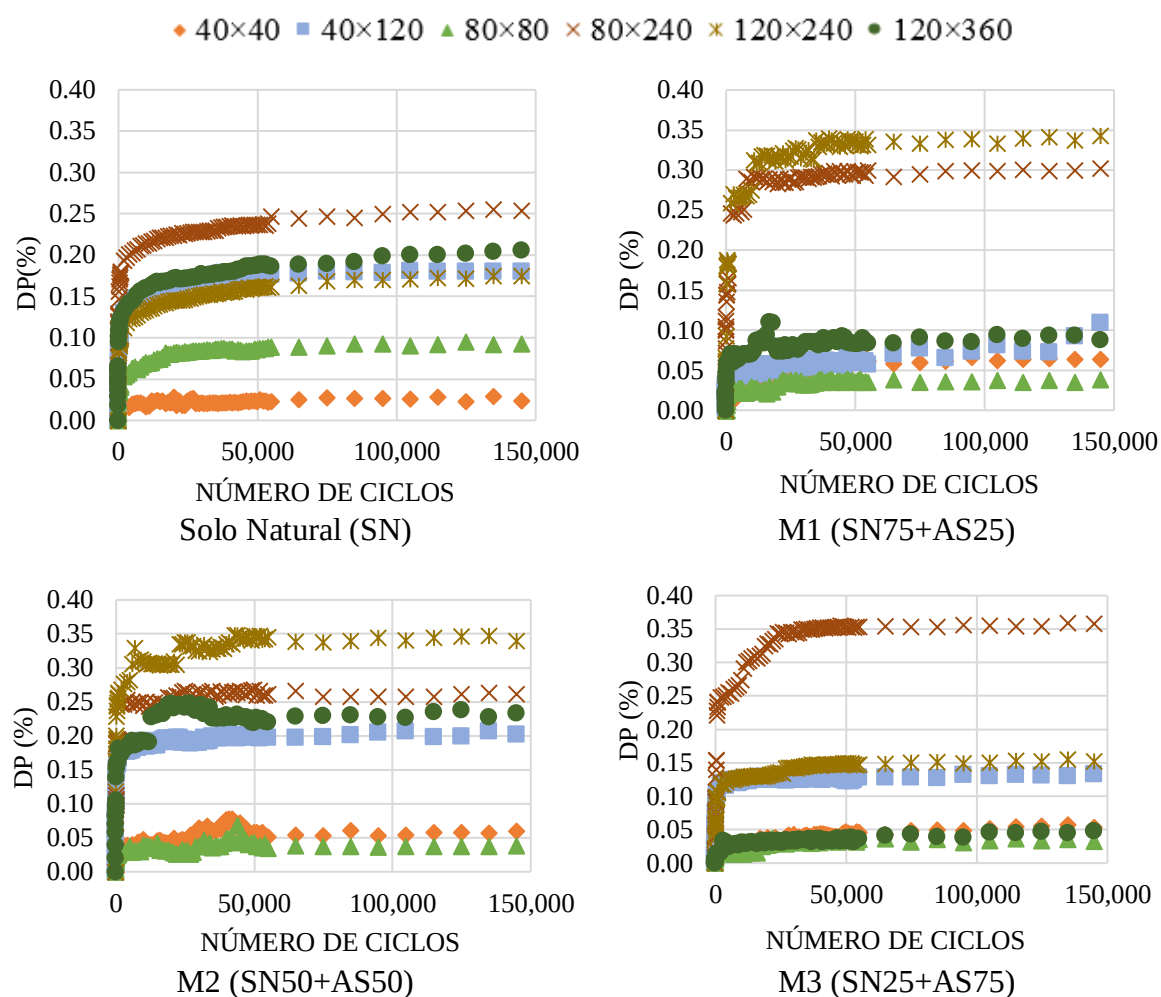
4.2.5. *Deformação Permanente*

Foram analisados o comportamento dos materiais quanto a deformação permanente em três níveis de tensões confinantes (σ_3): 40kPa, 80kPa e 120kPa. Para cada tensão confinante foram analisadas duas tensões desvio (σ_d). Devido a limitação de utilização do equipamento triaxial, realizou-se o ensaio apenas na energia modificada. A escolha foi baseada nas especificações presentes em DNIT 141 (DNIT, 2010), onde é exigido que a energia seja a modificada, para aplicação de mistura de solo e material britado estabilizados granulometricamente em bases rodoviárias.

Após os 100 ciclos de condicionamento foram aplicados 150.000 ciclos para cada par de tensão. É importante ressaltar que os resultados aqui apresentados são dos ensaios que apresentaram gráficos esperados, pois durante a execução dos ensaios enfrentou-se alguns problemas como queda de energia, *bug* no sistema e falha nos LVDTs ocasionando gráficos fora da normalidade. Prontamente resolvidos os problemas, foram moldados novos CPs e ensaiados novamente.

Os resultados de deformação permanente acumulada (%) são apresentados na Figura 33. Pelo comportamento dos gráficos é possível observar um acentuado aumento de deformações nos ciclos iniciais, ficando abaixo dos 10.000 ciclos. A partir disso os materiais entram em acomodamento plástico (ou *shakedown*), tornando essas deformações praticamente constantes. De acordo com DNIT 179 (DNIT, 2018) os materiais em questão podem ser classificados como TIPO I, pois as deformações tendem a estabilizar com poucos ciclos. Cabral *et al.* (2022) ao analisarem misturas de solo-brita, também observaram que de forma geral os materiais tenderam ao acomodamento plástico em todos os pares de carregamentos antes dos 10.000 ciclos. Os materiais do tipo I são definidos como aqueles que apresentam acomodamento plástico (*shakedown*) que se refere à estabilização da deformação permanente submetido ainda nos primeiros ciclos de carga e sob determinado nível de tensão desvio e confinante (DNIT, 2018).

Figura 33 – Deformação permanente (%) *versus* número de ciclos.

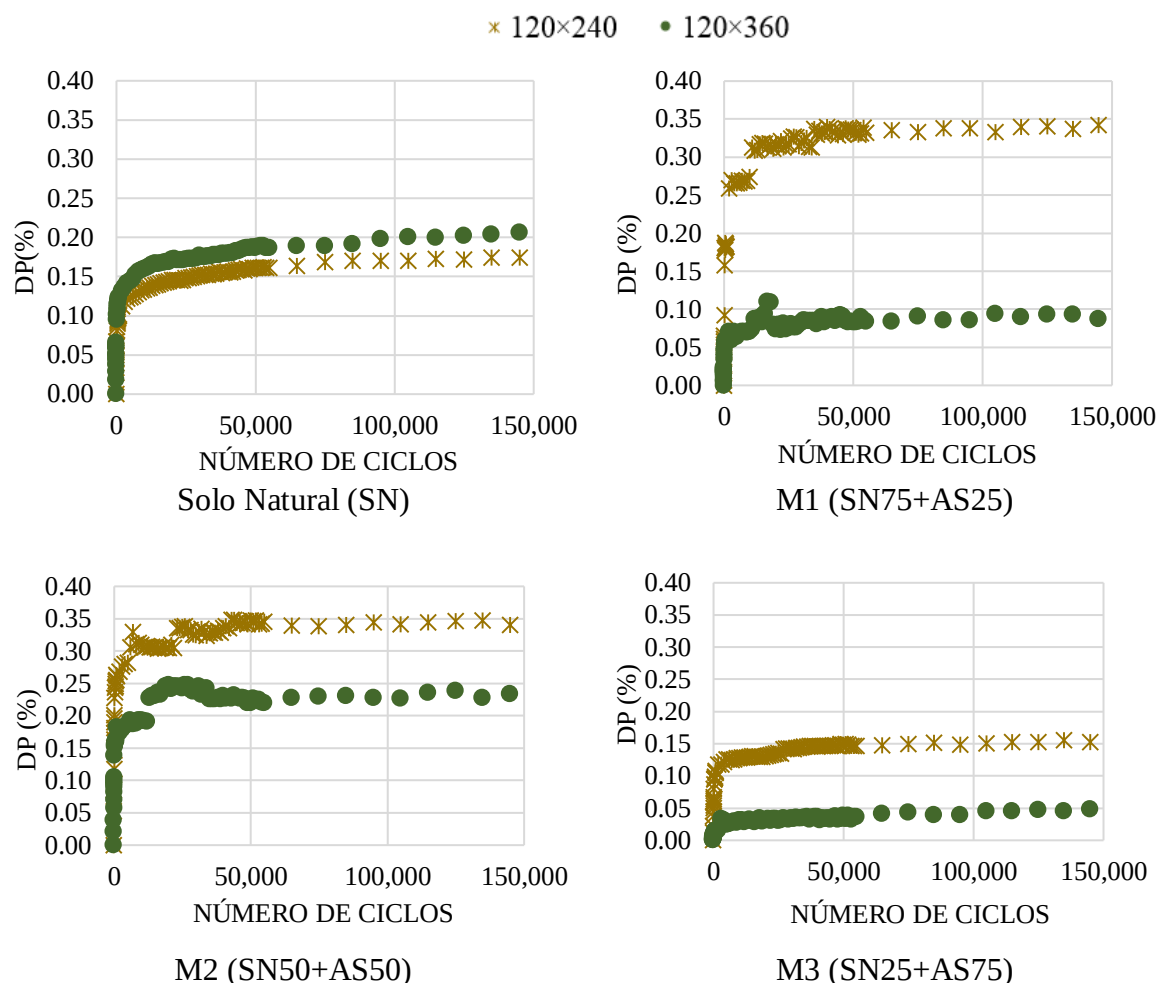


Fonte: A autora (2023).

Na Figura 34 observa-se que o maior valor de deformação permanente acumulada foi de aproximadamente 0,36% (mistura M3) para o par de tensão 80×240, não sendo este o maior par de tensão aplicado. Observa-se que para essa mesma mistura, a tendência é de redução das deformações com o aumento de σ_d e σ_3 .

É importante pontuar, o comportamento das misturas nos dois últimos pares de tensão, ($\sigma_3 \times \sigma_d$, 120×240) e ($\sigma_3 \times \sigma_d$, 120×360). Pois o cenário esperado é que estas sofram aumento de deformações com o aumento da tensão desvio. Entretanto, ocorre o contrário, as deformações reduzem para as três misturas no par com tensão desvio maior, de 360 kPa (Figura 34).

Figura 34 – Gráficos pares de tensões ($\sigma_3 \times \sigma_d$, 120×240) e ($\sigma_3 \times \sigma_d$, 120×360).

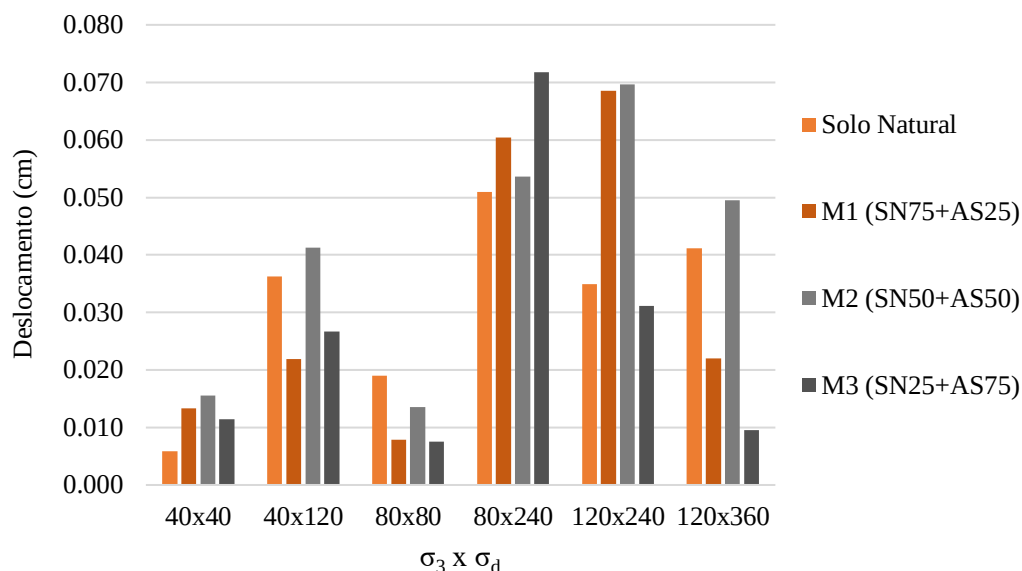


Fonte: A autora (2023).

Na Figura 36 é apresentado o maior deslocamento (cm) encontrado para o solo natural e para cada mistura. A partir da análise da Figura 35, observa-se que os deslocamentos são menores para os pares de tensões mais baixos e maiores para os pares de tensão mais altos. Isso mostra a influência da tensão desvio sobre as amostras. Os picos de deslocamento de todas as amostras se concentraram no par onde a tensão confinante é 80 kPa e desvio de 240 kPa e no par onde a tensão confinante é 20 kPa e desvio 240 kPa. O deslocamento mais expressivo do solo natural foi de 0,051 cm, o da mistura M1 (SN75+AS25) foi de 0,069 cm, da mistura M2 (SN50+AS50) de 0,070 cm e da mistura M3 (SN25+AS75) de 0,072 cm. Entretanto, nenhum dos pares de tensões analisados apresentou valores deslocamentos maiores que 0,125 cm ou 12,5 mm que, de acordo com Guimaraes (2009), é o valor usualmente considerado em projetos de rodovias. Segundo o autor, considerando um determinado material empregado em uma camada de base com espessura de 20 cm e que apresente deformação permanente na grandeza

de 0,072 cm (mistura M3), a camada constituída desse material irá contribuir com essa deformação em 150.000 ciclos para então manifestar patologia em trilha de roda.

Figura 35 – Deslocamento no final do ensaio de DP.



Fonte: A autora (2023).

