

Universidade Federal de Ouro Preto

Núcleo de Geotecnia

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

PPGEO

Dissertação

**Utilização do pó de escória
de desulfuração do reator
Kambara como agente
estabilizador de solo argiloso
para camadas de
pavimentação**

Luis Eduardo Causado Mendoza

Ouro Preto

2023



LUIS EDUARDO CAUSADO MENDOZA

**UTILIZAÇÃO DO PÓ DE ESCÓRIA DE
DESULFURAÇÃO DO REATOR KAMBARA COMO
AGENTE ESTABILIZADOR DE SOLO ARGILOSO
PARA CAMADAS DE PAVIMENTAÇÃO**

NUGEO

Dissertação/tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme J. Cunha Gomes

Coorientador: Prof. Dr. Patricio J. Moreira Pires

ESCOLA DE MINAS / UFOP

Ouro Preto – Minas Gerais

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M539u Mendoza, Luis Eduardo Causado.

Utilização do pó de escória de desulfuração do reator Kambara como agente estabilizador de solo argiloso para camadas de pavimentação. [manuscrito] / Luis Eduardo Causado Mendoza. - 2023.

98 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Guilherme J. Cunha Gomes.

Coorientador: Prof. Dr. Patrício J. Moreira Pires.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Área de Concentração: Geotecnia.

1. Desulfuração. 2. Escória (Metalurgia). 3. Reator Kambara. 4. Mecânica dos solos. 5. Pavimentos. I. Gomes, Guilherme J. Cunha. II. Pires, Patrício J. Moreira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.13

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



FOLHA DE APROVAÇÃO

Luis Eduardo Causado Mendoza

Utilização do pó de escória de desulfuração do reator Kambara como agente estabilizador de solo argiloso para camadas de pavimentação

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**

Aprovada em 03 de agosto de 2023

Membros da banca

Prof. Dr. Guilherme José Cunha Gomes - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Profª. Drª. Lia de Mendonça Porto - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Geraldo Luciano de Oliveira Marques - (Universidade Federal de Juiz de Fora)
Prof. Dr. Ronderson Queiroz Hilário - (Universidade Federal de Minas Gerais)

O Prof. Dr. Guilherme José Cunha Gomes, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 18/10/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Jose Cunha Gomes, COORDENADOR(A) DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**, em 18/10/2023, às 16:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0608993** e o código CRC **E4755BDB**.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Aura e Jorge e minha irmã Elvira, pelo amor incondicional e pelo incentivo incansável em lutar e seguir os meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, por me proporcionar saúde, sabedoria e por abrir caminhos nesta minha jornada.

À minha família, pelos exemplos de força, coragem, determinação e luta, que me inspiraram e me incentivaram a prosseguir até o fim.

Agradecimento especial ao Professor Guilherme J. Cunha Gomes, por me acompanhar e acolher neste processo da vida acadêmica, pelos ensinamentos e orientação de mestrado.

Ao Professor Patricio J. Moreira Pires, pela disponibilidade, acreditar em mim e à amizade.

Ao Eduardo L. Silva, e a PROPAV Engenharia e Serviços por abrir as portas da sua empresa e laboratório para a realização dos experimentos desta pesquisa, pela amizade e a confiança.

Ao meus amigos, Diego, pela disposição e ajuda durante este tempo. Dely, por acreditar e me dar forças todos os dias. E a todos aqueles que fizeram este tempo mais leve.

À CAPES pela bolsa de estudo de mestrado e pela oportunidade no meu crescimento pessoal e profissional.

À UFOP e Escola de Minas, pela formação acadêmica de qualidade e por me permitir o contato com excelentes profissionais.

RESUMO

O uso da escória de dessulfuração do reator Kambara (escória KR) tem atraído atenção na indústria de material rodoviário para melhorar o desempenho do projeto de estradas. No entanto, o potencial de reutilização da escória KR em pó (KRSP), coletada por coletores de poeira, como filtros de manga, ainda não foi suficientemente estudado. Este trabalho investiga a composição química, propriedades físicas e características mecânicas de solo argiloso misturado com KRSP. Para avaliar a capacidade do coproduto de estabilizar dito solo, foram realizados experimentos de laboratório com materiais brutos e solo misturado com 3% e 5% de KRSP. Os resultados revelam que a densidade específica do KRSP ($2,23 \text{ g/cm}^3$) é menor do que a da escória KR granulada. A análise de Fluorescência de raios-X não detectou ferro (Fe) na sua composição, e a porcentagem de óxido de cálcio (CaO) foi inferior a 40%. O Portlandita (Ca(OH)_2) foi identificado como o principal mineral presente através da análise de difratometria de raios-X, e Brucita (Mg(OH)_2) como o mineral menor. A adição de 3% e 5% de KRSP ao solo argiloso resultou em um aumento nos valores do Índice de Suporte Califórnia (CBR de 13% para 42% e 41%, respectivamente, em apenas 4 dias de cura. E em resistência à compressão não confinada de 1,25 MPa e 0,95 MPa os 7 dias. Limites de Atterberg, distribuição granulométrica e testes de expansão reforçaram nossos resultados, mostrando conformidade com os requisitos para materiais de sub-base de primeira classe. A descoberta demonstra que o pó de despoeiramento de dessulfuração KR tem potencial para ser utilizado como agente estabilizador ambientalmente amigável, contribuindo para a melhoria da gestão de resíduos no setor siderúrgico.

Palavras-chave: Escória de dessulfuração, Reator Kambara, Estabilização de solos, Pavimentação.

ABSTRACT

The use of Kambara reactor desulphurization slag (KR slag) has attracted attention in the road material industry to improve road design performance. However, the potential (re)use of KR slag powder (KRSP) collected by dust collectors, such as bag filters, remains understudied. This paper investigates the chemical composition, physical properties, and mechanical characteristics of soil mixed with KRSP. To evaluate the ability of KRSP to stabilize clayey soil, laboratory experiments were carried out on raw materials and soil mixed with 3% and 5% KRSP. The results reveal that the bulk specific gravity of KRSP (2.23 g/cm^3) is lower than that of the granulated KR slag. X-Ray Fluorescence analysis did not detect iron (Fe) in KRSP, and the percentage of calcium oxide (CaO) was below 40%. Portlandite (Ca(OH)_2) emerged as the major mineral present through X-Ray Diffraction analysis, and Brucite (Mg(OH)_2) as the minor. Mixing clayey soil with 3% and 5% KRSP yielded an increase in the California Bearing Ratio (CBR) values from 13% to 42% and 41%, respectively, within a mere 4 days of curing. The addition of 3% and 5% KRSP to clayey soil resulted in unconfined compressive strength of 1.25 MPa and 0.95 MPa, respectively. Atterberg limits, particle size distribution, and expansion tests reinforced our results, showing compliance with the requirements for first-class subbase materials. Our findings demonstrate that KRSP has the potential to serve as an environmentally friendly stabilizing agent, contributing to improved waste management in the steel sector.

Key-words: Desulphurization slag, Reator Kambara, Soil stabilisation, Roads.

Lista de figuras

Figura 1. Divisão modal dos serviços de transporte utilizados por empresas embarcadoras (Resende, 2018).	21
Figura 2. Densidade da malha rodoviária pavimentada por país (valores em km/mil km²) (CNT, 2022).	23
Figura 3. Camadas que constituem os pavimentos rodoviários (Bernucci <i>et al</i>, 2010).	26
Figura 4. Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas (DNIT, 2006).	27
Figura 5. Etapas de produção do aço (IABr, 2021).	33
Figura 6. Geração e destinação de coprodutos e resíduos siderúrgicos (IABr, 2021).	35
Figura 7. Esquema representativo do reator Kambara (Marchesi, 2018 <i>apud</i> Corteletti Junior, 2022).	36
Figura 8. Difratograma de raios-X da escória KR (Pires <i>et al</i>, 2019).	40
Figura 9 – Curvas para obtenção dos coeficientes para (a) Modelo - Tensão confinante, (b) Modelo – Tensão desviadora, (Andrade, 2018)	42
Figura 10 - Resumo dos valores de ISC para solos e as misturas, (Gonçalves, 2016).	44
Figura 11- Resultados mecânicos das misturas estudadas: (a) ISC, (b) MR, (Pires <i>et al</i>, 2019)	47
Figura 12 - ISC das amostras na umidade ótima após 96 horas de imersão e após 28 dias de cura e 4 dias de imersão.	49
Figura 13. Aparência da argila arenosa vermelha estudada.	52
Figura 14. Esquema de geração de pó desulfurização e desempoeiramento do reator Kambara (Adaptado de ArcelorMittal).	53
Figura 15. Pó da escória KR (KRSP) doada pela ArcelorMittal.	53
Figura 16. Preparação das misturas solo-KRSP.	54
Figura 17 Medição do Potencial Hidrogeniônico do pó de despoeiramento KR	56
Figura 18. Ensaio de granulometria por sedimentação.	57
Figura 19. Ensaio de determinação do Limite de liquidez.	58
Figura 20. Ensaio de determinação da massa específica.	59
Figura 21. Compactação de amostras na energia Proctor Intermediária.	60
Figura 22. Imersão em água dos corpos de prova para a determinação do CBR.	60
Figura 23. Cura dos corpos de prova selados e enterrados em pó de serra saturada de água.	62
Figura 24. Determinação das deformações permanentes.	62
Figura 25. Difratometria de raios-X do KRSP.	66

<u>Figura 26. Curvas granulométricas das amostras.</u>	69
<u>Figura 27. Ábaco de Casagrande SUCS.</u>	72
<u>Figura 28. Curvas de compactação do solo e misturas.</u>	74
<u>Figura 29. Curvas de CBR do solo e misturas.</u>	76
<u>Figura 30 - Resistência à compressão simples das misturas após 7 dias de cura</u>	78
<u>Figura 31. Modelos do Módulo de resiliência da mistura SKRSP3.</u>	83
<u>Figura 32. Modelos do Módulo de resiliência da mistura SKRSP5.</u>	88
<u>Figura 33 - Deformação permanente da mistura SKRSP3</u>	90
<u>Figura 34 - Deformação permanente da mistura SKRSP5</u>	91
<u>Figura 35 - Modelos de comportamento à deformação permanente de vários materiais ou de um mesmo material a vários níveis de solicitação de cargas cíclicas, (DNIT, 2018)</u>	92
<u>Figura 36 - Modelos de comportamento à deformação permanente de solos - análise do acomodamento ou shakedown, (DNIT, 2018)</u>	92
<u>Figura 37 - Análise do comportamento do material de acordo com a deformação permanente - SKRSP3</u>	93
<u>Figura 38 - Análise do comportamento do material de acordo com a deformação permanente - SKRSP5</u>	93