Vasconcelos *et al.* (2019) obtiveram deslocamento de 0,636 mm para misturas de solo-cinza-cal. Já Gómez (2016), ao analisar resíduo de construção e demolição, obteve valor de deformação de 0,6% ou 1,2 mm de deslocamento, ambos bem abaixo dos deslocamentos encontrados nesta pesquisa. Norback *et al.* (2018) encontraram valor de DP máxima de 4,14 mm no par de tensão 120×360 para misturas de solo arenoso não laterítico e brita (55%).

Para a determinação do R^2 e dos coeficientes de regressão (ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 e ψ_4) foi empregado o modelo sugerido por Guimarães (2009) com auxílio do software Lab Fit Ajuste de Curvas (Silva *et al.*, 2004). A partir dos dados encontrados foi possível observar que todos os valores de R^2 foram abaixo de 0,85. Valores de R^2 superiores a 0,85 são considerados, pelo ponto de vista estatístico como bons (Guimarães, 2009), dessa forma é possível concluir que o modelo ou a ferramenta de análise não apresentaram bom enquadramento para os materiais.

Quanto à análise dos coeficientes, para Ψ_1 é esperado que este valor normalmente seja positivo, como ocorrido nesta pesquisa. Para Ψ_2 (correspondente a tensão confinante) espera-se este coeficiente seja negativo, pois o comportamento natural é que maior essa tensão menor a deformação permanente. Para Ψ_3 (referente a tensão desvio) espera-se que esses valores sejam positivos, dado que o esperado é que quanto maior a tensão aplicada no material maior será a deformação apresentada. Para Ψ_4 (respectivo ao número de ciclos) também espera-se um valor

positivo, pois a tendência é que o aumento de ciclos influencie negativamente na deformação permanente, ou seja, esta aumenta. É possível observar que o coeficiente com maior influência sobre o material é o Ψ_3 , o que também mostra ser um comportamento esperado, dado que quanto maior a carga aplicada sobre os materiais, maiores serão as deformações. Todas as amostras analisadas atenderam essas condições, excetuando-se a mistura M1 (SN75+AS25) que apresentou valor de Ψ_2 diferente do esperado, com valor positivo. A Tabela 20 apresenta os valores de Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_3 e Ψ_4 , além dos valores de R^2 obtidos com a aplicação do modelo de Guimarães (2009).

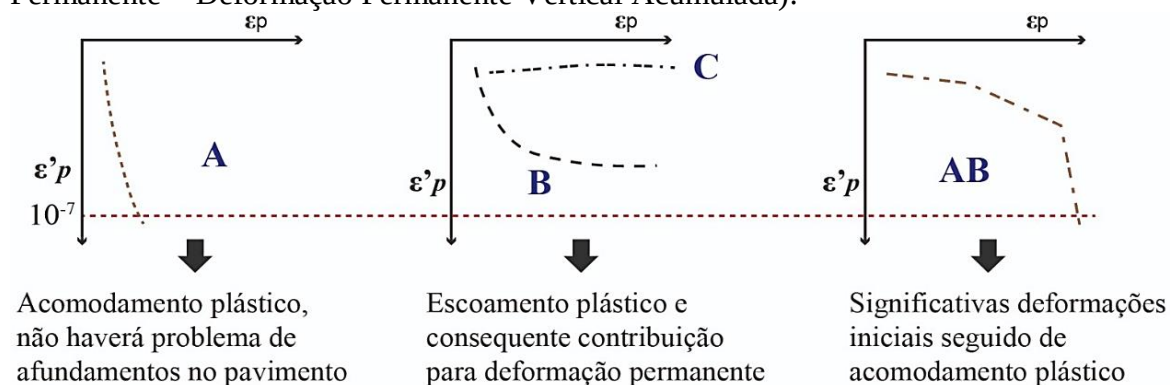
Tabela 20 – Parâmetros do modelo de Guimarães (2009).

Solo Natural	Parâmetros Modelo Guimarães (2009)		Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	R^2
			0,01	-0,87	1,04	0,13	0,86
Solo Natural	$\sigma_3 \times \sigma_d$ (kPa)	40×40	40×120	80×80	80×240	120×240	120×360
	ε_p ensaio (%)	0,02	0,14	0,07	0,20	0,13	0,15
	ε_p modelo (%)	0,05	0,15	0,05	0,17	0,12	0,18
			Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	R^2
M1 (SN75+AS25)	Parâmetros Modelo Guimarães (2009)		0,004	0,472	0,261	0,191	0,37
	$\sigma_3 \times \sigma_d$ (kPa)	40×40	40×120	80×80	80×240	120×240	120×360
	ε_p ensaio (%)	0,04	0,05	0,03	0,25	0,27	0,07
	ε_p modelo (%)	0,06	0,08	0,10	0,13	0,16	0,18
M2 (SN50+AS50)	Parâmetros Modelo Guimarães (2009)		Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	R^2
			0,01	-0,30	0,77	0,11	0,68
	$\sigma_3 \times \sigma_d$ (kPa)	40×40	40×120	80×80	80×240	120×240	120×360
	ε_p ensaio (%)	0,04	0,17	0,03	0,23	0,29	0,20
M3 (SN25+AS75)	ε_p modelo (%)	0,07	0,16	0,09	0,22	0,19	0,26
	Parâmetros Modelo Guimarães (2009)		Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	R^2
			0,01	-1,23	1,14	0,15	0,36
	$\sigma_3 \times \sigma_d$ (kPa)	40×40	40×120	80×80	80×240	120×240	120×360
M3 (SN25+AS75)	ε_p ensaio (%)	0,03	0,11	0,02	0,28	0,12	0,03
	ε_p modelo (%)	0,04	0,15	0,04	0,14	0,09	0,14

Fonte: A autora (2023).

Quanto a pesquisa de presença de *shakedown* nos ensaios de deformação permanente dos materiais foi aplicado o modelo de Dawson e Wellner, citado por Werkmeister (2003) de modo a identificar e classificar o tipo de comportamento. A Figura 36 traz os modelos de comportamento presentes na norma de ensaio de deformação permanente.

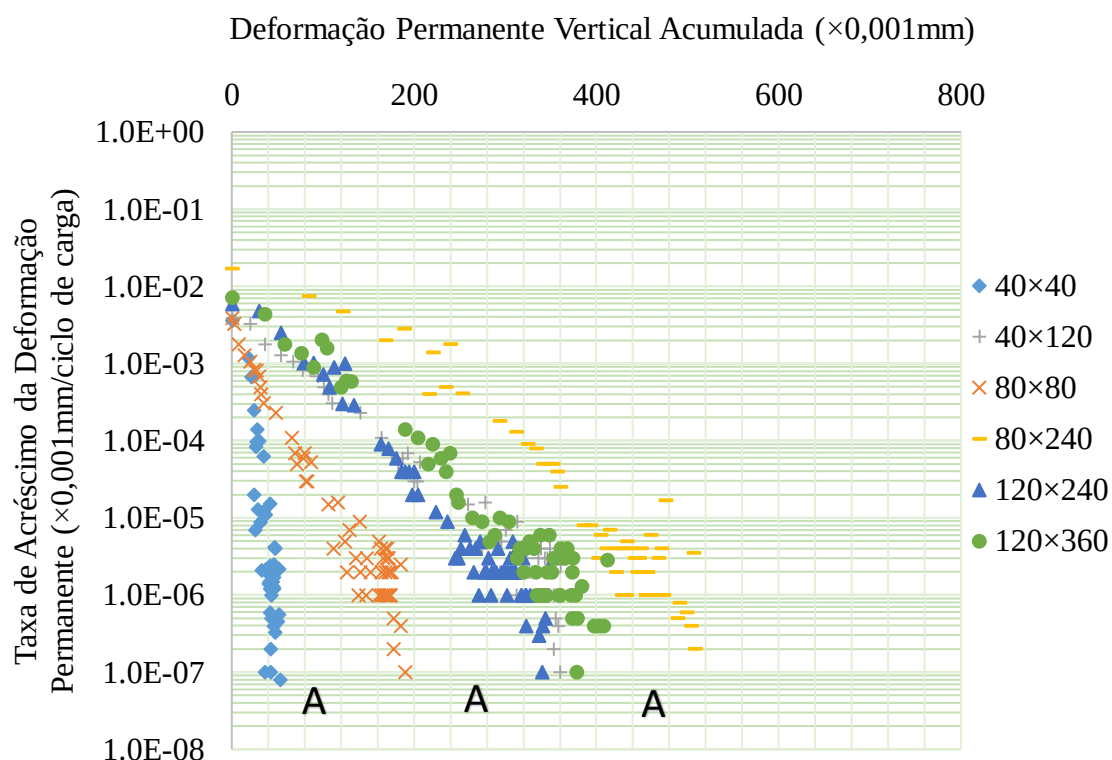
Figura 36 – Análise do acomodamento (*shakedown*) (Taxa de Acréscimo da Deformação Permanente × Deformação Permanente Vertical Acumulada).



Fonte: DNIT 179 (DNIT, 2018b).

Para o solo natural, todos os ensaios apresentaram resultados com configuração de comportamento de nível A, onde, de acordo com Guimarães (2009), ocorrem deformações elásticas e plásticas até determinado número de aplicações de carga e em seguida ocorrência de deformações elásticas e acomodamento plástico. Segundo este mesmo autor, o nível A é caracterizado pela forma do gráfico, dados distribuídos de forma paralela ao eixo y, e pela taxa de acréscimo de deformação permanente (ϵ'_p) apresentada na ordem de 10^{-7} ($\times 10^{-3}$ m/ciclo de carga). Isso significa que o material teve deformação permanente aumentada em apenas 10^{-7} mm a cada novo ciclo nos ciclos finais. Sobre o comportamento nível A do solo quanto à deformação permanente é recorrente para solos lateríticos de acordo com Guimarães (2009). O gráfico da taxa de acréscimo de deformação permanente (ϵ'_p) pela deformação permanente vertical acumulada (ϵ_p) para pesquisa de *shakedown* do solo é apresentado na Figura 37.

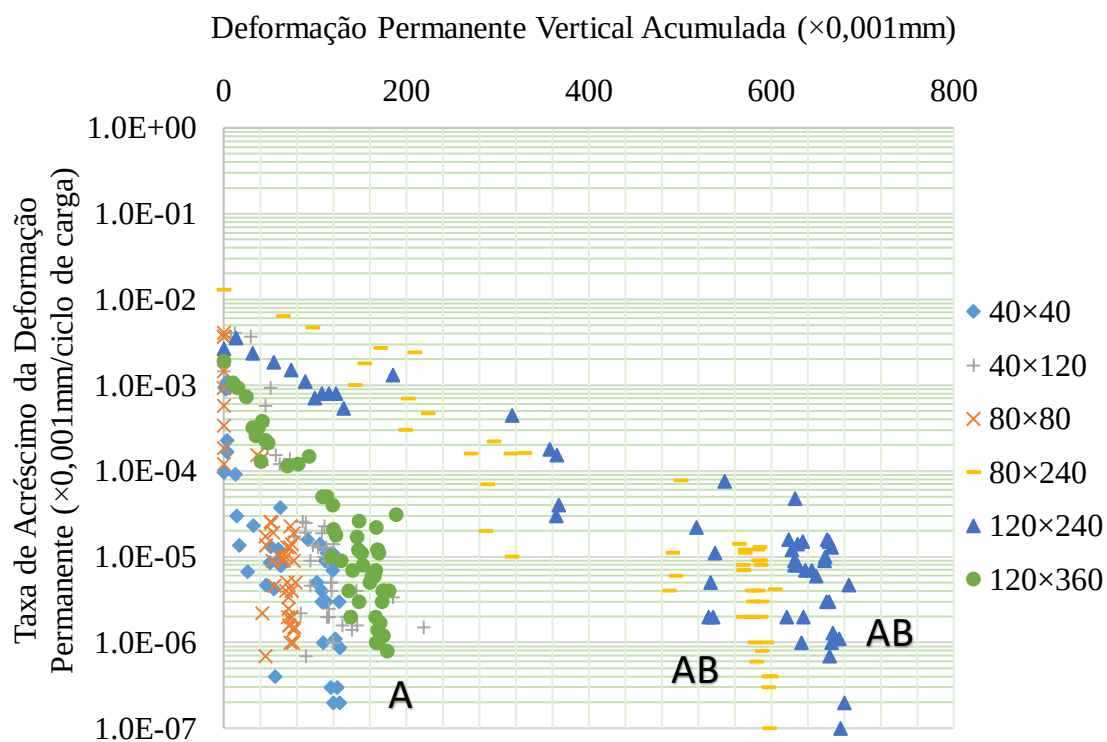
Figura 37 – Pesquisa de ocorrência de *shakedown* do solo natural (SN).



Fonte: A autora (2023).

Os ensaios com pares de tensões 40×40, 40×120, 80×80 e 120×360, por apresentar curvas paralelas ao eixo vertical mostram que nessas tensões a mistura M1 (SN75+AS25) entrou em *shakedown*, ou seja, acomodou-se. Entretanto, para os ensaios onde os pares de tensões foi 120×360 e 80×240 é possível observar curvas do tipo AB, que segundo Guimarães (2009) se comporta de forma mista entre os tipos A e B. Tal comportamento é demonstrado na Figura 38.

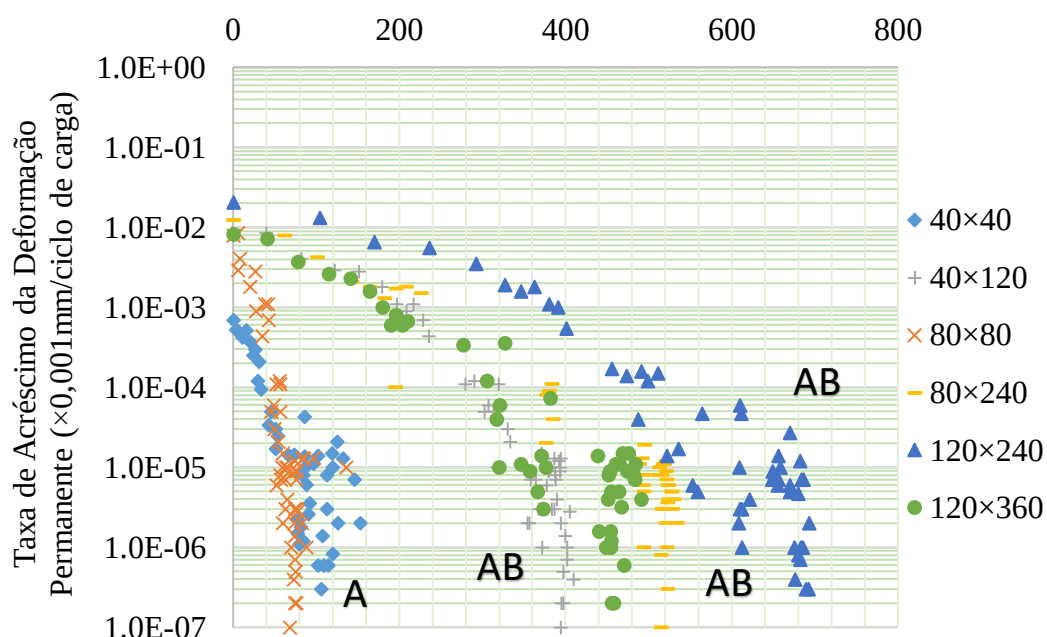
Figura 38 – Pesquisa de ocorrência de *shakedown* da amostra M1 (SN75+AS25).



Fonte: A autora (2023).

Os ensaios com a amostra M2 (SN50+AS50) para os pares de tensões 40×40 e 80×80 apresentaram comportamento do tipo A (*shakedown*). Para os demais pares de tensões o comportamento observado é do tipo AB, onde é observado taxas de acréscimo de deformação permanente maiores nos ciclos de cargas iniciais e com tendência a zero nos ciclos mais altos. Isso pode ser observado na Figura 39.

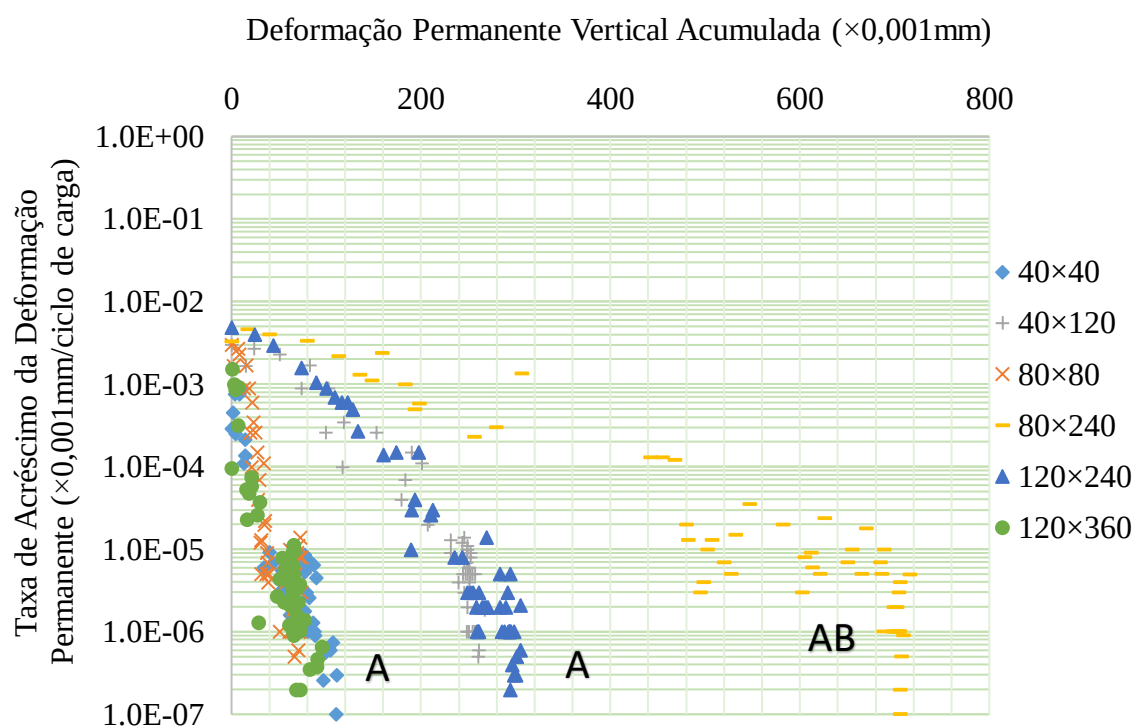
Figura 39 – Pesquisa de ocorrência de *shakedown* da amostra M2 (SN50+AS50).
Deformação Permanente Vertical Acumulada ($\times 0,001\text{mm}$)



Fonte: A autora (2023).

Para a mistura M3 (SN25+AS75) o ensaio com par de tensão 80×240 apresentou comportamento nível AB e os demais ensaios, nível A com curvas paralelas ao eixo vertical. Em DNIT 179 (DNIT, 2018) é apresentado que materiais com comportamento tipo AB são propícios a apresentar significativas deformações nos ciclos iniciais e acomodamento plástico nos demais. A Figura 40 apresenta as curvas quanto a ocorrência de *shakedown* para a amostra M3 (SN25+AS75).

Figura 40 – Pesquisa de ocorrência de *shakedown* da amostra M3 (SN25+AS75).



Fonte: A autora (2023).

De acordo com DNIT 179 (DNIT, 2018) os materiais com comportamento do nível A seriam os mais indicados para aplicação em pavimentação, pois espera-se que estes apresentem acomodamento plástico, conseqüentemente não apresentarão afundamento no pavimento. Já os de nível AB são materiais que podem apresentar significativas deformações nos primeiros ciclos de cargas e seguida de acomodamento plástico quando os ciclos vão aumentando. Dessa forma é possível concluir que as misturas e o solo são materiais em potencial para aplicação em camadas de pavimento quanto as deformações. Entretanto, quando as tensões são maiores aumentam essas deformações se tornam mais expressivas, mas não sendo suficientes para que os materiais entrem em colapso ou ruptura.

4.3. Análise da Caracterização Química

4.3.1. Fluorescência de Raio X (FRX) e Difração de Raio X (DRX)

A composição química do agregado siderúrgico é influenciada pela matéria-prima utilizada no processo de fabricação, pelo revestimento do conversor, pelo tipo de aço produzido, pelo método de resfriamento e pelas condições de armazenamento (Dayrell &

Fernandes, 2014). Determinar os elementos químicos e a concentração desses elementos é uma forma de caracterizar e entender os materiais. Os óxidos obtidos no ensaio de fluorescência de Raio X de cada material são apresentados na Tabela 21.

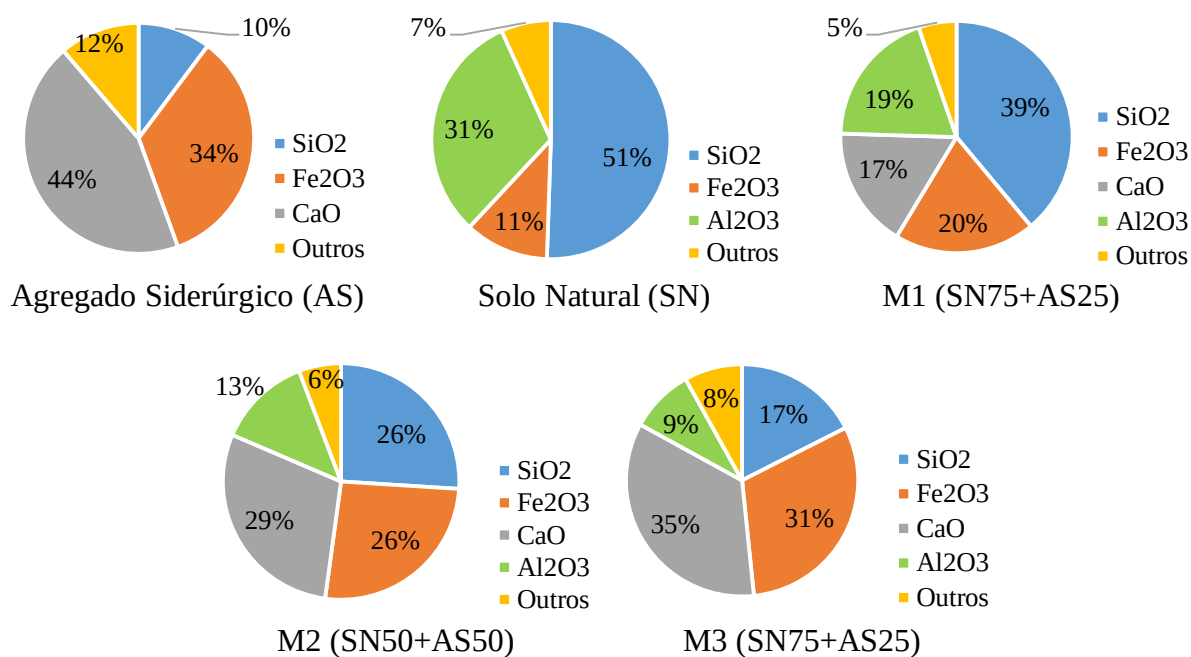
Tabela 21– Dados de óxidos presentes nos materiais obtidos por FRX.

Óxido	AS	SN	M1	M2	M3
SiO ₂	10,32	50,53	39,04	26,00	17,52
Fe ₂ O ₃	34,60	11,40	19,75	26,16	30,84
CaO	44,67	0,45	16,90	29,29	34,62
Al ₂ O ₃	2,79	31,31	19,28	12,77	8,92
MgO	3,45	0,31	-	-	2,09
P ₂ O ₅	1,49	-	-	0,97	1,44
Cl	0,01	-	-	-	0,01
K ₂ O	0,11	3,73	2,42	1,37	0,70
TiO ₂	0,44	1,83	1,48	1,21	0,99
Cr ₂ O ₃	0,20	-	0,11	0,10	0,17
MnO	2,76	0,20	0,99	1,68	2,38
Co ₂ O ₃	-	-	-	-	0,07
ZnO	0,15	0,05	0,13	0,20	0,19
ZrO ₂	-	0,19	0,18	0,16	0,05
SO ₃	-	-	-	0,10	-

Fonte: A autora (2023).

Ao serem submetidas ao ensaio de fluorescência de Raio X, observou-se que os óxidos com maior presença nos materiais analisados foram o dióxido de silício ou sílica (SiO₂), óxido de ferro III ou hematita (Fe₂O₃), óxido de cálcio (CaO) e o óxido de alumínio ou alumina (Al₂O₃). A soma desses compostos representou cerca de 90% da composição química de cada amostra. O agregado siderúrgico apresentou aproximadamente 45% de óxido de cálcio e o solo 50% de sílica, já as misturas, aquela com maior porcentagem de solo apresentou valores de sílica maior (39%) e as com maior teor de agregado e teor igual ao solo apresentaram valores de óxido de cálcio mais representativos, 35% e 29%, respectivamente. Houve presença de outros compostos, entretanto, em menores quantidades. Abaixo são apresentados gráficos com os compostos majoritários presentes nas amostras analisadas neste estudo (Figura 41).

Figura 41 – Representação dos óxidos predominantes dos materiais.



Fonte: A autora (2023).

Della *et al.* (2005), ao realizar uma análise por FRX em escória de aço inoxidável proveniente de Minas Gerais, Brasil, observaram a presença predominante de CaO, com um teor de 36%. De acordo com Motz e Geiseler (2001), as escórias LD apresentam uma variação nos teores de CaO entre 42% e 55%. Rizzo (2006) indicou valores de CaO entre 23% e 47%. De maneira semelhante, Pagio *et al.* (2022) obtiveram resultados de composição parecida para duas escórias (granulada de alto-forno e alto-forno resfriada ao ar) utilizadas como agregado siderúrgico, onde CaO e SiO₂ eram os componentes predominantes.

Moura *et al.* (2019) analisaram uma escória de aciaria LD e constataram a presença de CaO (43,4%), Fe₂O₃ (26,4%) e SiO₂ (12,7%). Por outro lado, Dias *et al.* (2020) encontraram uma proporção maior de Fe₂O₃ (52,98%) em uma amostra de escória de aciaria BSSF, diferentemente deste estudo. No entanto, a composição dessa escória era basicamente constituída pelos mesmos óxidos já mencionados: CaO, Fe₂O₃ e SiO₂. A literatura internacional também relata que esses três óxidos são os principais constituintes da escória de aciaria LD produzida pelo processo BSSF (Li *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2022). Esses óxidos também foram identificados em outros materiais, como em Vasconcelos *et al.* (2019) que avaliaram o uso de misturas de cinzas de carvão mineral, solo e cal para aplicação em pavimentação, utilizando cinzas provenientes da termelétrica do Pecém, localizada em Ceará, Brasil. De acordo com os autores, entre as 32 amostras analisadas, os compostos mais presentes na cinza foram sílica, alumina, óxido de ferro III e óxido de cálcio. Ainda, de acordo com Vasconcelos *et al.* (2019),

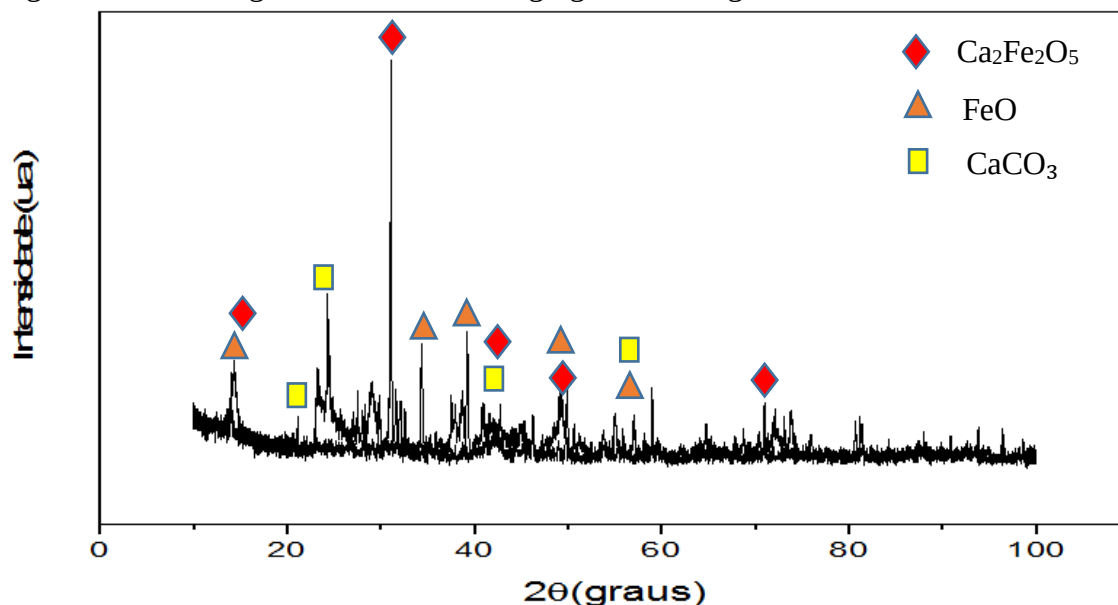
a presença de sílica e de alumina pode favorecer a ocorrência de reações pozolânicas entre os materiais. Podendo justificar o comportamento mecânico encontrado para as misturas.