Lista de tabelas

Tabela 1 - Composição química da escória KR	38
Tabela 2 - Caracterização e compactação resultantes das misturas estudadas, (Oliveira <i>et al</i>, 2019)	45
Tabela 3 - Valores de ISC e expansão na umidade ótima e valores de expansão e umidade para o valor de ISC máximo - Solo AE + KR, (Furieri, 2019)	46
Tabela 4 - Composição química do coproduto KR estudado	64
Tabela 5 - Distribuição granulométrica das amostras	68
Tabela 6 – Massa específica real dos grãos	70
Tabela 7– Limites de consistência	71
Tabela 8– Classificação de solos SUCS	73
Tabela 9– Classificação de solos AASHTO	73
Tabela 10– Resultados do ensaio de compactação das amostras	75
Tabela 11 – Resultados do ensaio de CBR	76
Tabela 12 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência, DNIT 134/2010-ME	79
Tabela 13 – Ensaio do MR, CP01 – SKRSP3	80
Tabela 14 – Ensaio do MR, CP02 – SKRSP3	80
Tabela 15 – Ensaio do MR, CP03 – SKRSP3	81
Tabela 16– Resultados dos coeficientes do Módulo de resiliência da mistura SKRSP3	83
Tabela 17 – Ensaio do MR, CP01 – SKRSP5	84
Tabela 18 – Ensaio do MR, CP02 – SKRSP5	85
Tabela 19 – Ensaio do MR, CP03 – SKRSP5	85
Tabela 20– Resultados dos coeficientes do Módulo de resiliência da mistura SKRSP5	88
Tabela 21– Valores dos Módulo de resiliência das misturas	89
Tabela 23– Modelos Monismith das misturas estudadas	91

Lista de símbolos, Nomenclatura e Abreviações

Θ – Soma de tensões principais

σ_d – Tensão desvio

σ_3 – Tensão confinante

ε_p – Deformação permanente

A, B – Constantes

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BF – Alto-forno (escória)

BGTC – Brita Graduada Tratada com Cimento

CBR – California Bearing Ratio

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CTC – Capacidade de troca de cátions

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

DP – Deformação permanente

DRX – Difração de raios-X

HCL – Ácido clorídrico

HVS – Simulador de veículos pesados

IABr – Instituto Aço Brasil

IP – Índice de plasticidade

ISC – Índice de suporte California

k1, k2, k3 – Constantes

KR – Reator Kambara

KRSP – Kambara Reactor slag powder / Pó de escória KR

LD – Linz-Donawitz (escória)

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

MR – Módulo de resiliência

N – Número de ciclos

NBR – Norma técnica

NP – Não plástico

pH – Potencial hidrogeniônico

R^2 – R-square

SMC – Solo modificado com cimento

Su – Resistencia não drenada

SUCS – Sistema unificado de classificação de solos

UCS – Resistência à compressão simples

XRD – Difractometria de raio- X

XRF – Fluorescência de raio- X

Sumario

<u>CAPÍTULO 1</u>	9
<u>INTRODUÇÃO</u>	9
1.1. <u>CONSIDERAÇÕES INICIAIS</u>	9
1.2. <u>JUSTIFICATIVA</u>	12
1.3. <u>OBJETIVOS DO TRABALHO</u>	18
1.4. <u>ESTRUTURA DO TRABALHO</u>	19
<u>CAPÍTULO 2</u>	21
<u>REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO</u>	21
2.1. <u>CONSIDERAÇÕES INICIAIS</u>	21
2.2. <u>PAVIMENTAÇÃO</u>	24
2.3. <u>ESTABILIZAÇÃO E MELHORAMENTO DE SOLOS</u>	28
2.4. <u>AÇO E ESCÓRIA KR</u>	31
2.5. <u>CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DA ESCÓRIA KR</u>	36
2.6. <u>ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM COPRODUTO KR</u>	41
<u>CAPÍTULO 3</u>	51
<u>MATERIAIS E MÉTODOS</u>	51
3.1. <u>MATERIAIS</u>	51
3.1.1. <u>Solo</u>	51
3.1.2. <u>Escória KR</u>	52
3.1.3. <u>Mistura solo-KRSP</u>	53
3.2. <u>MÉTODOS</u>	54
3.2.1. <u>Ensaio de caracterização química</u>	54
• <u>Fluorescência de raios-x</u>	54
• <u>Difratometria de raios-x</u>	55
• <u>Potencial Hidrogeniônico (pH)</u>	55
3.2.2. <u>Ensaio de caracterização física</u>	56
• <u>Granulometria por peneiramento e sedimentação</u>	57
• <u>Limites de consistência</u>	58
• <u>Massa específica dos grãos</u>	58

3.2.3. Ensaio de caracterização mecânica	59
• Ensaio de compactação	59
• Índice de suporte California (CBR)	60
• Expansão	61
• Resistência à compressão simples	61
• Módulo de resiliência (MR)	61
• Deformação permanente (DP)	62
<u>CAPÍTULO 4</u>	64
RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1. ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	64
4.1.1. Fluorescência de raios-x	64
4.1.2. Difratometria de raios-x	65
4.1.3. Potencial Hidrogeniônico (pH)	67
4.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	67
4.2.1. Granulometria por peneiramento e sedimentação	67
4.2.2. Massa específica real dos grãos	69
4.2.3. Limites de consistência	70
4.2.4. Classificação dos solos	71
• Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)	72
• American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	73
4.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	74
4.3.1. Ensaio de compactação	74
4.3.2. Índice de suporte California (CBR) e Expansão	75
4.3.3. Resistência à compressão simples (UCS)	77
4.3.4. Módulo de resiliência (MR)	78
4.3.5. Deformação permanente (DP)	90
<u>CAPÍTULO 5</u>	94
5.1. CONCLUSÕES	94
5.2. SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS	95
<u>REFERÊNCIAS</u>	96

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a crescente demanda por construções civis em todo o mundo, surge uma necessidade igualmente crescente por materiais de construção que possam resistir às cargas a que serão submetidos. No caso da pavimentação, tais materiais devem ser capazes de resistir e distribuir as forças verticais geradas pelo tráfego e as forças horizontais que atuam sobre eles, o que pode levar a uma exploração excessiva de materiais naturais para atender às demandas dos projetos (Medina, 2015).

Nesse contexto, o uso de rejeitos industriais está se tornando cada vez mais relevante e tem sido objeto de extensas pesquisas. Diversos estudos têm investigado o uso de diferentes escórias e resíduos como agentes estabilizantes (Amadi, 2014; Etim *et al.*, 2017; Gurbuz, 2015; Gupta e Kumar, 2017; Mohammadinia *et al.*, 2017; Sharma, 2020). Muitos desses trabalhos têm se baseado na utilização de coprodutos industriais, como a cinza volante (Mir e Sridharan, 2013; Sukprasert *et al.*, 2019) e as escórias (Afrin, 2017; Abdullah *et al.*, 2020; Onyejekwe e Ghataora, 2015). As escórias provenientes da indústria siderúrgica, em particular, têm sido amplamente estudadas devido à sua viabilidade e disponibilidade (Athulya *et al.*, 2017; Gokalp *et al.*, 2018) e também por contribuírem para a redução da extração de agregados naturais e o não descarte de rejeitos em áreas inadequadas (Gottardi, 2015).

Com o crescente interesse na utilização de rejeitos industriais como agentes estabilizantes para pavimentação, torna-se cada vez mais importante ampliar a pesquisa nessa área e avaliar de forma mais abrangente o potencial de materiais alternativos na construção civil, buscando sempre a adoção das soluções mais sustentáveis e eficientes possíveis (Ramos, 2018 & Gottardi, 2015).

Do ponto de vista econômico, o setor de mineração no Brasil tem sido fundamental para o desenvolvimento do país, especialmente no que se refere à produção de ferro e aço. Dados recentes indicam que o Brasil é o segundo maior produtor de ferro no mundo, com uma produção de 292 milhões de toneladas em 2018, o que representa 19% da produção global. Além disso, em 2021, o país produziu cerca de 36,1 milhões de toneladas de aço bruto, o que o colocou em nono lugar no ranking mundial (OECD, 2022).

No contexto das etapas de produção do aço, é importante compreender que existe uma geração de coprodutos e resíduos, além dos materiais principais. O processo de alto-forno transforma os materiais em ferro-gusa, escória e gás de alto-forno. Enquanto o ferro-gusa é útil na fabricação do aço, os coprodutos gerados nesse processo podem ser reaproveitados. Ao longo dos anos, a produção de coprodutos e resíduos tem aumentado no Brasil, com 619, 620 e 622 quilogramas produzidos em 2018, 2019 e 2020, respectivamente, por cada tonelada de aço bruto produzida (IABr, 2022). Isso equivale a uma média de 620 Kg de coprodutos e resíduos por tonelada de aço bruto. Em 2021, estima-se que tenham sido geradas cerca de 22,4 milhões de toneladas de coprodutos e resíduos no país.

De acordo com dados do IABr (2022), dos 17 milhões de toneladas de coprodutos e resíduos gerados em 2020, os agregados siderúrgicos de alto-forno representaram 40%, os agregados siderúrgicos de aciaria 25%, os pós e finos 6%, a lama 4% e outros tipos de coprodutos e resíduos 25%. Além disso, 93% desses materiais foram reaproveitados, 2% foram estocados e 5% foram destinados a disposição final. O reaproveitamento dos coprodutos e resíduos é fundamental para a sustentabilidade da cadeia produtiva do aço, uma vez que esses materiais podem ser reaproveitados como matérias-primas ou insumos em outros setores ou processos, reduzindo a necessidade de extração de recursos naturais e minimizando o impacto ambiental. Portanto, o desenvolvimento de tecnologias que permitam o reaproveitamento desses materiais de forma eficiente e segura é crucial para a indústria siderúrgica e para a sustentabilidade no setor.