Em relação aos óxidos observados na amostra de solo natural, sabe-se que solos lateríticos são caracterizados pela concentração de hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) na fração argila (Nogami e Villibor, 1995). A presença do óxido de alumínio (Al_2O_3) em valor relevante pode ser atribuída à adição do solo às misturas, dado que o teor desse composto no agregado siderúrgico é baixo, cerca de 2,8%.

Quanto à difração de Raio X (DRX), segundo Bleicher e Sasaki (2000), o espalhamento e a consequente difração de Raio X é um processo que pode ser analisado em diferentes níveis. Dessa forma, de acordo com Napolitano *et al.* (2007), através desse fenômeno é possível analisar os materiais a nível atômico e pode ser aplicada para explicar a localização dos máximos e mínimos na experiência de fenda única, até descrever padrões presentes em sólidos cristalinos quando expostos à radiação X.

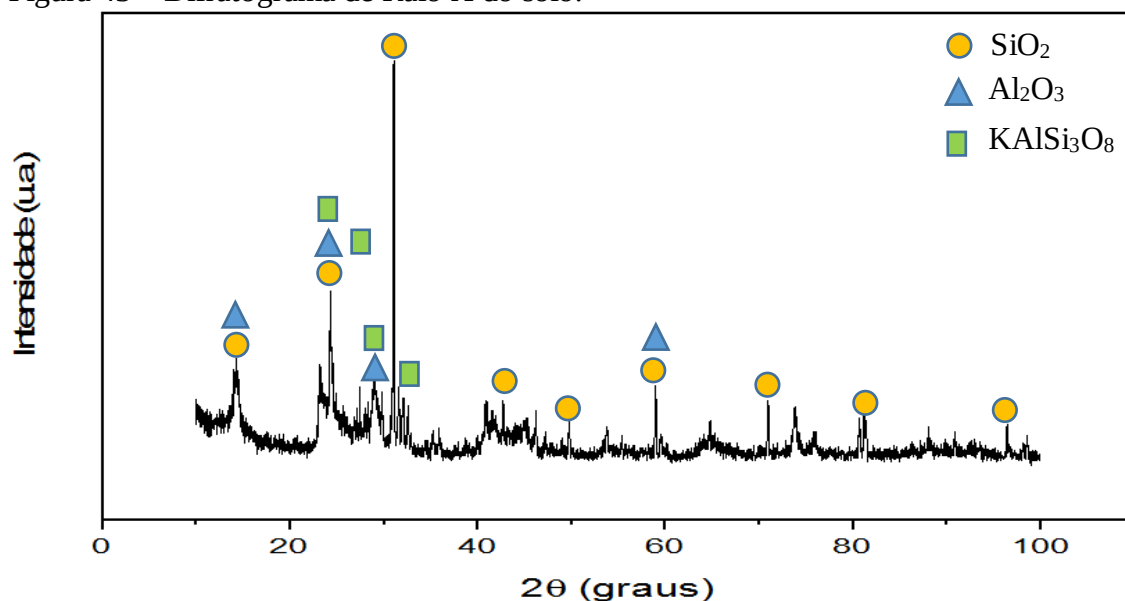
A análise de (DRX) foi feita de modo a complementar a análise de FRX e identificar as fases apresentadas pelos materiais ensaiados. O *software* empregado foi HighScore Plus versão 5.1.0, a partir de comprimento de onda de cobalto (Co). Pela análise do difratograma do agregado siderúrgico foi possível observar que os componentes principais são carbonato de cálcio (CaCO_3), wüstite ou óxido de ferro (FeO) e ferrita de cálcio ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$). Já o solo natural apresentou sílica ou quartzo (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e ortoclásio (KAlSi_3O_8). Essas fases também podem ser comparadas por outros autores como Pires *et al.* (2019), Ferreira *et al.* (2016) e Polese *et al.* (2006) para agregados siderúrgicos. Quanto ao solo, as fases de sílica e óxido de alumínio são confirmadas pelos resultados encontrados na análise de FRX. As Figuras 42 e 43 trazem os difratogramas do agregado siderúrgico e do solo natural.

Figura 42 – Difratoograma de Raio X do agregado siderúrgico.



Fonte: A autora (2023).

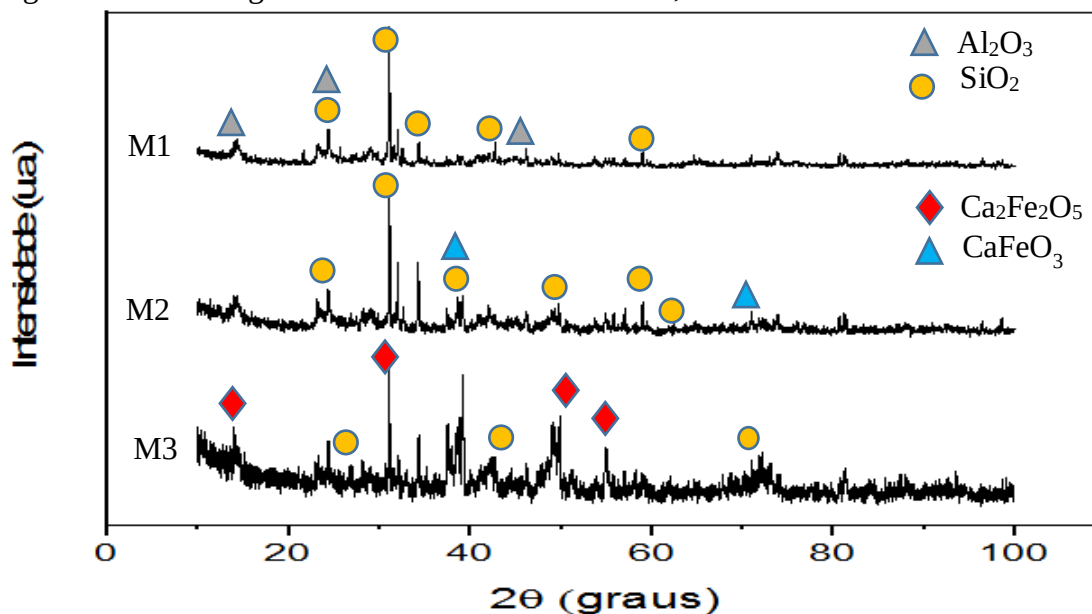
Figura 43 – Difratoograma de Raio X do solo.



Fonte: A autora (2023).

Para as misturas, através do DRX foram identificados picos correspondentes à fase cristalina de sílica (SiO_2) nas três misturas, óxido de alumínio (Al_2O_3) na mistura M1, picos de carbonato de ferro (CaFeO_3) na mistura M2 e ferrita de cálcio ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$) na mistura M3. Os maiores picos da mistura M1 e M2 são de sílica, reforçando os valores encontrados na análise de FRX. Os óxidos identificados na fluorescência de Raio X não aparecem nos difratogramas devido às baixas concentrações destes nas amostras. A Figura 44 apresenta os difratogramas das misturas M1 (SN275+AS25), M2 (SN50+AS50) e M3 (SN25+AS75).

Figura 44 – Difratograma de raio X das misturas M1, M2 e M3.



Fonte: A autora (2023).

4.3.2. Análise Ambiental

A partir de ensaios de lixiviação e solubilização, os materiais foram analisados seguindo a NBR 10.005 (ABNT, 2004b) e a NBR 10.006 (ABNT, 2004c), e classificados segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004a). É importante reforçar que devido ao alto custo dos ensaios foram analisadas apenas três amostras: o solo natural, o agregado siderúrgico e a mistura 02, composta por 50% de solo e 50% de agregado. A partir disto, os materiais foram classificados como sólidos segundo o estado físico. Já quanto às características de inflamabilidade, reatividade e corrosividade, estas não foram encontradas nas amostras. Quanto ao pH (1:1), a NBR 10.004 (2004a) considera como limites os valores menores que 2 ou maiores que 12,5. Entretanto, em relação à massa bruta, os materiais apresentaram valores fora dos exigidos, sendo o pH do solo de 6,32 (ácido), do agregado siderúrgico de 10,33 (básico) e da mistura M2 (SN50+AS50) de 9,44 (básico).

4.3.2.1. Ensaio de Lixiviação - NBR 10.005 (ABNT, 2004b)

De acordo com Machado (2013), prever o potencial de geração ácida e da lixiviação de metais são meios que podem ajudar no planejamento de métodos para proteção do meio ambiente. É através deste ensaio que o contaminante passa do estado sólido para o estado líquido através de mecanismo de difusão. Além de reações químicas que ocorrem devido ao contato dos compostos, presentes no resíduo sólido, com a solução lixiviante, permitindo

mensurar quais as quantidades de componentes poderão ser transferidas para o meio ambiente e o respectivo impacto ambiental (Rosa, 2001).

Na Tabela 21 podem ser observados os parâmetros inorgânicos encontrados para os materiais deste estudo e um paralelo com resultados obtidos por outros autores que avaliaram escórias de aciaria através de ensaios de lixiviação. Cesar (2008) avaliou uma escória de aciaria elétrica de Piracicaba, estado de São Paulo; Fernandes (2010) avaliou a escória de aciaria LD do estado de Minas Gerais; Barbosa (2013) realizou ensaio de lixiviação em cinco amostras de escórias de aciaria, tanto LD como escória de aciaria elétrica. Ao analisar a Tabela 22 é possível verificar que, assim como os autores mencionados, nenhum parâmetro lixiviado ultrapassou os limites máximos admissíveis apresentados no Anexo F da NBR 10.004 (ABNT, 2004a).

Tabela 22 - Parâmetros Inorgânicos obtidos no ensaio de lixiviação comparativamente a outros estudos com AS.

Parâmetro	Este estudo				Cesar (2008)	Fernandes (2010)	Barbosa (2013)			VMP*
	Unid.	AS	SN	M2 (SN50+AS50)	EAE-SP	LD-MG	EAF-BA	EAF-RS	LD-MG	
Arsênio (As)	mg/L	<LQ	< LQ	<LQ	<0,05	<0,01	<LQ	<LQ	<LQ	1,0
Bário (Ba)	mg/L	6,6	4,83	6,2	0,12	0,04	3,42	1,66	0,30	70,0
Cádmio (Cd)	mg/L	0,07	0,005	0,004	<0,05	<0,001	<LQ	<LQ	<LQ	0,5
Chumbo (Pb)	mg/L	0,27	0,1	0,02	<0,05	<0,01	<LQ	<LQ	<LQ	1,0
Cromo total (Cr)	mg/L	0,006	< LQ	<LQ	<0,05	<0,01	<LQ	<LQ	<LQ	5,0
Mercúrio (Hg)	mg/L	0,002	0,002	0,002	<0,05	<0,0002	-	-	-	0,1
Selênio (Se)	mg/L	0,07	<LQ	0,02	<0,05	<0,01	-	-	-	1,0

Fonte: A autora (2023).

LQ: Limites de Quantificação da legislação citada, NBR 10.004 (ABNT, 2004a).

*VMP: Valor máximo permitido.

Os parâmetros de pesticidas presentes no Anexo F da NBR 10.004 (ABNT, 2004a) como clordano, endrin, lindano (gama HCH), metoxicloro também foram avaliados. Entretanto todos apresentaram valores menores que os limites quantificáveis. Dessa forma, é possível classificar o solo, o agregado e a mistura M2 (SN50+AS50) como materiais não tóxicos e como resíduo sólido classe-II - Não Perigoso de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004a). Se tratando de outros tipos de resíduos, Moraes *et al.* (2022), ao realizarem análise ambiental de pavimentos asfálticos fresados (RAP em inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*), verificaram que o zinco (Zn) e o cádmio (Cd) foram os elementos que apresentaram maior concentração, mesmo dentro dos limites permitidos, eles atribuíram o fato à queima de óleos e graxas

presentes nos lubrificantes usados em veículos, pelo desgaste das pastilhas de freio ou por fazer parte do betume usado em pavimentos.

Segundo Periago *et al.* (1997), os hidrocarbonetos aromáticos especialmente benzeno, tolueno, etilbenzeno e os isômeros do xileno (m, o, p), representados pelo acrônimo BTEX, estão no grupo de substâncias de compõem a gasolina. De acordo com a Portaria n.º 518/2004 do Ministério da Saúde (2004) a água potável deve estar em conformidade com os valores máximos permitidos (VMP) para as substâncias químicas que representam risco para a saúde como os hidrocarbonetos aromáticos. Dessa forma, quantificou-se a presença desses contaminantes nas amostras em estudo e os valores são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Outros orgânicos avaliados no ensaio de lixiviação.

Parâmetro	Unid.	AS	SN	M2 (SN50+ AS50)	LQ	VMP
Benzeno	mg/L	<LQ	< LQ	-	0,0015	0,5
Tolueno	mg/L	0,0085	< LQ	-	0,0012	0,17
Etilbenzeno	mg/L	0,0784	0,0031	-	0,0012	0,2
m,o,p-xilenos	mg/L	0,4767	0,0156	-	0,0009	0,3

Fonte: A autora (2023).

4.3.2.2. Ensaio de Solubilização

Quanto ao ensaio de solubilização, realizou-se com objetivo de identificar a presença de metais pesados no agregado siderúrgico e no solo. Enquanto para a mistura M2 (SN50+AS50), realizou-se de modo a verificar se os materiais permanecem inertes quando misturados. Os dados de preparo do ensaio são teor de umidade (%) e pH a 25°C que foram, respectivamente, de 0,63% e 8,94% para o agregado, de 1,55% e 6,58% para o solo natural e de 0,97% e 7,97% para a mistura 02. Na Tabela 24 são apresentados os resultados do ensaio de solubilização para parâmetros inorgânicos das amostras.

Os parâmetros que apresentaram valores superiores aos limites máximos contidos na NBR 10.004 - Anexo G são mostrados na Tabela 24, além de um comparativo com dados encontrados para escórias analisadas na literatura. Partindo dessa análise, é possível observar que os três materiais apresentaram um ou mais de seus constituintes, concentrações superiores aos valores fixados na NBR 10.004 - Anexo G.

Tabela 24 – Parâmetros de solubilização das amostras.

Parâmetro	Unid.	AS	SN	M2 (SN50+AS50)	VMP
Alumínio (Al)	mg/L	0,3	63,48	15,02	0,2
Arsênio (As)	mg/L	<LQ	< LQ	<LQ	0,01
Bário (Ba)	mg/L	0,2	1,23	0,2	0,7
Cádmio (Cd)	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ	0,005
Chumbo (Pb)	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ	0,01
Cobre (Cu)	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ	2
Cromo total (Cr)	mg/L	0,067	<LQ	<LQ	0,05
Ferro (Fe)	mg/L	0,59	0,27	0,57	0,3
Manganês (Mn)	mg/L	0,08	2,24	0,027	0,1
Mercúrio (Hg)	mg/L	0,0047	0,0018	0,003	0,001
Selênio (Se)	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ	0,1
Sódio (Na)	mg/L	4,58	20,58	9,05	200
Zinco (Zn)	mg/L	1,14	<LQ	0,52	5
Aldrin e Dieldrin	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ	3×10^{-5}
Clordanos (todos os isômeros)	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ	2×10^{-4}
DDT (todos os isômeros)	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ	2×10^{-3}
Endrin	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ	6×10^{-4}
Heptacloro e seu epóxido	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ	3×10^{-5}
Lindano (-bhc)	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ	2×10^{-3}
Metoxicloro	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ	0,02
Cloreto	mg/L	4,98	6,47	3,5	250
Fluoreto	mg/L	<LQ	<LQ	<LQ	250
Nitrato	mg/L	3	3,01	4,7	10
Sulfato	mg/L	0,72	8	14,81	250

Fonte: A autora (2023).

O agregado siderúrgico apresentou os teores de alumínio (Al), cromo total (Cr), ferro (Fe) e mercúrio (Hg) superiores aos valores padrões. Para o solo natural os parâmetros alumínio (Al), bário (Ba), manganês (Mn) e mercúrio (Hg) foram os que ultrapassaram os VMP. Já para a mistura M2 (SN50+AS50) foram os parâmetros alumínio (Al), ferro (Fe) e mercúrio (Hg) que excederam os limites máximos de potabilidade de água exigidos em norma.

Em contrapartida, vale chamar atenção para as concentrações de alguns elementos presentes nos materiais que foram bem abaixo dos valores máximos permitidos (VMP) como o sódio (Na), o cloreto, fluoreto, nitrato, sulfato e zinco (Zn), excetuando aqueles que não foram detectados como cádmio, cobre, chumbo, selênio, clordanos, DDT (Dicloro-Difenil-Tricloroetano), endrin, heptacloro e seu epóxido, lindano e metoxicloro. Os valores em negrito na Tabela 25 foram os parâmetros que excederam os VMPs.

Tabela 25 – Parâmetros Inorgânicos e VPMs verificados no ensaio de solubilização.

Parâmetro	Unid.	AS	SN	M2 (SN50+ AS50)	Cesar (2008)	Fernandes (2010)	Barbosa (2013)			VMP
					EAE- SP	LD	EAF- BA	EAF- RS	LD- MG	
Alumínio (Al)	mg/L	0,3	63,48	15,02	0,05	<0,05	0,523	<LQ	0,138	0,200
Bário (Ba)	mg/L	0,2	1,23	0,2	0,02	0,05	0,526	0,326	0,690	0,700
Cromo total (Cr)	mg/L	0,067	< LQ	<LQ	<0,05	<0,01	<LQ	<LQ	<LQ	0,050
Ferro (Fe)	mg/L	0,59	0,27	0,57	0,15	<0,1	<LQ	<LQ	<LQ	0,300
Manganês (Mn)	mg/L	0,08	2,24	0,027	<0,05	<0,05	0,091	<LQ	<LQ	0,100
Mercurio (Hg)	mg/L	0,0047	0,0018	0,003	<0,001	<0,0002	-	-	-	0,001

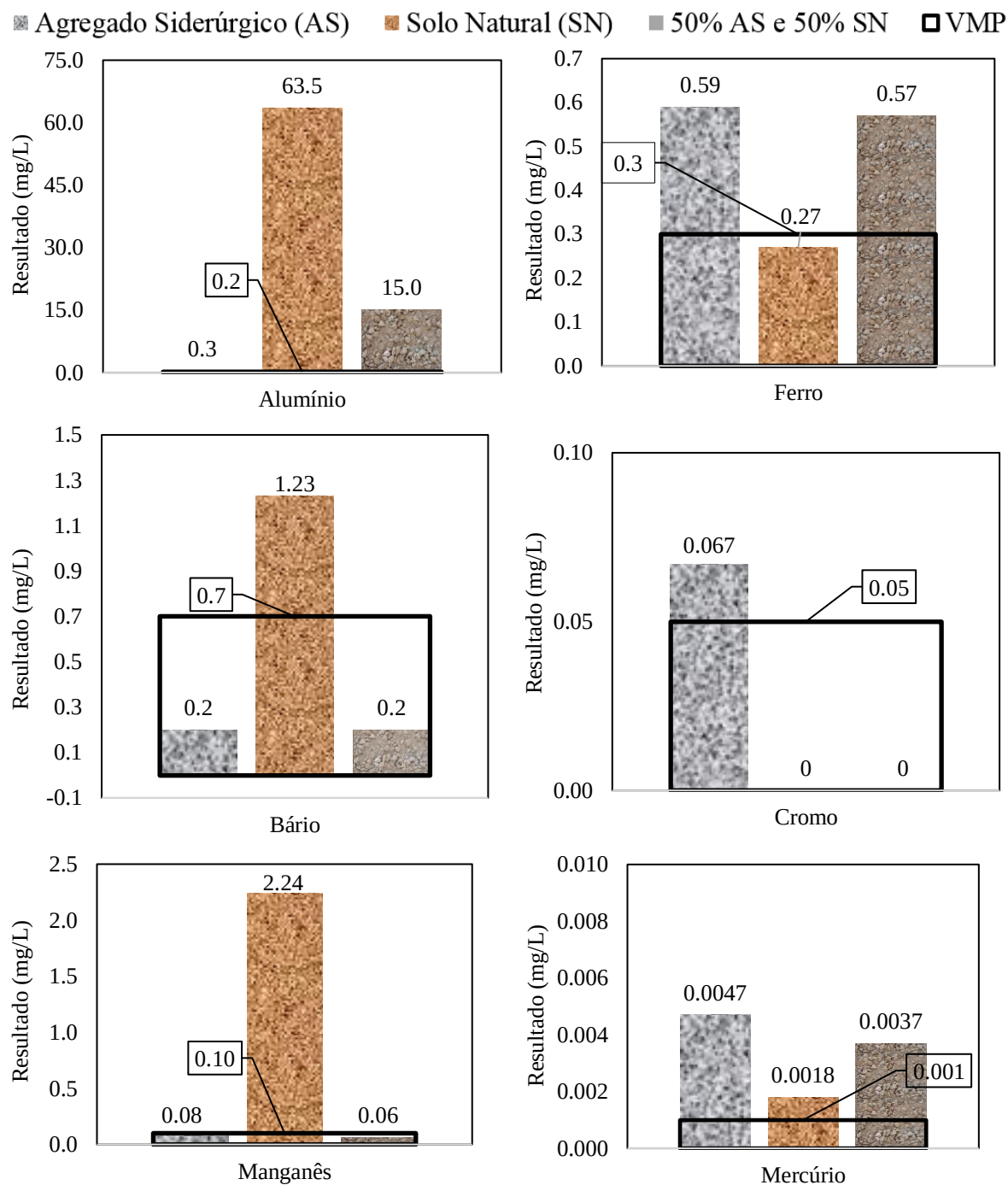
Fonte: A autora (2023).

Ao relacionar os valores encontrados neste estudo com a literatura, é possível observar que em sua grande maioria, as escórias de aciaria são classificadas como classe II - resíduo não perigoso e como classe II-A resíduo não inerte (Della *et al.*, 2005; Cesar, 2008; Fernandes, 2010; Barbosa, 2013).

Ao analisar o comportamento dos componentes químicos da mistura, observa-se que o acréscimo do agregado ao solo favoreceu a redução de bário (Ba), manganês (Mn) e de mercúrio (Hg) presentes no solo em concentrações mais elevadas. O processo de misturar os materiais também provocou a não detecção (< LQ) de cromo total (Cr). Entretanto o mesmo não ocorreu com o alumínio (Al) e o ferro (Fe) que apresentaram aumento de concentração em relação ao comportamento do agregado siderúrgico quando adicionado ao solo.

Na Figura 45, são apresentados os elementos que excedem os limites estabelecidos pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), bem como os valores máximos permitidos (VMP), sendo: alumínio (Al), ferro (Fe), bário (Ba), cromo (Cr), manganês (Mn) e mercúrio (Hg).

Figura 45 – Parâmetros inorgânicos obtidos pelo ensaio de solubilização que apresentaram valores excedentes.



Fonte: A autora (2023).

Verifica-se que tanto o solo natural quanto a mistura M2 (SN50+AS50) apresentaram valores elevados de alumínio, ambos acima dos limites máximos permitidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004a) de 0,2 mg/L. A presença significativa de alumínio nessas amostras pode ser atribuída à composição do solo natural, que como já constatado, se trata de um solo arenoso com comportamento laterítico (LA') conforme classificação MCT (Nogami & Villibor, 1995),

corroborada pelos resultados de FRX que demonstram a presença de 31% de óxido de alumínio e de 11% de óxido de ferro na composição do solo natural. Solos lateríticos são caracterizados por apresentarem mineralogia com elevada concentração de óxidos de ferro e alumínio. Por outro lado, o agregado siderúrgico apresentou um valor de alumínio (0,30 mg/L) levemente acima do limite permitido. A composição química do solo, com presença de alumina (Al_2O_3) e hematita (Fe_2O_3), pode ter contribuído para as altas concentração de alumínio e ferro detectadas durante o ensaio de solubilização da mistura 02 (SN50+AS50) e do solo.

O parâmetro ferro excedeu o limite para o agregado e para a mistura 02 (SN50+AS50), enquanto o bário excedeu apenas para o solo natural. O cromo excedeu o limite apenas no agregado siderúrgico e o manganês excedeu o limite apenas no solo natural. Rosa *et al.* (2002) destaca que existe uma relação inversamente proporcional da granulometria com a solubilidade de cromo total (Cr) em escória elétrica, ou seja, quanto maior a granulometria da escória, menor a concentração de cromo total observada na amostra.

Quanto aos malefícios de teores elevados dos elementos observados, Muniz e Oliveira-Filho (2006) afirmam que estudos clínicos e epidemiológicos em adultos mostraram que a dose oral letal de cromo foi de 50 a 70 mg/kg de peso do corpo para cromatos e que o cromo hexavalente (forma mais tóxica do cromo) causa irritação no trato respiratório, ulceração e perfuração do septo nasal. O elemento manganês exerce papel importante na regulação metabólica dos seres humanos, mas em excesso pode causar neurotoxicidade ou toxicidade neurológica (Mota *et al.*, 2022).

Quanto aos mecanismos de toxicidade do bário ainda não são esclarecidos. Entretanto, os efeitos dos compostos de bário que são solúveis em água ou no estômago é a hipocalcemia, que pode reduzir os níveis de potássio e gerar taquicardia ventricular, hipertensão ou hipotensão arterial, fraqueza muscular e paralisia (Savazzi & Oliveira, 2011). Ferreira *et al.* (2008) afirmam que o alumínio (Al) é liberado no meio ambiente por processos naturais de erosão do solo e ingerido através da alimentação e da água. Segundo os referidos autores, a doença de Alzheimer tem relação direta com a exposição excessiva a esse elemento. Sobre o mercúrio, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) recomenda que o nível de mercúrio inorgânico não deve ultrapassar 144 partes por trilhão (ppt) e estabelece o limite máximo para a concentração em água potável que é de 2 ppb ou 2 $\mu\text{g/L}$. Concentrações acima desse limite podem representar riscos para a vida aquática e para a saúde humana, uma vez que o mercúrio pode se acumular na cadeia alimentar, especialmente em peixes.