A produção de aço é um processo que exige o rigoroso controle de diversas variáveis, dentre elas, o teor de enxofre presente na liga. Isso se deve ao fato de que a presença desse elemento pode ser extremamente prejudicial para diversas aplicações do aço. Contudo, é importante ressaltar que a presença de enxofre no aço é inevitável, uma vez que este é proveniente de

insumos cruciais para a produção do ferro gusa, matéria-prima do aço. Nesse sentido, o controle do teor inicial de enxofre está diretamente relacionado à qualidade do carvão ou coque utilizados no alto forno para a produção do ferro gusa (Corteletti Junior, 2022). Destaca-se, portanto, a importância de garantir a qualidade desses insumos, a fim de minimizar a presença de enxofre na liga. Ademais, a remoção do enxofre do ferro gusa é um processo crucial para se obter uma alta qualidade do aço produzido. Dentre os diversos meios disponíveis para tal fim, destaca-se o uso do Reator Kambara, considerado o método mais econômico e eficiente para reduzir o teor de enxofre na fabricação do aço. Esse método tem atingido níveis de eficiência superiores a 85% a uma temperatura de 1300 °C, conforme apontado por estudos realizados por Huang e Huang (2014).

Diante do exposto, conclui-se que a qualidade dos insumos e a eficiência da remoção do enxofre são aspectos cruciais para a produção de aço de alta qualidade. O uso do Reator Kambara é uma alternativa viável e eficiente para garantir a redução desse elemento na liga, resultando em um produto final com excelentes propriedades mecânicas e químicas.

O processo de dessulfuração de aço realizado em indústrias siderúrgicas gera um coproduto denominado escória KR, produto da remoção do excesso de enxofre no aço, que é descartado como resíduo sólido (Schrama *et al.*, 2017, Andrade, 2018, Pires *et al.*, 2019). Contudo, estudos recentes têm demonstrado que esta escória apresenta características e componentes químicos interessantes para sua aplicação como material de construção. Dentre esses componentes, destacam-se o SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 , os quais são similares aos encontrados no cimento Portland.

Em contrapartida, a construção de pavimentos rodoviários demanda uma grande quantidade de recursos naturais, como solos e agregados granulares, os quais muitas vezes não atendem aos requisitos das normas para seu uso como material rodoviário (Brown, 1996). Neste contexto, a utilização de resíduos industriais para estabilização de solos tem sido considerada uma alternativa atrativa para melhorar as propriedades geotécnicas dos materiais empregados em obras rodoviárias.

O Reator Kambara (KR) é um agitador mecânico de gusa na estação de dessulfuração que acelera a reação de dessulfuração, proporcionando a imersão e rotação do impeller dentro do gusa líquido, com subsequente mistura mecânica do metal com o agente dessulfurizante (Rosa,

2019). Como resultado, é gerada a escória KR, um material notável que apresenta potencial para ser utilizado como substituto parcial de solos em obras rodoviárias.

Dessa forma, a utilização da escória KR como substituto parcial de solos em pavimentos rodoviários pode trazer benefícios econômicos e ambientais significativos, reduzindo a dependência de recursos naturais e diminuindo a quantidade de resíduos descartados. Além disso, graças às propriedades químicas e físicas da escória KR, é possível obter melhorias nas características geotécnicas dos solos, garantindo maior resistência à compressão simples, durabilidade, menor expansão e plasticidade, requisitos fundamentais para a construção de pavimentos rodoviários de qualidade.

1.2. JUSTIFICATIVA

A análise da Confederação Nacional do Transporte CNT (2022) revelou um panorama inquietante da malha rodoviária brasileira, uma vez que os resultados apontaram uma piora no Estado Geral da mesma. A pesquisa contemplou a avaliação de 110.333 km de rodovias e expôs que o 66,0% foi classificada como Regular, Ruim ou Péssimo. Tal índice foi superior ao apresentado em 2021, o qual foi de 61,8%, constatando um aumento na precariedade das estradas nacionais. O anuário CNT do transporte (2020) corrobora com este quadro, pois revela que em 2019 somente 12,40% da malha rodoviária total do país possuía algum tipo de pavimentação. Em outras palavras, dos 1.720.700,0 quilômetros de extensão rodoviária existente, apenas 213.452,0 quilômetros estavam pavimentados e, destes, 59,2% apresentavam algum tipo de problema no estado geral. O cenário apresentado para o ano de 2022, contudo, não apresentou avanço considerável, já que 213,5 mil km das rodovias brasileiras são pavimentados, o que equivale a somente 12,40% da extensão total. Assim, as estatísticas recentes evidenciam o preocupante déficit na infraestrutura viária, o que dificulta a interligação entre os municípios e compromete o desenvolvimento econômico e social do país.

A infraestrutura rodoviária é um componente chave do sistema de transporte e mobilidade de um país, com um impacto significativo sobre os aspectos econômicos e sociais. As estradas pavimentadas são de particular importância, permitindo a conexão eficiente entre áreas rurais e urbanas, assim como o transporte de bens e serviços. Entretanto, no Brasil, há uma baixa

extensão de rodovias pavimentadas, o que afeta de forma negativa as condições de segurança, desempenho e conforto dos usuários, bem como o desgaste acentuado dos veículos que são utilizados. De acordo com dados divulgados pela Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2022), a escassez de rodovias pavimentadas tem resultado em um aumento considerável nos tempos de viagem, além de implicar em prejuízos financeiros, tanto para as empresas transportadoras quanto para os usuários. Essa situação também tem impactado negativamente na economia do país, afetando a competitividade e a eficiência do setor de transporte e logística.

No relatório de pesquisa sobre custos logísticos no Brasil 2017, elaborado por Resende (2018), foi constatado que o modal rodoviário é amplamente utilizado pelas empresas embarcadoras, representando 75,9% dos serviços de transporte. Essa dependência das cargas rodoviárias aliada à baixa qualidade da infraestrutura, implica em um aumento significativo nos preços finais dos produtos, afetando negativamente a competitividade e a rentabilidade das empresas.

Diante desse cenário, é necessário que sejam desenvolvidas políticas públicas efetivas para a melhoria da infraestrutura rodoviária do país, garantindo a segurança, eficiência e qualidade do serviço de transporte de cargas e de passageiros. A ampliação da rede de rodovias pavimentadas deve ser priorizada, colaborando para o desenvolvimento econômico e social do Brasil.

O transporte rodoviário desempenha um papel crucial no desenvolvimento econômico e social do Brasil, sendo responsável pela movimentação de grande parte das cargas e pessoas em todo o país. No entanto, a infraestrutura rodoviária brasileira enfrenta desafios no que se refere à conservação e construção de novas vias, o que tem causado impactos negativos na operação e manutenção do sistema de transporte (Nepomuceno, 2019). Do ponto de vista da engenharia de pavimentação, o solo é um dos principais componentes do subleito, subbase e base e das rodovias. Quando as características do solo não atendem aos requisitos necessários para essas finalidades, a estabilização se torna uma técnica indispensável para o seu aprimoramento (Oliveira Bridi, 2020). Dentre as técnicas de estabilização mais utilizadas, destacam-se a estabilização granulométrica e química.

A estabilização granulométrica envolve processos físicos, como a alteração da graduação ou compactação do solo. Já a estabilização química é realizada pela adição de materiais cimentantes ou pozolânicos para aprimorar as propriedades do solo (Pires *et al.*, 2019). Ambas as técnicas são importantes para garantir a estabilidade e durabilidade das camadas de pavimento das

rodovias, contribuindo para a redução dos custos de manutenção e aumento da segurança do tráfego.

Nesse contexto, um dos principais desafios na construção e manutenção de rodovias é a obtenção de materiais para a sua construção. A escassez de recursos naturais, as normas ambientais mais rigorosas e o aumento dos custos dos materiais de construção têm impactado negativamente a capacidade do setor de suprir a demanda por materiais e equipamentos de qualidade. Dessa forma, é imprescindível que os engenheiros e profissionais da área de infraestrutura trabalhem em conjunto para o aprimoramento das técnicas de estabilização do solo e para a otimização dos recursos disponíveis para garantir a construção de rodovias seguras e eficientes (Oliveira Bridi, 2020; Schumacher, 2018; Gotardi, 2015).

A necessidade de se buscar por materiais alternativos para pavimentação surge em decorrência da extração mineral de matérias naturais, que tem sido uma prática não sustentável. Gautam *et al.* (2018) destacam que essa problemática é um fator que impulsiona a busca por soluções alternativas, que considerem a disponibilidade de recursos e as características dos solos, bem como os custos e os impactos ambientais gerados.

A utilização do agregado siderúrgico na pavimentação de vias tem sido uma alternativa promissora, a qual pode contribuir para a diminuição dos impactos ambientais gerados pela extração mineral e pela produção de materiais de construção. Tal prática decorre da elevada geração de coprodutos e resíduos derivados da produção do aço bruto no país e no mundo. Segundo o Instituto Aço Brasil (IABr, 2022), mais de 90% dos coprodutos e resíduos gerados no processo de produção do aço são reaproveitados.

Nesse sentido, a utilização do agregado siderúrgico na construção civil pode ser uma estratégia eficaz para promover a economia circular e a redução de resíduos gerados pelo setor industrial. Além disso, o uso de materiais alternativos na pavimentação pode contribuir para a melhoria da qualidade das camadas, bem como para a diminuição dos impactos ambientais gerados pela extração mineral, como a erosão do solo e a degradação de ecossistemas. Portanto, a utilização do agregado siderúrgico na pavimentação de vias como revestimento primário, bases e sub-bases, e sua substituição à brita e outros materiais na construção civil, pode representar uma

alternativa sustentável para o setor, contribuindo para a economia circular, a redução dos impactos ambientais e a promoção de um desenvolvimento sustentável.

A resolução de problemas de gestão de resíduos é uma das principais preocupações ambientais e sociais de todo mundo, dado que sua produção é acentuada e crescente. Nesse contexto, a utilização de coprodutos em pavimentação tem ganhado destaque na última década, seja pela capacidade de utilização de resíduos em formas produtivas, seja pelos benefícios ambientais e econômicos. Díaz-Piloneta *et al.* (2021) realizaram um estudo que identificou a viabilidade técnica de utilizar coprodutos em pavimentação. Nesse sentido, estabeleceu-se um critério de decisão para o uso de escória de aciaria, baseado no ganho ambiental, levando em conta as distâncias de transportes do coproduto e das fontes de materiais naturais. O estudo mostrou que a utilização de coprodutos, como o agregado siderúrgico, pode ser uma alternativa sustentável na construção de pavimentos, reduzindo custos e impactos ambientais.