A escória de aciaria é um subproduto da produção de aço que pode conter vários metais pesados, incluindo o mercúrio. Durante o processo de fabricação do aço, o mercúrio presente

nos materiais de entrada pode ser transferido para a escória. Quando a escória de aciaria é utilizada em misturas ou aplicada em solos, pode ocorrer a liberação gradual de metais pesados, devido a processos de dissolução e lixiviação.

Esses resultados indicam que a formação e origem dos resíduos influenciam nos elementos excedentes identificados através do ensaio de solubilização. Para a NBR 10.004 (ABNT, 2004a), resíduos que, ao entrarem em contato com água destilada ou deionizada, não apresentarem nenhuma solubilização de seus constituintes em concentrações superiores aos limites estabelecidos para a potabilidade da água, excluindo-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor de acordo com o Anexo G, são classificados como resíduos classe II B - inertes. Por outro lado, resíduos que apresentem pelo menos um parâmetro com concentrações acima dos limites de potabilidade ou que não se enquadrem como resíduos classe I - perigosos são classificados como resíduos classe II A - não inertes.

Dessa forma, é possível classificar o agregado siderúrgico (escória de aciaria pelo método BSSF), o solo e a mistura M2 (SN50+AS50), como resíduos classe II A – resíduo não inerte. Mesmo com concentrações superiores aos limites admissíveis, Lopes *et al.* (2015) afirmam que essa classificação de resíduos não inviabiliza sua utilização em pavimentação, desde que o ensaio de lixiviação, que simula a infiltração da água da chuva no solo, apresente os parâmetros analisados dentro dos limites admissíveis em norma, como é o caso dos materiais analisados neste estudo.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5.1. Principais Conclusões

Diante do que foi exposto e de forma geral é possível concluir que o agregado siderúrgico BSSF é viável e pode ser aplicado em camadas de pavimento rodoviário. A proporção de 50% de agregado siderúrgico e 50% de solo foi a mistura que apresentou melhor enquadramento quanto aos critérios normativos analisados. Em segundo lugar, a mistura com 75% de agregado siderúrgico e 25% de solo atendeu aos parâmetros de três das cinco normas analisadas. Dessa maneira, a amostra M2 (SN50+AS50) pode ser empregada em camadas de base e sub-base de pavimentos e a amostra M3(SN25+AS75) também a depender da norma utilizada. Outras conclusões obtidas no estudo realizado e respondendo aos objetivos específicos são:

5.1.1. Comparar química, mecânica e fisicamente a incorporação de diferentes percentuais de agregado siderúrgico (AS) pelo processo BSSF a um solo usualmente aplicado na pavimentação do Ceará.

- A granulometria do solo natural (SN) e do agregado siderúrgico (AS) apresentaram a fração areia como fração dominante. O solo foi classificado como laterítico e apresentou ISC de 26% e com módulo de resiliência (MR) de 543 MPa. Mostrando que solos tropicais lateríticos não devem ser classificados pelas classificações tradicionais, dado que estes materiais possuem elevado potencial para uso em pavimentação.
- A elevada densidade real dos grãos do AS, 3,651 é justificada pelo material de origem, no caso o ferro, compondo 34% do material, constatado nas análises de fluorescência de raio X.
- A adição do AS proporcionou aumento do peso específico aparente seco máximo relacionado direto a redução da umidade ótima e indiretamente com o aumento da porcentagem do agregado nas misturas. O solo natural apresentou o menor valor de $MEAS_{máx}$ de 1,923 g/cm³ na energia intermediária, atingindo o maior valor de 2,569 g/cm³ na mistura M3 (SN25+AS75). Entretanto, não foi possível a obtenção da umidade ótima do agregado siderúrgico através da compactação, pois este apresentou drenagem e ausência de coesão para desmolde, impossibilitando também a execução de outros ensaios mecânicos, como MR e DP que são realizados sem confinamento.

- A amostra estabilizada com maior porcentagem de AS e o agregado apresentaram maior permeabilidade em decorrência da alta taxa de vazios ocasionado pela presença do AS. Já o solo natural e as amostras com teor mais baixo de AS se tornaram menos permeáveis, consequentemente menos número de vazios.
- A resistência à abrasão Los Angeles realizada para o agregado (19%) mostrou que esse material é resistente ao desgaste e atende aos limites exigidos em norma regulamentadora para materiais em pavimentação.
- A capacidade de suporte das misturas foi crescente com o aumento do teor de agregado siderúrgico e da energia de compactação. A adição de 75% de agregado ao solo, na energia intermediária, resultou em um ISC de 93% e na energia modificada um ISC de 109% habilitando as duas misturas para uso em camadas de base. As misturas com 50% de escória, nas energias intermediária e modificada, representaram um ISC de 68% e 75%, respectivamente, possibilitando a utilização em camadas de base com $N \leq 5 \times 10^6$ (baixo volume de tráfego). Além disso, o incremento de apenas 25% de agregado siderúrgico possibilitou o emprego dessas misturas em camadas de sub-base. Já o solo natural sem estabilização mostrou empregabilidade em camada de sub-base na energia modificada e em reforço de subleito com aplicação da energia intermediária. As reduções das expansões verificadas foram influenciadas pelo aumento do teor de agregado e pelo aumento da energia de compactação, chegando a atingir valores nulos na energia modificada.
- Quanto ao comportamento resiliente das amostras, o modelo composto, que considera tensão desvio e tensão confinante, foi o que apresentou melhores valores de R^2 , e os valores de $MR_{\text{médio}}$ medidos foram diretamente influenciados pelo aumento da adição de agregado e da energia de compactação. A mistura que apresentou melhor resultado de quanto ao MR foi a amostra M2 (SN50+AS50), cujo valor foi de 931 MPa na energia modificada. Entretanto, em comparação ao valor de ISC, o melhor resultado foi obtido com a amostra M3(SN25+AS75) na energia intermediária, com 109% de ISC. Isso mostra limitações do ensaio de ISC em reproduzir em laboratório condições similares à realidade de campo. Dado que a mistura com menor porcentagem de finos, maior número de vazios (percebido no ensaio de permeabilidade) e com baixa coesão apresentou o melhor resultado, em decorrência do confinamento proporcionado pelo cilindro metálico. Já o ensaio de módulo de resiliência, o material por ser submetido à uma tensão confinante controlada, com maior similaridade à realidade dos pavimentos

em campo, com auxílio de membrana elástica e não de cilindro metálico, parece ser o que melhor simula o cenário encontrado em campo. Diante das normas apresentadas neste estudo, que parametriza os valores de MR para uso dos agregados siderúrgicos em camadas granulares de estradas, é possível afirmar que todas as misturas e o solo natural atendem aos limites exigidos.

- Quanto à análise da deformação permanente, a aplicação do modelo proposto por Dawson e Wellner, citado por Werkmeister (2003) permitiu observar o comportamento dos materiais quanto a tendência à deformação permanente através da análise de taxa de acréscimo de deformação permanente. Observou-se que o solo apresentou o mesmo comportamento, tipo A, em todos os pares de tensões. E as misturas mostraram dois tipos de comportamento, tipo A e tipo AB. Todos os materiais, nos pares de tensões empregados, entraram em acomodamento plástico ou *shakedown*.
- Quanto às análises de composição química dos materiais, os ensaios de fluorescência de Raio X permitiram identificar a presença majoritária do óxido de ferro III ou hematita (Fe_2O_3), do óxido de cálcio (CaO), do óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3) e do dióxido de silício ou sílica (SiO_2) representando em torno de 90% da composição química de cada amostra. Podendo explicar o aumento de resistência a partir do acréscimo do agregado siderúrgico ao solo, pois a predominância desses óxidos proporcionou também uma estabilização química dos solos. E a análise por difração de raio X contribuiu para identificação das fases dos materiais, como a presença de ferro, alumínio, sílica e cálcio.

5.1.2. Avaliar o agregado siderúrgico oriundo do processo BSSF, solo e misturas solo-agregado siderúrgico a partir de critérios normativos com foco em subcamadas de pavimentos.

- Pelas classificações tradicionais e pelas normas rodoviárias, o solo na forma natural não poderia ser aplicado em camadas nobres (base e sub-base) de pavimentos, devido ao alto índice de plasticidade, baixa taxa de equivalente de areia e baixo valor de suporte.
- O não atendimento da granulometria, para a mistura M1 e M3 foi o principal parâmetro que tornou essas misturas não aplicáveis em camadas de base e sub-base, observado em quase todas as normas avaliadas.
- Entre as amostras estabilizadas, a amostra M2 (SN50+AS50) foi a que melhor se enquadrou quanto aos critérios físicos e mecânicos exigidos nas normas de

pavimentação, citadas neste estudo, para materiais estabilizados granulometricamente em camada de base e sub-base. A mistura M3 também poderia ser aplicada em camadas de base e sub-base. Já a mistura M1, o solo e o agregado não poderiam ser utilizados para camadas de base e sub-base rodoviária, dado que não atenderam à todos os critérios exigidos em norma, principalmente de granulometria.

- A escória de aciaria pelo processo BSSF pode ser empregada como agregado em misturas para aplicação em camadas de base e sub-base rodoviárias estabilizadas granulometricamente.

5.1.3. Avaliar ambientalmente as amostras de solo, agregado e as misturas solo-agregado siderúrgico por meio de classificação de resíduos sólidos.

- Quanto às análises ambientais, os resultados dos ensaios de lixiviação não houveram elementos químicos excedentes aos limites de norma, conduzindo à classificação dos materiais como resíduo classe II - Não Perigoso.
- Os resultados dos ensaios de solubilização mostraram que todos os materiais apresentaram algum elemento químico em concentração maior que os limites admissíveis nacionalmente, mostrando que a formação e origem dos materiais influenciam para que esses parâmetros ultrapassem os valores admissíveis em norma e resultando em classificação dos materiais como classe IIA (resíduo não inerte).
- O agregado siderúrgico (escória de aciaria pelo método BSSF), o solo e a mistura M2 (SN50+AS50) foram classificados como resíduos Classe II A – resíduo não inerte, pois apresentaram algum parâmetro acima dos limites permissíveis em norma. Entretanto, essa classificação não os torna inviáveis para uso em pavimentação, pois são resíduos não perigosos e os elementos excederam apenas no ensaio de solubilização e não de lixiviação que simula o carreamento ocasionado por precipitação sobre os materiais.
- Por fim, a avaliação técnica e ambiental do material realizada neste estudo indicou potencial de emprego do agregado siderúrgico BSSF na estabilização de solo com fins de aplicação em camadas granulares de pavimentos. Esta utilização pode contribuir com a redução de problemas relativos aos depósitos de resíduos, ao consumo dos materiais naturais não renováveis inerentes ao setor da construção civil e rodoviária, e consequentemente para a minimização de impactos no meio ambiente.

5.2. Sugestões para Estudos Futuros

Objetivando complementar os resultados encontrados nesta pesquisa e ampliar o conhecimento do comportamento da escória de aciaria obtida pelo processo BSSF para uso em camadas de pavimentos é sugerido para estudos futuros:

- a) Ampliar os ensaios com outras porcentagens de misturas e com outros tipos de solos do Ceará com intuito de verificar o comportamento mecânico das misturas;
- b) Avaliar o comportamento da melhor mistura aplicada em campo através de trecho experimental.
- c) Realizar correção granulométrica do agregado siderúrgico e verificar a influência desse beneficiamento nas propriedades mecânicas do agregado, para que seja possível compactar, e das misturas;
- d) Realizar análise do ciclo de vida das misturas que apresentaram potencial para aplicação em camadas de pavimentos rodoviários;
- e) Executar ensaios que mostrem a capacidade dos materiais naturais ou fabricados, como cal ou cimento, por exemplo, de encapsular o agregado siderúrgico, evitando lixiviação de metais pesados.
- f) Realizar análise mecanística através de simulações de dimensionamento de estruturas de pavimentos.
- g) Elaborar norma regulamentadora para emprego da escória de aciaria beneficiada pelo processo *Baosteel's Slag Short Flow* para uso em camadas de pavimentos rodoviários.

REFERÊNCIAS

AASHTO. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures**. 2004.

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials – M 145. **Classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes, United States of America**, 1973

ABNT – Associação Brasileira de Normas. ABNT NBR 10004. **Resíduos Sólidos - Classificação**. 2002.

_____. NBR 10005. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. 2004.

_____. NBR 10006. **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. 2004.

_____. NBR 14545. **Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável**. 2021.

_____. NBR 13292. **Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de Ensaio**. 2021.

_____. NBR 11804. **Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente: especificação**. 1991.

_____. NBR 14656. **Cimento Portland e matérias primas: análise química por espectrometria de Raios X: método de ensaio**. 2001.

_____. NBR16364. **Execução de sub-base e base estabilizadas granulometricamente com agregado siderúrgico para pavimentação rodoviária – Procedimento**. 2015.

ALTUN, I. A. & YILMAZ, İ. Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement. In: **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1247-1249, 2002.

AMANCIO, F. A.; LIMA, D. A.; DIAS, A. R. D. O.; MESQUITA, E. F. T.; CABRAL, A. E. B. Propriedades mecânicas de argamassas com substituição da areia natural por escória de aciaria BSSF (*Baosteel's Slag Short Flow*). In: **Revista Matéria** - Rio de Janeiro - 25. 2020.

AMANCIO, F. A., DIAS, A. R. D. O., LIMA, D. A., & CABRAL, A. E. B. Estudo do comportamento no estado fresco e endurecido de argamassa com escória de aciaria BSSF. In: **Revista Matéria** (Rio de Janeiro), 26. 2021.

American Society for Testing and Materials, Standard Specification D4792-00, **Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions**, Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.03, West Conshohocken, PA, 2001.

ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S.; GANDRA, G. T. **A ascensão das mini-mills no cenário siderúrgico mundial**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 12, p. [51]-76, set. 2000.