Um estudo comparativo realizado por Teixeira *et al.* (2019) concluiu que o revestimento asfáltico construído com coproduto siderúrgico teve um desempenho mecânico igual ou superior ao construído com materiais convencionais. Esse resultado corrobora com a afirmação de Schumacher (2018), que destaca a escória de aciaria como um coproduto siderúrgico de alta resistência e baixo custo, alternativo para uso em substituição (parcial ou total) aos agregados britados de origem natural, como material de pavimentação. Além disso, o estudo de Azeredo (2018) revelou que o agregado siderúrgico possui características físicas e mecânicas equivalentes ou até superiores às das rochas graníticas, mostrando sua viabilidade para ser empregado em obras de pavimentação, atendendo os requisitos das normas usadas.

Portanto, é possível afirmar que a utilização de coprodutos em pavimentação apresenta-se como uma alternativa viável, econômica e ambientalmente sustentável. A utilização de resíduos na construção de pavimentos pode contribuir para a redução de impactos ambientais, a redução de custos e a promoção do desenvolvimento sustentável.

Dentre os diversos coprodutos gerados na produção do aço, a escória KR apresenta características altamente desejáveis para a estabilização de solos para pavimentação. A escória KR possui elevada resistência mecânica, potencial cimentante e baixo potencial de expansão. O uso da escória KR tem-se mostrado tecnicamente viável e apresentado resultados promissores

para a estabilização de solos com baixa aptidão para pavimentações, conforme verificado em estudos recentes (Pires *et al.*, 2019).

Em um estudo realizado por Andrade (2018), foi avaliado o desempenho mecânico e microestrutural da brita graduada tratada com cimento (BGTC) com a incorporação de coproduto de aciaria KR. Dentre as misturas estudadas, a mistura com um teor de 20% de escória KR (BGTC_{KR20}) demonstrou o melhor desempenho mecânico quando comparada às diferentes misturas com outros teores de KR e a uma mistura de BGTC padrão com 4% de cimento. Além disso, em um estudo conduzido por Ramos (2018) foi avaliado o ganho de resistência não drenada e estabilização química pela adição de coproduto KR no melhoramento de solos argilosos. Os resultados obtidos indicaram que o coproduto promove ganhos de resistência não drenada e que estes variam de acordo com a granulometria do coproduto.

Dessa forma, o uso da escória KR apresenta-se como uma alternativa eficiente no processo de estabilização de solos para pavimentação, contribuindo para a melhoria da qualidade e durabilidade das estruturas viárias. De acordo com os estudos de Cho & Choi (2016), a escória KR apresenta elevada dureza e resistência à compressão, o que confere a esse material a capacidade de substituir diretamente a areia e agregados grosseiros. Oliveira *et al* (2019) constataram que diferentes tipos de solo podem influenciar no processo de estabilização quando misturados com escória KR, evidenciando a complexidade e nuances dessa técnica.

Trabalhos recentes têm evidenciado a eficiência da incorporação de grandes quantidades de escória KR (70% – 75%) em solos com o objetivo de proporcionar camadas de base econômicas em estradas de baixo volume (Magalhães *et al.*, 2020; Gomes *et al.*, 2021; Schumacher *et al.*, 2022). Tal utilização tem se mostrado uma alternativa vantajosa em termos de custo-benefício, visto que proporciona aumento significativo nos valores de CBR, o que garante a adequada capacidade suporte e resistência para suportar cargas veiculares.

Portanto, justifica-se o interesse crescente da comunidade científica e da indústria de construção civil na utilização da escória KR como uma opção de material alternativo para a confecção de camadas de base em estradas de baixo volume de tráfego. Além de suas propriedades técnicas, a utilização desse material contribui para a redução do impacto ambiental, visto que a escória é

um subproduto da indústria siderúrgica e sua reutilização evita o descarte inadequado em aterros sanitários.

Por um outro lado, a poluição do ar é um problema ambiental grave e persistente para muitas indústrias em todo o mundo. Os gases poluentes, como o dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂), óxido nítrico (NO_x) e emissões de poeira são liberados como subprodutos das atividades industriais, contribuindo para a deterioração da qualidade do ar e conseqüentemente para a saúde humana e dos ecossistemas (Purnomo, *et al.* 2018). Nesse contexto, a dessulfuração do aço no reator Kambara não é exceção, pois também emite poluentes para a atmosfera.

Para minimizar o impacto ambiental gerado pela dessulfuração do ferro-gusa, é necessário adotar medidas de controle de emissão de poluentes, como o uso de filtros de manga. Os filtros de manga são equipamentos industriais desenvolvidos para controlar e capturar a emissão de partículas e gases, separando-os durante a liberação dos gases industriais. Em essência, os filtros de manga funcionam por meio do processo de filtração mecânica, onde as partículas poluentes são separadas do ar através da gravidade e o uso de um elemento de filtro (o tecido das mangas). No processo de dessulfuração do aço pelo reator Kambara, filtros de manga são utilizados para reduzir a emissão de poeira. Durante o processo, os gases e poeira são capturados na entrada dos filtros de mangas e conduzidos para o interior das mangas através de um duto lateral que reduz a velocidade do ar contaminado. As partículas poluentes ficam retidas no tecido das mangas, tornando o ar limpo.

O processo de limpeza dos filtros de mangas gera um coproduto. A filtração de ar do processo de dessulfuração no reator Kambara gera uma fração de resíduo, nomeada pó do despoeiramento da dessulfuração KR ou pó de KR. O pó do filtro de mangas refere-se às pequenas partículas de pó que são coletadas pelos filtros de bolsa em sistemas de filtração de ar e controle de poluição do ar. Os filtros de bolsa são comumente utilizados para capturar e remover partículas pequenas de processos industriais ou emissões, como na produção de cimento, usinas de energia e outras instalações de fabricação.

Estes filtros são compostos por numerosas pequenas bolsas de filtro que são preenchidas com vários materiais de filtração, como fibra de vidro ou fibras sintéticas. À medida que o ar contendo poeira e matéria particulada passa pelas bolsas de filtro, as partículas ficam presas nas

superfícies das bolsas, permitindo que o ar limpo passe e seja liberado na atmosfera. O pó do filtro de manga coletado é normalmente descartado ou reciclado, dependendo dos materiais específicos e regulamentos na região. Práticas adequadas de descarte são cruciais para evitar qualquer dano ao meio ambiente ou à saúde pública.

A presente pesquisa tem como objetivo avaliar o potencial de utilização do pó gerado no processo de filtragem da dessulfuração do ferro gusa no reator Kambara, denominado pó da dessulfuração KR (KRSP), como agente estabilizador de solo argiloso para pavimentação. Serão realizados experimentos laboratoriais para investigar a composição química, características físicas e propriedades mecânicas dos materiais puros e misturas envolvendo diferentes proporções de KRSP (3% e 5% em peso) para o seu uso em camadas de pavimentação. Dentre as análises a serem realizadas destacam-se a fluorescência de Raios-X (XRF) e a difratometria de Raios-X (XRD) para a determinação da composição química do KRSP e dos solos argilosos utilizados, bem como a distribuição de tamanho de grão. Adicionalmente, serão realizados ensaios para determinação do Potencial Hidrogeniônico (pH), massa específica, limites de consistência, compactação no Proctor intermediário, índice suporte California, resistência à compressão simples e testes de módulo resiliente e deformação permanente.

Os resultados obtidos serão avaliados em termos de melhoria das propriedades mecânicas do solo argiloso, principalmente em relação à resistência mecânica, deformabilidade e durabilidade, para uso em camadas de pavimentação. Espera-se que o uso do KRSP como agente estabilizador possa trazer ganhos técnicos e econômicos para a pavimentação, além de minimizar a geração de resíduos resultantes do processo de dessulfuração do ferro gusa.

1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho propõe uma investigação das propriedades e do comportamento de um solo argiloso estabilizado com coproduto tipo KR. Mais especificamente, este estudo tem como objetivo geral avaliar o desempenho desse material em termos de estabilização para pavimentação, considerando um percentual de adição de 3% e 5% em peso. Para tanto, são empregados ensaios químicos, físicos e mecânicos, de forma a se obter uma ampla avaliação das características do solo em questão. Os objetivos específicos desta pesquisa são:

Em primeiro lugar, é realizada uma caracterização detalhada do coproduto pó de KR, com o intuito de avaliar suas propriedades físicas e químicas.

Em seguida, são determinados os parâmetros físicos do solo argiloso. Os parâmetros são analisados incluindo a umidade ótima, e densidade máxima de compactação. Os ensaios são realizados de acordo com as normas técnicas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT).

Posteriormente, são realizados ensaios de caracterização mecânica das misturas solo-KRSP, a fim de avaliar seu comportamento sob diferentes condições de carregamento. Ensaios de compactação, índice suporte Califórnia, resistência à compressão simples, módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP), permitirão avaliar as propriedades de resistência e deformação das misturas, bem como a sua capacidade de suportar cargas de tráfego.

Por fim, é avaliada a viabilidade técnica do uso de misturas solo-KRSP em camadas estruturais de pavimentos, tendo como referência as normas técnicas e especificações do DNIT. Nesse sentido, será avaliado se as misturas atendem aos requisitos de resistência e deformação exigidos pelas normas, bem como sua durabilidade e estabilidade ao longo do tempo.

Com base nesses objetivos específicos, espera-se obter resultados que permitam avaliar a possibilidade de utilização do pó de KR como coproduto na estabilização de solos para a construção de pavimentos, bem como as condições de uso e as limitações dessa técnica.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação tem como intuito estudar e avaliar a estabilização de um solo argiloso com o coproduto pó de KR. A motivação para este trabalho se dá pela necessidade de soluções sustentáveis e economicamente viáveis para o uso de resíduos e coprodutos da indústria siderúrgica em aplicações de engenharia civil, em especial na construção de rodovias.

O Capítulo 1, consiste em uma introdução aos temas abordados na dissertação, com destaque para a motivação e objetivos do estudo. Além disso, é apresentada a estrutura do trabalho, que será detalhada nos demais capítulos.

O Capítulo 2, é dedicado à fundamentação teórica da dissertação, que aborda diversos conceitos e aspectos relacionados à produção do aço, resíduos e coprodutos siderúrgicos, características da escória KR, bem como seu uso em obras rodoviárias, seja de forma isolada ou em misturas com outros materiais. Apresentando estudos relacionados à estabilização de solos com a utilização de resíduos, incluindo pó de filtro de mangas e escórias de aciaria.