ARRIVABENE, L. F.; PINTO, L. A. B. J.; OLIVEIRA, J. R. D.; TENÓRIO, J. A. S.; ESPINOSA, D. C. R. Viabilidade técnica da fabricação de cimento com mistura de escória de aciaria LD e resíduo de granito. In: **Revista Escola de Minas**, 65, 241-246. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO - ABM. **Reciclagem dos resíduos sólidos da produção de aço**. Disponível em: <https://www.abmbrasil.com.br/por/noticia/csp-recicla-99-3-dos-residuos-solidos-da-sua-producao-do-aco>. Acesso em: 27 dez. 2022.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. 1ª Edição, São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2007.

BALTAZAR, R. P. **Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação**. 2001. p.93. Tese de doutorado. UFV. 2001.

BARBOSA, M. R. **Caracterização Geoambiental da Escória de Aciaria de Cinco Estados Brasileiros**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UFOP. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-Minas Gerais. 158p. 2013.

BARROS, L. M.; LIMA, C. D. A.; NASCIMENTO, L. A. H.; MOTTA, L. M. G.; ARAGÃO, F. T. S. Aspectos dos ensaios de deformação permanente e a perspectiva brasileira para utilização no dimensionamento de pavimentos asfálticos. In: **33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**. p. 1156-1167. 2019.

BARROSO, S. H. D. A. **Estudos dos solos da região metropolitana de Fortaleza para aplicação na engenharia rodoviária**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. 2002.

BASTOS, L. A. D. C. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária**. 2013. 113f. Dissertação de Mestrado. UFOP. 2013.

BENITTEZ, L. H.; NETO, J. D. C. M.; FERREIRA, F. G. S.; CHOTOLI, F. F.; DOS SANTOS, R. F. C.; GUILGE, M. S. Bloco de concreto com incorporação de escória de aciaria BSSF: um estudo para substituição de agregados naturais. In: **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, v. 59, n. 3, p. 785-801, set. 2021.

BICALHO, K.; OLIVEIRA, F.; RAPOSO, C.; CASTELO, R.; SILVA, M. Avaliação de três métodos de determinação da expansão de escórias de aciaria brasileiras para pavimentação. In: **10 Congresso Nacional de Geotecnia**. Sociedade Portuguesa de Geotecnia (Vol. 3, pp. 777-786). 2006.

BLEICHER, L.; SASAKI, J. M. **Introdução à difração de raios-x em cristais**. Universidade Federal do Ceará, 1-20. 2000.

BOLDRINI, B. & PACHECO, R. F. R. Estudo do comportamento da escória de aciaria tipo LD em base de pavimentos urbanos. In: **Revista Ifes Ciência**, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2022.

BRASIL, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução 313, de 29 de outubro de 2002**. Dispõe sobre o inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Brasília, DF, 2002.

BS EN 13286-7. **Unbound and hydraulically bound mixtures—cyclic load triaxial test for Unbound Mixtures British Standard Institute**, UK. 2004.

BUZIN, P. J. W. K. D. (2009). **Desenvolvimento de briquetes autorredutores a partir de carepas de processamento siderúrgico para utilização em forno elétrico a arco**. Dissertação de mestrado. UFRGS. 138 p.

CABRAL, W. S.; BARROSO, S. H. D. A.; SILVA, S. D. A. T. Consideração da deformação permanente de solos ocorridos na região nordeste na análise mecanística-empírica de pavimentos. **Matéria** (Rio de Janeiro), 26. 2022.

CANAL, R. T.; DO ROSÁRIO, C. V. S.; PIRES, P. J. M. Estudo de Viabilidade do Uso de Escória de Aciaria e Resíduo de Rochas Ornamentais Como Lastro Ferroviário. In: **Brazilian Journal of Development**, 6(5), 23335-23352. 2020.

CAPUTO, H. P.; **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. In: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 7ed., v1, rio de janeiro. 2017.

CARNEIRO, A. P., BURGOS, P. C., & ALBERTE, E. P. V. (2001). **Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos**. Projeto Entulho Bom. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, 188-227.

CAUDURO, F. **Avaliação experimental de procedimentos de lixiviação de resíduos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. p.97. 2003.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Siderurgia no Brasil 2010-2025**; Subsídios para tomada de decisão, Brasília, 2010.

CHESNER, W. H.; COLLINS, R. J.; MACKAY, M. H.; EMERY, J. User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction (No. FHWA-RD-97-148, Guideline Manual, Rept No. 480017). In: **Recycled Materials Resource Center**. 2002.

CHINA BAOWU STEEL GROUP CORPORATION LIMITED. **Ability details BSSF**. Disponível em: <http://rd.baosteel.com/zypt/en/ability/see/abilityDetailsBSSF/2/4c2fba8dd97746f2a990c44e19857106>. Acesso em: 08 de nov. 2022.

COELHO, S. H. M.; SILVA, G. F. M.; MOIZINHO, J. C. Comportamento de Concreto Asfáltico à Quente Usando Brita Basáltica do Estado de Roraima. In: **Congresso Geocentro**, Brasília-DF. 2019.

COMPANHIA SIDERÚRGICA DO PECÉM. **Produtos e co-produtos**. Disponível em: <https://www.cspecem.com/pt-br/produtos/co-produtos/>. Acesso em: 13 out. 2022.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução 313/2002**.

Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res31302.html>.

Acesso em: fev. 2023.

COSTA, K. A. **Estudo exploratório do processo de lixiviação controlada da escória de aciaria visando emprego em pavimentos**. 2014. 140f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. 2014.

COSTA, S. N. & SANTOS, R. O. G. Utilização da escória de aciaria em combinação com solo para uso em camadas de pavimentação rodoviária. In: **Engineering Sciences**, 8(1), 57-66. 2020.

DAYRELL, F. D. O.; FERNANDES, G. Misturas de Solos Naturais com Escória de Aciaria LD para Melhoria da Capacidade de Suporte em Vias Ferroviárias. In: **Revista Fundações e Obras Geotécnicas**, v. 4, p. 64-71, 2014.

DELLA, V. P.; JUNKES, J. A.; KUHN, I.; HIELLA, H. G.; HOTZA, D. Utilização do subproduto da recuperação metálica de escórias de aços inoxidáveis na síntese de pigmentos cerâmicos; caracterização da matéria-prima. In: **Cerâmica**, 51, 111-116. 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER - ME 054: **Equivalente de Areia**. Rio de Janeiro, 1997. 10 p.

_____ ME-041 **Solos - Preparação de Amostras para ensaios de caracterização** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

_____ ME-172 **Índice de Suporte Califórnia de Solos Utilizando Amostras não Trabalhadas** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 2016.

_____ ME-051 **Análise Granulométrica por Sedimentação** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

_____ ME-080 **Análise Granulométrica por Peneiramento** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

_____ ME-082 **Solos - Determinação do Limite de Plasticidade** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

_____ ME-093 **Solos - Determinação de Densidade Real** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro – RJ, 1994.

_____ ME-122 **Determinação do Limite de Liquidez de Solos** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

_____ ME-162 **Solos - Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas** - MT - Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro - RJ, 1994.

_____ ME-035 **Agregados – Determinação da abrasão - Los Angeles**. Rio de Janeiro, 1998.

_____. ME-084 **Agregado miúdo – Determinação da densidade real**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. ME-258 **Solos compactados por equipamento miniatura – Mini MCV**. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, Brasília, DF. 1994.

_____. ME-256 **Solos compactados por equipamento miniatura – Determinação da Perda de Massa por imersão**. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, Brasília, DF. 1994.

_____. ME-260 **Escórias de alto forno para pavimentos rodoviários**. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, Brasília, DF. 1994.

_____. ME-262 **Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários**. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, Brasília, DF. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT – **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

_____. DNIT 139/2010 - ES: **Pavimentação: Sub-base estabilizada granulometricamente**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNIT 141/2010 - ES: **Base Estabilizada Granulometricamente – Especificação de Serviço**. Rio de Janeiro, 2022.

_____. DNIT 407/2017 - ES: **Pavimentação Rodoviária - Sub-base Estabilizada Granulometricamente com Açobrita *** - Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2017.

_____. DNIT 134/2018 – IE: **Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência**. DPP/IPR, Rio de Janeiro, 2018.

_____. DNIT 179/2018 – IE: **Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio**. Rio de Janeiro, 2018.

_____. DNIT 141/2010 – ES: **Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNIT 406/2017 – ES: **Pavimentação rodoviária – Base estabilizada granulometricamente com Açobrita® - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2017a.

_____. DNIT 407/2017 – ES: **Pavimentação rodoviária – Sub-base estabilizada granulometricamente com Açobrita® - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2017b.

_____. DNIT 115/2009 – ES: **Pavimentação rodoviária – Base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - ACERITA® - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2009b.

_____. DNIT 114/2009 – ES: **Pavimentação rodoviária – Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria - ACERITA® - Especificação de Serviço.** Rio de Janeiro, 2009a.

DIAS, A. R. D. O.; AMANCIO, F. A.; SOUSA, I. L. X. D.; LUCAS, S. O.; LIMA, D. A.; CABRAL, A. E. B. Efeitos da substituição do cimento Portland por escória de aciaria BSSF nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. In: **Matéria** (Rio de Janeiro), 25. 2020.

DYER, P. P. O. L., KLINSKY, L. M. G., SILVA, S. A.; LIMA, M. G. D. (2021). O emprego de resíduos de areia de fundição (RAF) em concreto asfáltico: uma alternativa para a sustentabilidade na pavimentação. In: **Matéria** (Rio de Janeiro), 26.

FERREIRA, P. C.; PIAI, K. D. A.; TAKAYANAGUI, A. M. M.; SEGURA-MUÑOZ, S. I. (2008). Alumínio como fator de risco para a doença de Alzheimer. In: **Revista Latino-Americana de Enfermagem**, 16, 151-157.

FERREIRA, S. M. R. **Comportamento mecânico e ambiental de materiais granulares: aplicação às escórias de aciaria nacionais.** 2010. 330f. Tese de Doutorado. Universidade do Minho (Portugal). 2010.

FERREIRA, G. C. S.; DOMINGUES, L. G. F.; TEIXEIRA, I.; PIRES, M. G. S. Viabilidade técnica e ambiental de misturas de solo com areia descartada de fundição. **Transportes**, 22(2), 62-69. 2014.

FERREIRA, V. J.; VILAPLANA, A. S. D. G.; GARCÍA-ARMINGOL, T.; ARANDA-USÓN, A.; LAUSÍN-GONZÁLEZ, C.; LÓPEZ-SABIRÓN, A. M; FERREIRA, G. Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment. In: **Cleaner Production Journal**, 130, 175-186. 2016.

FREITAS, S. M. A. C. **Escória de Aciaria: caminhos para uma Gestão Sustentável.** Tese de Doutorado. Rede Temática em Engenharia de Materiais-UFOP/UEMG. Ouro Preto, 2018.

GÓMEZ, A. M. J. **Estudo Experimental de um Resíduo de Construção e Demolição (RCD) Para Utilização Em Pavimentação.** Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. 2011. 148p.

GÓMEZ, A. M. J. **Comportamento mecânico de um agregado reciclado a partir de resíduos de construção e demolição submetido a carregamentos cíclicos.** Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 2016. 203p.

GUIMARÃES, A.C.R. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos.** Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

GOMES, T. A. T. & COSTA, K. S. Estudo do coeficiente de permeabilidade em ensaios de poço pelo padrão ABGE: Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro (CACB), ARAXÁ-MG. In: **Águas Subterrâneas**. 2016.

GOOGLE EARTH. **Google Earth**. Disponível em: <https://earth.google.com/web/>. Acesso em: 6 dez. 2022.

GRAFFITTI, D. F., ALVES, C. R. R., VILELA, A. C. F., & MORAES, C. A. M. Determinação de Cal Livre em Escória de Aciaria Elétrica como Contribuição para Avaliação de sua Expansibilidade. In: **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, 2(2), 24-28. 2005.

GUIMARÃES, A. C. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 2009. 367f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

GUMIERI, A. G. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos**. 2002. 251f. Tese de Doutorado. UFRGS. 2002.

HAAN, C. T., BARFIELD, B. J.; HAYES, J. C. Design hydrology and sedimentology for small catchments. In: **Elsevier**. 1994.

HEKAL, E. E; ABO-EL-ENEIN, S. A; EL-KORASHY, S. A; MEGAHEDE, G.M; EL-SAYED, T. M. Hydration characteristics of Portland cement – Electricarc furnace slag blends. In: **HBRC Journal**, 9 (2), 118-124. 2013.

HOOKE R. **Lectures de Potentia Restitutiva, or of spring explaining the power of springing bodies**. London: John Martin, 1678.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). **Relatório de sustentabilidade**. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/#dados-do-setor>. Acesso em: 29 out. 2022.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). **Processo Siderúrgico**. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/processo-siderurgico/> Acesso em: 29 out. 2022.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). **Relatórios de referência emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais - produção de metais ferro e aço**. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/04/brasil_mcti_ferro_aco.pdf. Acesso em: 03 mar. 2023.

KLAUS, H. P. R.; SOLTO, J. M.; LEAL, J. V. B.; RODRIGUES, S. R.; MELO, B. M. Investigação experimental de escória de aciaria elétrica primária na estabilização de solos tropicais para pavimentação. In: **Anais do XX COBRAMSEG, 2022, Campinas**. Anais eletrônicos. 2022.

KLINSKY, L. M. G.; BARDINI, V. S. DOS S.; FABBRI, G. T. P. Efeito da adição de areia de fundição residual e cal a solos argilosos no módulo de resiliência. In: **Transportes**, 22(2), 1–10. 2014.t

KORMANN, A. C. M. **Ensaio de Compactação e caracterização**. Curitiba: UFP, p. 29, 1997.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mecanics, SI version**. Massachusetts Institute of Technology. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons. 1969.