O Capítulo 3, descreve os materiais utilizados na realização dos ensaios laboratoriais, bem como os procedimentos adotados para a produção de resultados e atingir os objetivos alvo do estudo. Também é apresentado um fluxograma com as etapas da pesquisa.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios laboratoriais realizados, com destaque para as interpretações e discussões dos resultados obtidos com os descritos na literatura. Dessa forma, é possível avaliar a eficácia da estabilização de solos com a utilização da escória KR e pó de filtro de mangas.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões da dissertação, destacando-se os principais marcos do trabalho. Abordando pontos específicos acerca do comportamento das estabilizações de solo-KRSP estudadas, bem como sugestões para complementação dos estudos desenvolvidos nesta dissertação, visando aprimorar as técnicas e os materiais utilizados.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Diante da extensão territorial do Brasil, a malha rodoviária nacional é considerada uma das maiores do mundo, totalizando 1,72 milhão de quilômetros (CNT, 2022). Contudo, apenas 12,40% dessa extensão é pavimentada, o que evidencia um grande desafio para a operação de transporte de cargas, em especial nas regiões mais remotas do país. O modal rodoviário é o mais utilizado pelas empresas embarcadoras no Brasil, representando cerca de 75,9% dos serviços de transporte, seguido do modo marítimo (9,2%) e aéreo (5,8%), conforme demonstrado na Figura 1. É importante notar que a infraestrutura logística do país ainda enfrenta limitações relacionadas à capacidade operacional e qualidade dos serviços, o que afeta a competitividade do setor em escala global.

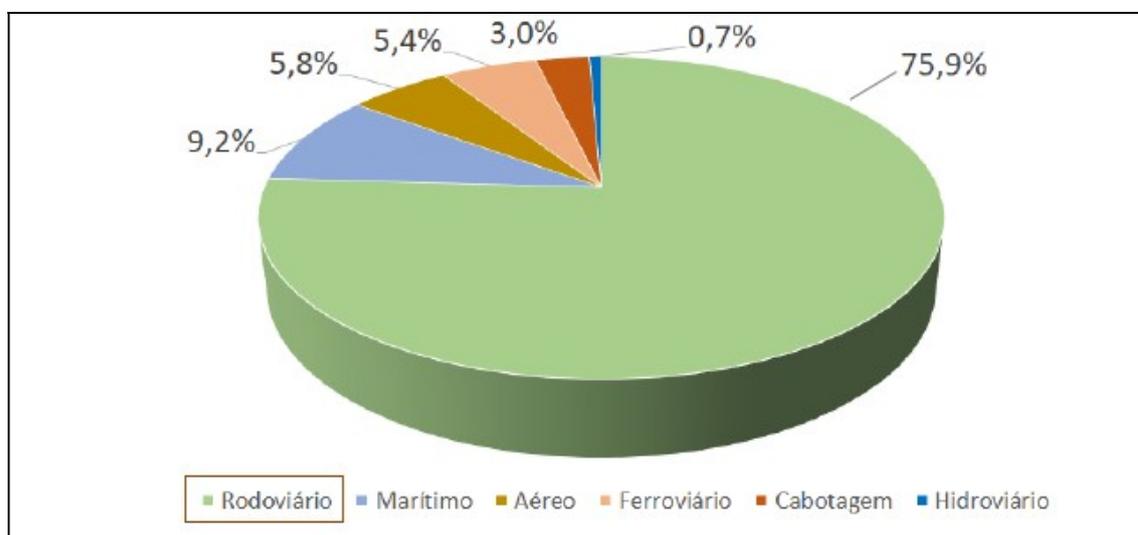


Figura 1. Divisão modal dos serviços de transporte utilizados por empresas embarcadoras (Resende, 2018).

No que tange às operações logísticas das empresas embarcadoras, as rodovias brasileiras apresentam um alto nível de dependência, obtendo uma média geral ponderada de 4,7 em uma escala que varia de 1 (não dependente) a 5 (extrema dependência), segundo dados divulgados por Resende (2018). À frente da dependência das rodovias, destacam-se os profissionais

qualificados e as máquinas e equipamentos, ambos com média geral ponderada de 4,5. O cenário descrito evidencia a importância do investimento em infraestrutura logística no país para o fortalecimento da competitividade das empresas brasileiras no mercado global. As rodovias, em especial, demandam ações de modernização e pavimentação, visando a redução de custos logísticos e melhoria da eficiência operacional. Além disso, é fundamental investir na qualificação dos profissionais e na modernização dos equipamentos, de modo a alavancar a produtividade e a qualidade dos serviços prestados.

No tocante ao tema da pavimentação, uma das grandes questões que se impõe aos órgãos responsáveis pela construção de rodovias no Brasil consiste na escassez de materiais adequados para a composição de camadas de base e sub-base em pavimentos (Gonçalves, 2016). Soma-se a essa dificuldade a prática insustentável que é a extração mineral de materiais naturais, fato que agravar ainda mais o cenário, na medida em que agride o meio ambiente (Gautam *et al*, 2018). Cabe destacar, ademais, a insuficiência de recursos financeiros para viabilizar o processo de construção, manutenção e recuperação de pavimentos, o que torna ainda mais premente a análise de alternativas viáveis e compatíveis com essa realidade, dentre as quais destaca-se a possibilidade de utilização do solo como matéria-prima fundamental na construção de pavimentos.

Diante desse contexto, é necessário considerar que as diferentes soluções de pavimentação variam em função da disponibilidade de solos e de suas características, sendo decisivo o impacto dessa escolha nos custos e no ambiente (Gomes *et al*, 2021). Nessa perspectiva, emerge como desafio a identificação de soluções tecnológicas inovadoras que permitam a utilização otimizada de materiais encontrados nas sub-regiões, possibilitando a construção de um modelo de pavimentação mais sustentável e adaptado às especificidades das diferentes regiões do país. Isso implica, entre outras coisas, na análise da capacidade técnica dos solos disponíveis, de modo a garantir a qualidade necessária às estruturas rodoviárias, sem comprometer os princípios da sustentabilidade ambiental, econômica e social.

A infraestrutura rodoviária é um elemento crucial para o desenvolvimento econômico de um país, pois permite a eficiência no transporte de mercadorias e pessoas. Dessa forma, a disponibilidade e qualidade das rodovias pavimentadas representam uma condição fundamental para a expansão econômica de um país. Na análise do cenário global, o Brasil encontra-se em

uma posição desfavorável quando o assunto é a densidade de sua malha rodoviária pavimentada em relação a nações com dimensões territoriais e econômicas semelhantes. Esta característica é evidenciada na Figura 2, que ilustra a comparação do Brasil com países como China, Estados Unidos, Rússia, Canadá, Uruguai, Argentina e Equador. É notável que a China possui a maior densidade de malha rodoviária pavimentada, totalizando 447,0 km/mil km², seguido pelos Estados Unidos com 437,8 km/mil km². Em comparação, o Brasil conta com uma densidade de apenas 25,1 km/mil km², uma diferença significativa em relação às nações líderes deste indicador.

Além disso, os países latino-americanos como Uruguai, Argentina e Equador possuem densidades consideravelmente maiores que o Brasil, com valores de 43,9 km/mil km², 42,3 km/mil km² e 31,4 km/mil km², respectivamente. De forma semelhante, o Canadá, com uma densidade de 41,6 km/mil km², apresenta uma infraestrutura mais desenvolvida em transportes rodoviários em comparação com a realidade brasileira.

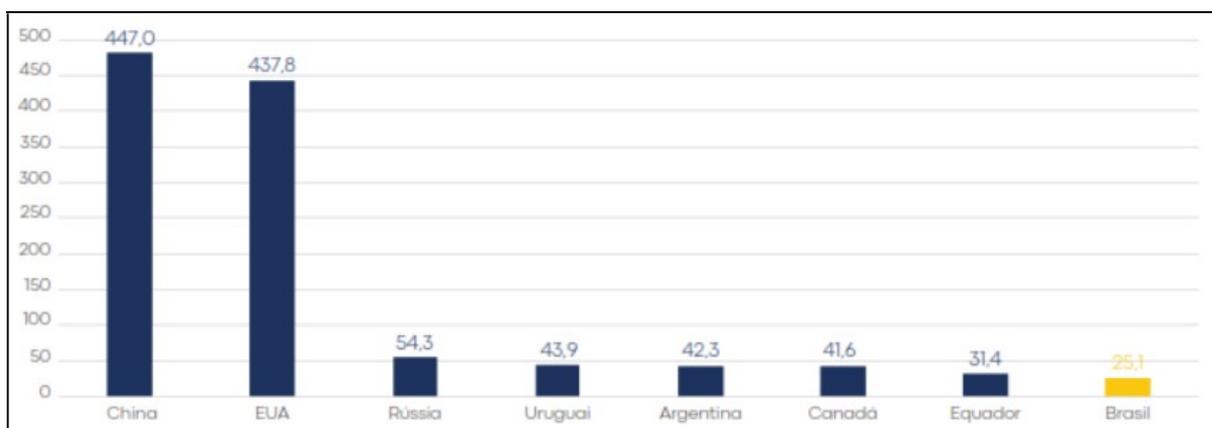


Figura 2. Densidade da malha rodoviária pavimentada por país (valores em km/mil km²) (CNT, 2022).

A infraestrutura inadequada das rodovias no Brasil possui impactos significativos nos custos operacionais e na competitividade dos produtos nacionais. O tráfego em vias em más condições resulta em maior necessidade de manutenção dos veículos, aumento no consumo de combustível e elevação dos preços dos produtos. Esses fatores têm um efeito negativo na economia do país. No entanto, é importante destacar que o Brasil tem uma posição de destaque na produção de ferro, sendo um dos maiores produtores do mundo. Além disso, ocupa a nona posição em produção de aço, o que leva ao surgimento de resíduos e coprodutos provenientes desse processo.