LI, C., CHEN, Z., WU, S., LI, B., XIE, J., & XIAO, Y. Effects of steel slag fillers on the rheological properties of asphalt mastic. In: **Construction and Building Materials**, 145, 383-391. 2017.

LI, G.; GUO, M. Current development of slag valorisation in China. In: **Waste and Biomass Valorization**, v. 5, n. 3, p. 317-325, 2014.

LIKOYDIS, S., & LIAPIS, I. Use of electric arc furnace slag in thin skid-resistant surfacing. In: **5th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements. Thessaloniki, Greece** (pp. 1-3). 2011.

LIMA, C. D. A. & MOTTA, L. M. G. Influência da variação granulométrica de brita graduada simples na deformação permanente. In **ANPET-CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES** (Vol. 29, p. 2015).

LIU, P.; LIN, D.-F.; WANG, W.-J. Effect of mixed slag aggregate replacement on performance of asphalt concrete. In: **Journal of Material Cycles and Waste Management**, p. 1-16, 2022.

LOPES, M.; GABET, T.; BERNUCCI, L.; MOUILLET, V. Durability of hot and warm asphalt mixtures containing high rates of reclaimed asphalt at laboratory scale. In: **Materials and structures**, 48, 3937-3948. 2015.

MACEDO, J. A. G. **Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis**. 1996. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1996.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MACHADO, L. A. **Controle da geração da drenagem ácida da mineração de carvão pelo método de aditivos alcalinos com escória de aciaria elétrica**. Dissertação de Mestrado. UFRGS. 2013.

MACIEL, F. W. F., SOUSA, M., & CABRAL, A. E. B. Avaliação do uso de escória de aciaria em blocos intertravados de concreto para pavimentação. In: **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 18, Porto Alegre. ANTAC, 2020.

MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; VILELA, A. C. F. Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria elétrica. In: **Ambiente Construído**, v. 4, n. 2, p. 57-81, 2004.

MEDEIROS, K. P. M. **Estudo do uso da escória siderúrgica de alto forno e estéril de mineração como alternativa de revestimento primário em estradas não pavimentadas**. 2019. Dissertação de Mestrado. UFMG. 2019.

MELLO, V. F. B; TEIXEIRA, A. H. 1967. **Mecânica de solos**. São Carlos: Escola de Engenharia.

MELO, T. V. **Influência da escoria de aciaria LD no desempenho de concretos com baixo consumo de cimento**. 2020. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais. 2020.

MELO JÚNIOR, A. S. **Análise quantitativa do material particulado na região de campinas através das técnicas de microfluorescência de raios-X e reflexão total usando radiação síncrotron**. Tese (Doutorado em Química) - Unicamp, Campinas, São Paulo, 2007.

MORAES, D.; SEVERINO, M. A; FREITAS, A. M. D.; NAGALLI, A.; MARTINS, L. R. R; PAGIORO, T. A. Environmental effects of leachate extracts from reclaimed asphalt pavement: determination of metals, polycyclic aromatic hydrocarbon and acute toxicity to *Daphnia magna*. In: **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 27, 929-937. 2022.

MOREIRA, D. F., FARIAS, T. R. L., & BASTOS, J. B. D. S. Análise estatística da caracterização físico-mecânica de uma brita graduada simples (BGS) empregada em campo. In: **34°ANPET**. 2020.

MOTTA, L. M. G.; MEDINA, J. Investigação e desenvolvimento em Mecânica dos Pavimentos na COPPE-Brasil. **Revista Engenharia Civil**, N. 26. COPPE/UFRJ: Portugal, 2006.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slag an opportunity to save natural resources, In: **Waste Management**, 21, Duisburg, Alemanha, p. 285-293, 2001.

MOURA, B. L. R.; TEIXEIRA, J. L. E. S.; PIRES, P. J. M.; SIMÃO, R. A.; KHEDMATI, M.; KIM, Y. R. Avaliação da adesividade ligante-escória de alto-forno resfriada ao ar (ACBFS) e de aciaria (LD) usando técnicas de análise de superfícies. In: **Anais do 33 Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes** (pp. 1799-1811). 2019.

MOURÃO, M. B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYJ, A.; LEANDRO, C. A. S.; TAKANO, C.; QUITES, E. E. C.; GENTILE, E. F., SILVA, G. F. B. L., BOLOTA, J. R. & GONÇALVES, M. (2007). **Introdução à Siderurgia**. São Paulo. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. 440p.

NATIONAL SLAG ASSOCIATION. **History**. Disponível em: <https://nationalslag.org/history/>. Acessado em: 02 nov. 2022.

NAPOLITANO, H. B.; CAMARGO, A. J.; MASCARENHAS, Y. P.; VENCATO, I.; LARIUCCI, C. Análise da difração dos Raios X. In: **Revista Processos Químicos**, 1(1), 35-45. 2007.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D. F. **Uma nova Classificação para Finalidades Rodoviárias. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia**. COPPE/ABMS, Rio de Janeiro, 1981.

NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. Editora Villibor, São Paulo. 1995.

NORBACK, C.; MOTTA, L. M. G. Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de duas misturas solo-brita. In: **32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET**, Gramado - RS. 2018.

OLIVEIRA, B. S.; CORDEIRO, J.; NEVES, P. C. B.; CALAZANS, G. M.; COSTA, J. G. S. Avaliação Do Potencial Do Reaproveitamento Da Escória De Aciaria LD Como Agregado Siderúrgico. In: **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, 7(2), 206-229.). 2018.

OSTEN, F. B. V. D.; GUIMARÃES, A. C. R.; DELGADO, B. G.; MOTTA, L. M. G. Estudos de solos lateríticos do Maranhão para aplicação em pavimento de baixo custo. In: **18ª RPU–Reunião de Pavimentação Urbana**. São Luís, Maranhão. 2012.

PAGIO, M. Z.; CARRARETO, L. F.; VIEIRA, G. L.; MAGALHÃES, D. C. Caracterização de resíduos siderúrgicos visando à aplicação em matrizes cimentícias. **Ambiente Construído**, 22, 167-186. 2022.

PARENTE, E. B.; BOAVISTA, A. H.; SOARES, J. B. Estudo do comportamento mecânico de misturas de solo e escória de aciaria para aplicação na construção rodoviária na região metropolitana de Fortaleza. **Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET**. 2003.

PASETTO, M.; BALDO, N. Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag. In: **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3458-3468, 2011.

PEDROSA, R. A. A. **Estudo de viabilidade técnica e econômica do uso de agregados de escória de aciaria em concreto betuminoso usinado a quente**. 2010. 136f. Dissertação de mestrado. UFOP. 2010.

PIRES, P. M; TEIXEIRA, J. E. S. L.; NEPOMUCENO, D. V; FURIERI, E. C. Laboratory and Field Evaluation of KR Slag–Stabilized Soil for Paving Applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 31 (9), 04019182. 2019.

POLESE, M. D. O., CARREIRO, G. L., SILVA, M. G. D., & SILVA, M. R. Caracterização microestrutural da escória de aciaria. In: **Matéria**, 11, 442-452. 2006.

POZZETTI, V. C.; CALDAS, J. N. O descarte de resíduos sólidos no âmago da sustentabilidade. In: **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, 10(1), 183-205. 2019.

PREUSSLER, E. S. **Ensaio triaxiais dinâmicos de um solo arenoso**. 1978. Tese de doutorado, Programa de pós-graduação em engenharia civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1978.

RAPOSO, C. O. L. **Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação.** 2005. Dissertação de mestrado. Vitória: UFES. 2005.

REZENDE, L. B. L.; SOUTO, J. M.; CARVALHO, C.C.; PEREIRA, G. S. R.; RODRIGUES, K. H. P. Influência da utilização de escória de aciaria elétrica primária no módulo de resiliência de solos tropicais. In: **Anais do XX COBRAMSEG**, 2022, Campinas. Anais eletrônicos. Campinas, Galoá, 2022.

RIZZO, E. M.S. **Introdução aos Processos de Refino Primário dos Aços nos Conversores a Oxigênio.** Editora ABM, 2006. 118 p.

ROCHA, M. L. **Influência dos módulos de resiliência iniciais no procedimento de retroanálise de pavimentos flexíveis.** Dissertação de mestrado. UFJF. 2020.

RODRIGUES, M. H. R.; CARVALHO, C. C. S.; ALMEIDA, R. M.; RODRIGUES, K. H. P.; PITANGA, H. N. Aproveitamento Geotécnico de Escória de Aciaria Elétrica Secundária na Estabilização de Solos para Pavimentação. In: **XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG**. Campinas-SP, 2022.

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos: estudo laboratorial.** 118f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2002.

ROHDE, L.; NUNEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P. Escória de aciaria elétrica: uma alternativa aos materiais granulares tradicionais. In: **Transportes**, 11(1). 2003.

ROSA, M. A.; BERNARDES, A. M.; VILELA, A.; MORAES, C.; MAFALDO, I.; BERGMANN, C. Evaluation of the chromium mobility on stainless steel slag used as raw material for ceramic products. In: **Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing**, 2002, Lulea. TMS Fall Extraction and Processing Division Meeting, p. 431-440. 2002.

SANTOS, A. G. D. **Estudo do comportamento resiliente de três solos da região de Campo Grande-MS e de relações entre o módulo de resiliência e resultados de ensaios de compressão simples.** 2005. 139f. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo – São Carlos, 2005.

SAVAZZI, E. A.; OLIVEIRA, D. P. Concentrações de cromo, chumbo e bário no aquífero Bauru, Brasil. In: **XVII Congresso Brasileiro de Toxicologia, Ribeirão Preto, SP. Revista Brasileira de Toxicologia**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Toxicologia, 2011. v. 24. p. AM45. 2011.

SILVA, W. P. D., SILVA, C. M., CAVALCANTI, C. G., SILVA, D. D., SOARES, I. B., OLIVEIRA, J. A., & SILVA, C. D. "LAB Fit ajuste de curvas": um software em português para tratamento de dados experimentais. In: **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 26, 419-427. 2004.

- SILVA, W. K. D., AMANCIO, F. A., DE OLIVEIRA DIAS, A. R., LIMA, D. A., & CABRAL, A. E. B. Estudo preliminar da utilização da escória de aciaria como agregado miúdo em argamassas de revestimento. In: **Revista de Engenharia e Tecnologia**, 11(2), páginas-59. 2019.
- SILVA, B. M. C.; CUNHA, A. A.; MENDES, J. J.; SOLÉ, R. A. L.; VON KRUGUER, F. L.; ARAÚJO, F. G. S. Caracterização tecnológica de escórias de aciaria. In: **47º Seminário de Aciaria – Internacional, parte integrante da ABM Week**, Rio de Janeiro. 2016.
- SILVA, A. C. D., FUCALE, S., & FERREIRA, S. R. D. M. Efeito da adição de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso. In: **Matéria (rio de Janeiro)**, 24. 2019.
- SILVA, B. M. C.; CUNHA, A. A.; MENDES, J. J.; SOLÉ, RAL, VON KRUGUER, FL, & SILVA ARAÚJO, F. G. **Caracterização tecnológica de escórias de aciaria**. In: **47º Seminário de Aciaria – Internacional, parte integrante da ABM Week**, Rio de Janeiro. 2016.
- SOFILIC, T.; SOFILIC, U.; BRNARDIC, I. The Significance of iron and steel slag as by-product for utilization in road construction. In: **12th International Foundrymen Conference**. Opatija, Croatia. 2012.
- SOUZA, C. M. A.; RAFUL, L. Z. L.; VIEIRA, L. B. Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias. In: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, p. 460-464, 2000.
- SOUZA, T. V. D. P. **Caracterização de escória de conversor a oxigênio obtida no processo BSSF antes e após tratamento hidrometalúrgico**. 2016. 67f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. 2016.
- SVENSON, M. **Ensaaios triaxiais dinâmicos de solos argilosos**. 1980. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1980.
- VASCONCELOS, S. D.; DE ARAÚJO BARROSO, S. H.; VIEIRA, F. D. A. F.; ALMEIDA, H. B. F. Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica na construção de pavimentos. In: **TRANSPORTES**, 27(2), 73-88. 2019.
- VIDAL, C. B.; CÂNDIDO, F. E. A.; OLIVEIRA, A. G. D.; NASCIMENTO, R. F. D.; SANTOS, A. B. D. Resíduos da combustão em usina termelétrica: ensaios de lixiviação e solubilidade. In: **13º Seminário Nacional de Resíduos Sólidos**, 2018.
- VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S.; CINCERRE, J. R.; SERRA, P. R. M.; ZUPPOLINI, A. N. **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas, bases alternativas com solos lateríticos**. Ed. Arte e Ciência. São Paulo. 2007.
- VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. Ed. Arte & Ciência, p.292. 2009.

WANG, H.-Y.; CHEN, K.-W. A study of the engineering properties of CLSM with a new type of slag. In: **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 422-427, 2016.

WERKMEISTER, S. **Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials in Pavement Constructions**. Tese de Doutorado, Universidade Técnica de Dresden, 189 pg. 2003.

WORLDSTEEL ASSOCIATION. **Fact sheet Steel industry co-products**. Disponível em: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Steel-industry-co-products.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2022.

WORLDSTEEL. **How is Steel Made?** Disponível em: <https://worldsteel.org/about-steel/about-steel/> Acesso em: 02 mar. 2023.

YI, H.; XU, G.; CHENG, H.; WANG, J.; WAN, Y.; CHEN, H. An overview of utilization of steel slag. In: **Procedia Environmental Sciences**, 16, 791-801. 2012.

YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. In: **Advances in civil engineering**, v. 2011, 2011.

ZAGO, J. P., PINHEIRO, R. J. B., BARONI, M., SPECHT, L. P., DELONGUI, L., & SAGRILO, A. V. Study of the permanent deformation of three soils employed in highway subgrades in the municipality of Santa Maria-RS, Brazil. In: **International Journal of Pavement Research and Technology**, 14, 729-739. 2021.