Segundo o Instituto Aço Brasil (IABr, 2022), esses coprodutos e resíduos derivados da produção de aço bruto são reaproveitados de forma sustentável. Por exemplo, o agregado siderúrgico proveniente desses materiais é utilizado na pavimentação de vias como revestimento primário, bases e sub-bases, substituindo a brita e outros materiais na construção civil. Esse aproveitamento dos passivos ambientais da produção de aço desperta um grande interesse no setor da construção civil e de pavimentos. O uso desses materiais alternativos não apenas contribui para a melhoria da infraestrutura rodoviária, mas também auxilia na redução de custos e na sustentabilidade ambiental do setor, ao promover a reutilização de resíduos industriais. Portanto, é fundamental buscar soluções técnicas eficientes que possam melhorar a qualidade das rodovias brasileiras, levando em consideração o potencial de aproveitamento desses coprodutos e resíduos provenientes da produção de aço. Dessa forma, é possível promover o desenvolvimento sustentável do país, aumentar a competitividade dos produtos nacionais e impulsionar a economia.

2.2. PAVIMENTAÇÃO

O pavimento, conforme estabelecido pela norma brasileira de pavimentação NBR 7207/82 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), é uma estrutura complexa e essencial no processo de construção rodoviária. Após a terraplenagem, o pavimento é construído com o objetivo de cumprir simultaneamente diversas funções fundamentais. A primeira delas é resistir e distribuir os esforços verticais gerados pelo tráfego, garantindo a integridade do subleito. Além disso, o pavimento é responsável por melhorar as condições de rolamento, proporcionando conforto e segurança aos usuários. Por fim, ele deve resistir aos esforços horizontais, prolongando a durabilidade da superfície de rolamento (Medina, 2015).

De acordo com Senço (2008), o pavimento pode ser definido como uma estrutura composta por várias camadas, cada uma com uma espessura finita, que é assentada sobre um semiespaço infinito. Essa estrutura exerce a função de fundação para a obra, conhecido como subleito. A complexidade do pavimento resulta da necessidade de realizar múltiplos requisitos técnicos e operacionais, visando garantir sua adequação e resistência mecânica ao longo do tempo. Dessa forma, o projeto e a execução do pavimento devem ser realizados mediante um planejamento cuidadoso e rigoroso, a fim de garantir a segurança dos usuários, a eficiência do rolamento e a

durabilidade da superfície de rodagem. A correta seleção de materiais, espessuras e técnicas construtivas é fundamental para atender às exigências estabelecidas pela norma e para garantir a eficácia do pavimento como estrutura de fundação.

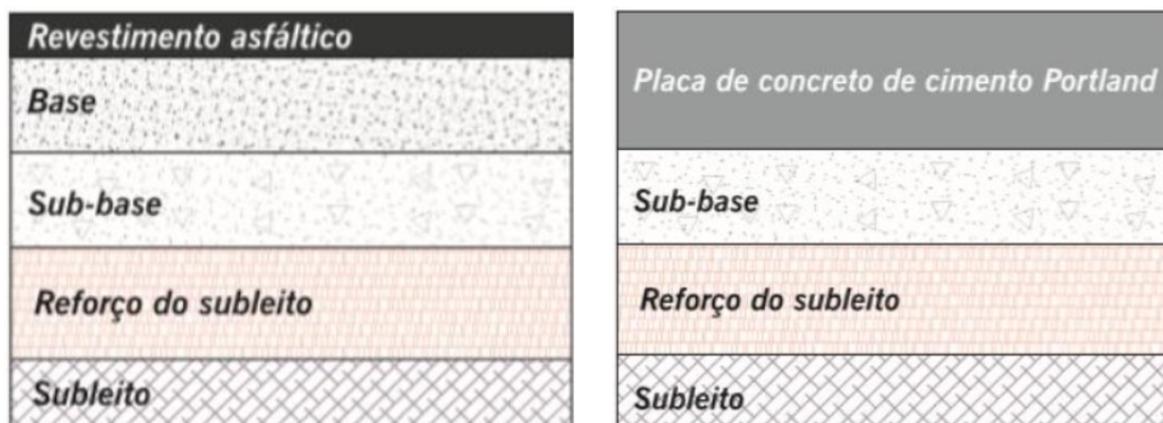
Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT, 2006), dentro do campo de pavimentação, os pavimentos podem ser categorizados em três tipos principais: pavimentos rígidos, flexíveis e semirrígidos. Essas classificações são baseadas nos materiais utilizados na construção das diversas camadas do pavimento.

O pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem uma deformação elástica significativa sob uma carga aplicada. Como resultado, a carga é distribuída de forma aproximadamente equivalente entre as diferentes camadas. Esse tipo de pavimento é comumente utilizado em estradas e vias de alto tráfego, pois sua flexibilidade permite absorver as tensões impostas pelo tráfego de veículos de maneira mais uniforme (DNIT, 2006).

Já o pavimento semirrígido é caracterizado por uma base cimentada com propriedades cimentícias. Essa base é construída utilizando um aglutinante à base de cimento, que confere ao pavimento uma rigidez intermediária entre os pavimentos rígidos e flexíveis. Esse tipo de pavimento é frequentemente utilizado em estradas secundárias e vias urbanas, onde o tráfego é menos intenso e as cargas impostas são menores (DNIT, 2006).

Por fim, o pavimento rígido é aquele em que o revestimento possui uma alta rigidez em relação às camadas inferiores. Como resultado, ele absorve praticamente todas as tensões provenientes da carga aplicada. Esse tipo de pavimento é amplamente utilizado em aeroportos, pátios industriais e outras áreas de alta carga, onde a necessidade de resistência e durabilidade é maior (DNIT, 2006).

Em suma, a classificação dos pavimentos em rígidos, flexíveis e semirrígidos é fundamental para entender as características e propriedades de cada tipo de pavimento e para garantir a adequação do pavimento às necessidades de cada projeto de infraestrutura e transporte. A Figura 3 ilustra as estruturas de um pavimento de tipo flexível e tipo rígido, destacando as diversas camadas que os constituem.



(a) Pavimento flexível (b) Pavimento rígido
 Figura 3. Camadas que constituem os pavimentos rodoviários (Bernucci *et al.*, 2010).

As diferentes camadas que constituem os diversos tipos de pavimentos rodoviários são essenciais para garantir a resistência e durabilidade das estradas. Essas camadas são categorizadas da seguinte forma (Medina, 2015; Senço, 2008; Nepomuceno, 2019):

- **Subleito:** é o elemento que compõe a fundação do pavimento, sendo o terreno sobre o qual todas as outras camadas são construídas. É responsável por suportar e distribuir as cargas verticais do tráfego;
- **Reforço do subleito:** consiste em uma camada de espessura constante que complementa a sub-base. Sua principal função é resistir e distribuir as cargas verticais do tráfego, não possuindo a capacidade de absorver completamente essas cargas, que é uma característica exclusiva do subleito;
- **Sub-base:** intervém como uma camada corretiva do subleito, ou seja, é responsável por corrigir e aprimorar as características do subleito. Além disso, tem como objetivo reduzir a espessura da base, o que resulta em economia para a construção do pavimento;
- **Base:** é a camada fundamental do pavimento, destinada a resistir e distribuir as cargas verticais provenientes do tráfego. Além disso, possui a função de permitir a drenagem da água que se infiltra no pavimento, através de sistemas de drenagem, e de resistir às tensões e deformações.

- Por fim, o **revestimento**: também conhecido como capa de rolamento, é a camada sobre a qual os veículos trafegam diretamente. É ideal que essa camada seja o mais impermeável possível para garantir a durabilidade do pavimento. Suas principais funções são melhorar as condições de rolamento em termos de conforto e segurança e resistir aos esforços horizontais atuantes sobre ela.

No que se refere às bases e sub-bases, destaca-se a possibilidade de classificação dessas estruturas em duas categorias distintas, a saber, flexíveis e semirrígidas, com base nos materiais utilizados em sua composição, conforme ilustrado de forma clarificadora na Figura 4.

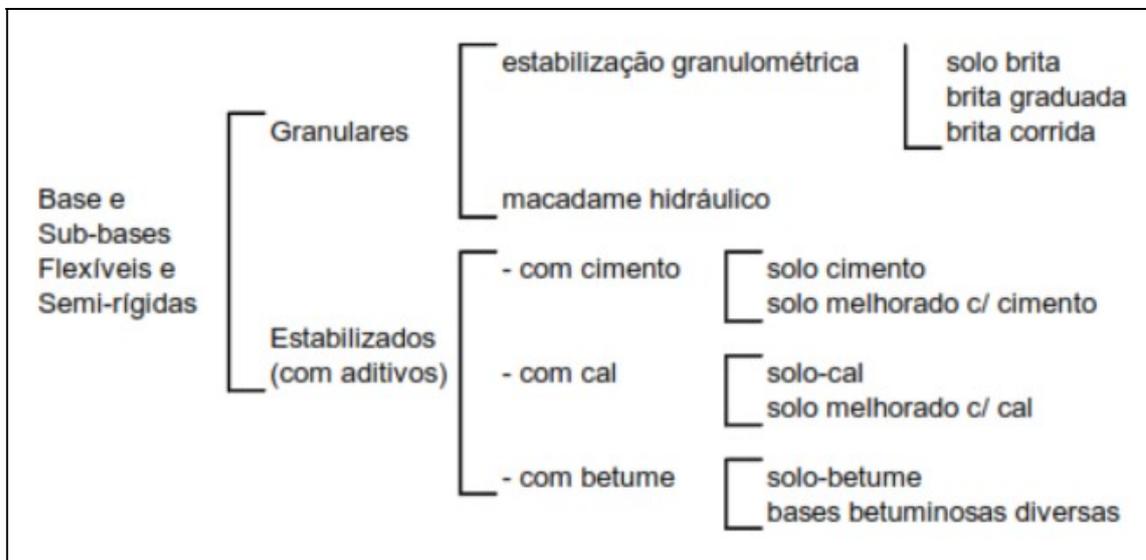


Figura 4. Classificação das bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas (DNIT, 2006).

A seleção dos materiais que compõem as diferentes camadas do pavimento é uma etapa crucial no processo de projeto de um pavimento rodoviário. Essa seleção é baseada em critérios técnicos e considera, principalmente, as características dos materiais disponíveis no mercado, bem como as normas técnicas estabelecidas pelo país.

No entanto, é comum que os materiais disponíveis não atendam plenamente ou em parte os requisitos necessários para seu uso na pavimentação. Isso ocorre devido a fatores como a variação nas características dos materiais e a deterioração ao longo do tempo de uso.

Para contornar essa questão, técnicas de estabilização são amplamente empregadas visando melhorar as propriedades dos materiais utilizados no pavimento. Essas técnicas consistem em

aplicar tratamentos específicos aos materiais, de forma a torná-los mais adequados para o seu uso na construção de pavimentos. Dentre as técnicas de estabilização mais comumente utilizadas, destacam-se a adição de ligantes, como cimentos, cal e asfalto, para melhorar a coesão e resistência dos materiais. Além disso, podem ser utilizados também materiais granulares, como pedras britadas, para conferir maior durabilidade ao pavimento (Oliveira Bridi, 2020; Schumacher, 2018; Gotardi, 2015).

Em alguns casos, quando os materiais disponíveis são de baixa qualidade, a estabilização química pode ser necessária. Essa técnica consiste em aplicar produtos químicos aos materiais, visando melhorar suas características físicas e aumentar sua estabilidade. Alguns exemplos de produtos químicos utilizados são os estabilizantes à base de sulfato de cálcio e os polímeros modificados (Ramos, 2018; Andrade 2018).

É importante ressaltar que a escolha da técnica de estabilização a ser utilizada deve levar em consideração as características específicas do local de construção do pavimento, bem como a análise técnica e econômica para determinar a solução mais adequada. Além disso, é imprescindível que todas as etapas do processo de estabilização sejam devidamente monitoradas e controladas, a fim de garantir a qualidade e desempenho do pavimento.

2.3. ESTABILIZAÇÃO E MELHORAMENTO DE SOLOS

Segundo Cristelo (2001 *apud* Nepomuceno 2019), o solo natural constitui-se de um material complexo e variável, e quase sempre inviável para ser utilizado em conformidade com as normas técnicas e os requisitos necessários. Caso a utilização do solo seja necessária, uma alteração das suas propriedades tem que ser feita, criando desta maneira um novo material que atenda as características e propriedades para o uso em camadas de base e sub-base em pavimentos. Esse processo é denominado estabilização de solos. Para Soliz (2007), a estabilização de solo é definida como um conjunto de métodos que promovem a alteração de propriedades, de forma a melhorar seu comportamento sob o ponto de vista da engenharia. Consiste em um tratamento por meio de processos físicos, mecânicos ou químicos, tornando o solo estável para o seu uso.

Medina e Motta (2015), afirmam que a estabilização visa, geralmente, modificar a resistência ao cisalhamento, permeabilidade e a compressibilidade dos solos. E para Senço (2001), a resistência ao cisalhamento e resistência à deformação são características que um solo deve apresentar. A condição de resistência ao cisalhamento deve garantir que o solo resista às tensões oriundas do tráfego de veículos, sem se romper.

A decisão a respeito do método de estabilização a ser adotado é condicionada por diversos fatores, tais como o aspecto financeiro, a finalidade da construção e as propriedades dos materiais e dos solos envolvidos (Lopes, 2011). Do ponto de vista técnico, existem duas abordagens principais de estabilização: a estabilização mecânica e a estabilização química.

A estabilização mecânica de solos é um método amplamente utilizado na engenharia civil com o objetivo de ajustar as características do solo de acordo com as necessidades do projeto. Esse processo consiste na adição ou retirada de partículas do solo, a fim de obter uma distribuição granulométrica específica que atenda às normas técnicas estabelecidas. Essa distribuição granulométrica busca preencher os vazios entre os grãos maiores com os grãos médios, e os vazios entre estes com os grãos menores, resultando em uma compactação eficiente (Rodrigues, 2018). Além disso, a compactação é complementada pela aplicação de cargas, com o objetivo de reduzir a porosidade do solo.

As alterações volumétricas decorrentes da eliminação do ar dos vazios são acompanhadas por mudanças na condutividade hidráulica e na resistência mecânica do solo (Pinto, 2006). Essas mudanças serão influenciadas pela quantidade de energia aplicada durante o processo de estabilização e pela umidade presente no solo. Portanto, a estabilização mecânica de solos se mostra como uma técnica fundamental para garantir a segurança e o bom desempenho das estruturas civis, uma vez que permite controlar as características do solo e adequá-lo às exigências do projeto. É um processo que envolve conhecimento técnico a fim de garantir a eficácia na estabilização e a durabilidade das estruturas construídas sobre esses solos estabilizados.

A estabilização química do solo é uma técnica utilizada com o objetivo de aprimorar as propriedades físicas e mecânicas do solo, sobretudo sua resistência ao cisalhamento, por meio da adição de ligantes que promovem o contato entre as partículas (Pedreira e Goularte, 2009). Estes

ligantes podem ser compostos por uma ampla variedade de materiais, muitas vezes não comumente utilizados na construção civil. Dentre os aditivos mais populares destacam-se o cimento, a cal e produtos industrializados (Furieri, 2019). A melhoria da resistência mecânica, deformabilidade e permeabilidade do solo é alcançada por meio do processo de formação de fases sólidas na massa do solo, que preenchem os vazios existentes e promovem a união entre os grãos adjacentes. Este fenômeno resulta na compactação e consolidação do solo, conferindo-lhe maior estabilidade e resistência aos esforços de cisalhamento. Além disso, a presença dessas fases sólidas também contribui para a redução da deformabilidade do solo, tornando-o mais rígido e menos suscetível a fenômenos de adensamento induzidos por cargas aplicadas.

Cabe ressaltar que a adição de ligantes no solo deve ser realizada de forma criteriosa, levando em consideração as características do solo a ser estabilizado, bem como as propriedades desejadas para o solo estabilizado. A dosagem adequada do ligante é crucial para alcançar os resultados desejados, pois a adição em excesso pode resultar em uma rigidez excessiva e diminuição da permeabilidade do solo, enquanto a adição insuficiente pode não fornecer a resistência mecânica desejada. Além disso, é importante ressaltar que a estabilização química do solo é uma técnica bastante versátil, podendo ser aplicada em diversos tipos de solos, tais como argilosos, arenosos e siltoargilosos. No entanto, é fundamental que sejam realizados ensaios laboratoriais e estudos de viabilidade técnico-econômica antes da aplicação da técnica em escala real, a fim de garantir sua eficácia e sustentabilidade (Cristelo, 2001; Soliz, 2017; Medina e Motta, 2015; Lopes, 2011).

Em suma, a estabilização química do solo é uma técnica eficiente e promissora para a melhoria das propriedades físicas e mecânicas do solo, contribuindo para a viabilização e segurança de diversas obras civis. A escolha adequada dos ligantes e dosagens, aliada a estudos laboratoriais e análises técnicas, são fundamentais para o sucesso dessa técnica, que vem se mostrando uma alternativa viável e econômica para a estabilização de solos em diferentes contextos de engenharia civil (Oliveira Bridi, 2020; Schumacher, 2018; Gotardi, 2015).

De acordo com as pesquisas de Wang (2002), é possível realizar a estabilização química em praticamente todos os tipos de solos. Entretanto, existem algumas exceções a essa regra, que incluem os solos orgânicos, argilas excessivamente plásticas e solos arenosos com baixa capacidade de reação. É importante ressaltar que, dentro da faixa de quantidades de finos

passantes na peneira N° 200, normalmente o intervalo de 5% a 35% é o mais ideal economicamente para a obtenção de um material estabilizado quimicamente (Wang, 2002).

Conforme apontado por Medina e Motta (2015), a mistura entre solo e estabilizador pode apresentar diferentes configurações. No caso da matriz contínua, o agente estabilizador preenche todos os poros e as partículas de solo ficam imersas nele como se fossem um meio de enchimento inerte. Já na matriz descontínua, nem todos os poros são preenchidos pelo estabilizador, resultando em três possíveis modos de ação: (1) modificação das características superficiais das partículas dos solos, (2) vedação inerte dos poros e (3) interconexão pontual entre as partículas do solo.

A seleção do agente estabilizante a ser utilizado deve ser fundamentada no resultado desejado a ser incorporado ao solo. Para isso, é necessário conduzir ensaios laboratoriais visando avaliar a efetividade do processo de estabilização.

2.4. AÇO E ESCÓRIA KR

No contexto global, a indústria siderúrgica brasileira desempenhou um papel significativo no ano de 2021, alcançando uma participação de 1,85% na produção mundial de aço bruto. Essa posição coloca o Brasil em nono lugar no ranking dos maiores produtores de aço bruto, liderado pela China, cuja contribuição representa impressionantes 52,9%, equivalente a 1,03 bilhões de toneladas (OECD, 2022; IABr, 2020; IABr, 2022).

Analisando a situação de forma regional, fica evidente que o Brasil é o principal produtor de aço bruto na América Latina (IABr, 2020; IABr, 2022), respondendo por expressivos 55,8% da produção nessa região. Essa posição de destaque reforça o papel fundamental do país na indústria siderúrgica latino-americana.

Quanto à produção interna do Brasil, é importante destacar que os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo foram responsáveis por aproximadamente 28,63 milhões de toneladas de aço bruto, o que representa cerca de 79,4% da produção total do país em 2021, que foi de 36,1 milhões de toneladas (IABr, 2022).

Esses números impressionantes refletem o potencial da indústria brasileira do aço e sua capacidade de contribuir significativamente para o crescimento econômico e desenvolvimento nacional. Além disso, reafirmam a importância estratégica do setor dentro e fora das fronteiras brasileiras, consolidando o país como um protagonista no panorama mundial da produção de aço bruto (OECD, 2022; IABr, 2020; IABr, 2022).

A produção de aço é um processo complexo e crucial para a indústria metalúrgica. A matéria-prima essencial para a fabricação de aço é o minério de ferro, que é combinado com cal em uma proporção adequada para dar início ao processo de produção. Ao longo de cinco etapas distintas, o aço é obtido a partir dessa combinação de materiais (IABr, 2020; IABr, 2022).

A primeira etapa, conhecida como preparação da carga, consiste em selecionar e preparar os materiais necessários para a produção de aço, como o minério de ferro e a cal. É importante que esses materiais sejam triturados e misturados adequadamente para garantir a qualidade do produto final (IABr, 2020; IABr, 2022).

A segunda etapa, chamada de redução, é responsável por transformar o minério de ferro encontrado na natureza em ferro metálico. Para isso, é utilizado um alto forno, onde ocorre a combinação do minério de ferro com o carbono presente no coque. Esse processo libera dióxido de carbono e resulta na formação de ferro líquido, chamado de ferro-gusa (IABr, 2020; IABr, 2022).

A terceira etapa, denominada refino, é essencial para a obtenção do aço de alta qualidade. Nessa etapa, o ferro-gusa passa por um processo de remoção de impurezas indesejadas, como o carbono excessivo e elementos não desejados. Diversos métodos de refino podem ser utilizados, como a oxidação do ferro-gusa em um conversor ou a utilização de escórias.

Após o refino, o aço é submetido à etapa de lingotamento, onde é moldado em lingotes que serão utilizados posteriormente para a fabricação de produtos específicos. Esse processo é realizado em máquinas de lingotamento contínuo, que possibilitam a produção eficiente do aço em larga escala (IABr, 2020; IABr, 2022).

Por fim, na quinta etapa, conhecida como laminação, o aço é transformado em chapas, barras ou outros formatos específicos, de acordo com a demanda do mercado. Esse processo ocorre em

laminações a quente, onde o aço é aquecido e passado entre cilindros que exercem pressão, conferindo as características desejadas ao material (IABr, 2020; IABr, 2022).

Em síntese, a produção de aço é um processo que envolve a combinação precisa de minério de ferro e cal em diferentes etapas, desde a preparação da carga até a laminação final. Cada etapa desempenha um papel fundamental na obtenção de aço de alta qualidade, utilizado em inúmeras aplicações industriais e construção civil. A Figura 5 ilustra de forma clara as etapas de produção do aço a partir de diferentes materiais, evidenciando sua importância para a sociedade moderna.

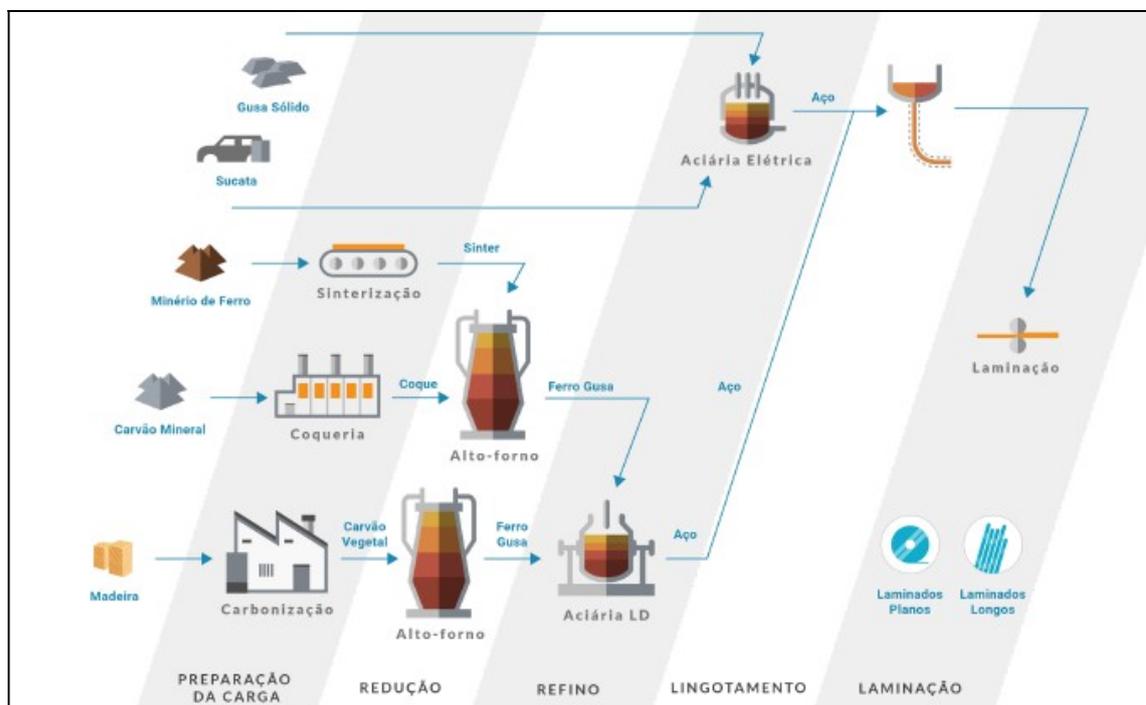


Figura 5. Etapas de produção do aço (IABr, 2021).

No âmbito do processo siderúrgico, juntamente com a produção de aço, são produzidos diversos coprodutos e resíduos indesejados, cujo destino tradicional seria a deposição em aterros sanitários. Contudo, com o avanço tecnológico, tem-se desenvolvido métodos e técnicas que permitem a valorização e a utilização ambientalmente adequada desses materiais, permitindo sua reintegração como matéria-prima para diversas finalidades, tais como a pavimentação de estradas, a correção de solos, a produção de cimento, a fabricação de materiais cerâmicos, e outras aplicações.

Essa prática de reaproveitamento dos coprodutos e resíduos oriundos do processo siderúrgico traz inúmeros benefícios dentro do contexto de uma economia circular. Dentre eles, destacam-se a preservação de recursos naturais não renováveis, uma vez que o uso desses materiais secundários permite reduzir a demanda por recursos primários, como minério de ferro. Além disso, a utilização desses coprodutos e resíduos como matéria-prima alternativa também contribui para a redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas ao processo de produção de aço a partir do minério de ferro.

No processo siderúrgico, são geradas principalmente duas categorias de coprodutos e resíduos: a escória de alto-forno e de aciaria, e os pós e lamas resultantes dos sistemas de controle atmosféricos (NSA, 2013 *apud* Oliveira Bridi, 2020; IABr, 2021). A escória, proveniente dos fornos utilizados na produção de ferro-gusa, apresenta propriedades cimentícias e pode ser empregada como substituto parcial do cimento em concretos e argamassas, bem como na pavimentação de estradas. Já os pós e lamas resultantes dos sistemas de controle atmosféricos, também conhecidos como poeiras e lamas siderúrgicas, podem ser utilizados na correção de solos agrícolas, na fabricação de cerâmicas, e em outros processos industriais.

Em suma, a valorização dos coprodutos e resíduos gerados pelo processo siderúrgico apresenta-se como uma solução inovadora e sustentável, ao possibilitar o aproveitamento desses materiais como recursos secundários, em detrimento de sua deposição em aterros sanitários. Essa prática contribui para a promoção de uma economia circular, ao reduzir a demanda por recursos naturais não renováveis e as emissões de CO₂ associadas ao processo de produção de aço. Portanto, o reaproveitamento desses materiais apresenta-se como uma alternativa viável e ambientalmente adequada, alinhada aos princípios da sustentabilidade e da preservação ambiental.

Em 2020, o setor siderúrgico foi responsável pela geração de um total de 17 milhões de toneladas de coprodutos e resíduos diretos. Essa quantidade pode ser avaliada através de uma taxa de geração específica de coprodutos e resíduos, que atingiu a marca de 622 kg por tonelada de aço bruto produzido. É importante ressaltar que esses resíduos podem ser classificados de acordo com seu tipo, sendo eles: agregado de alto-forno (40%), agregado de aciaria (25%), finos e pós (6%), lamas (4%) e outros coprodutos e resíduos (25%) (IABr, 2020; IABr, 2022).

Um fato relevante a ser mencionado é que mais de 90% dos coprodutos e resíduos gerados durante o processo de produção do aço são reaproveitados. Um exemplo disso é o uso do agregado siderúrgico na pavimentação de vias, onde ele pode substituir a brita e outros materiais na construção civil, atuando como revestimento primário, base e sub-base. Além disso, a escória de alto-forno tem sido utilizada na fabricação de cimento (IABr, 2021).

Com base nos dados de 2020, a Figura 6 ilustra a distribuição dos coprodutos e resíduos por tipo, bem como sua destinação.

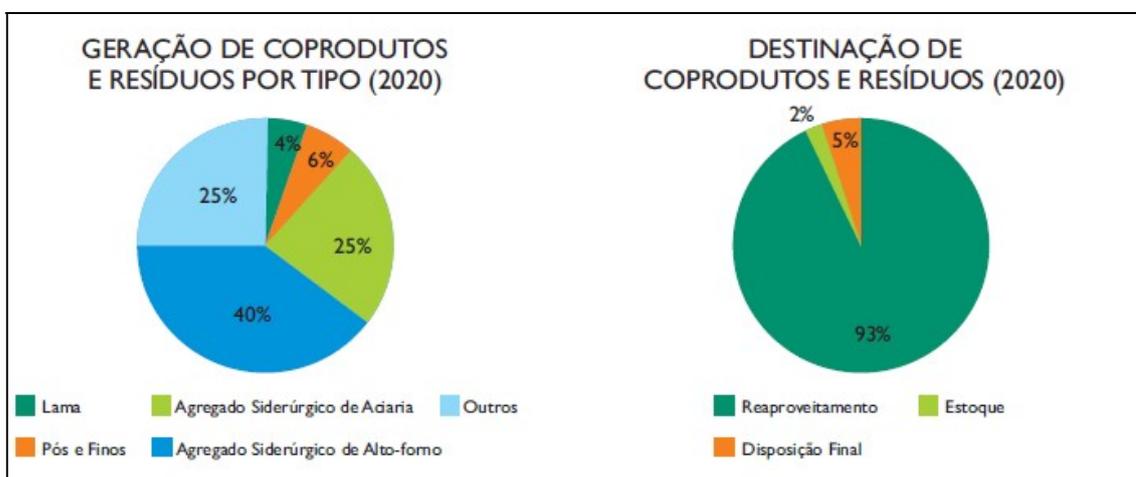


Figura 6. Geração e destinação de coprodutos e resíduos siderúrgicos (IABr, 2021).

Os processos de redução e refino da indústria siderúrgica geram diferentes tipos de escória como subproduto. A escória proveniente do alto-forno é composta principalmente por óxidos, sendo sílica, alumina, cálcio e magnésio os principais constituintes. Além disso, sua composição varia de acordo com o método de resfriamento ao qual a escória foi submetida (Nepomuceno, 2019).

Por outro lado, as escórias de aciaria são obtidas durante a transformação do ferro-gusa em aço. Durante esse processo, quantidades indesejáveis de enxofre são geradas, comprometendo a qualidade do aço produzido. O aumento da concentração de enxofre torna o aço mais suscetível a trincas longitudinais e reduz sua resistência transversal (Kirmse, 2006).

Em uma etapa intermediária entre os processos de redução e refino, ocorre a geração de um coproduto conhecido como escória KR, resultado do processo de dessulfuração do ferro-gusa no Reator Kambara (Schrama *et al.*, 2017, Andrade, 2018). É importante ressaltar que as

características dessa escória podem variar de acordo com as especificidades de cada empresa produtora de aço (Gonçalves, 2016).

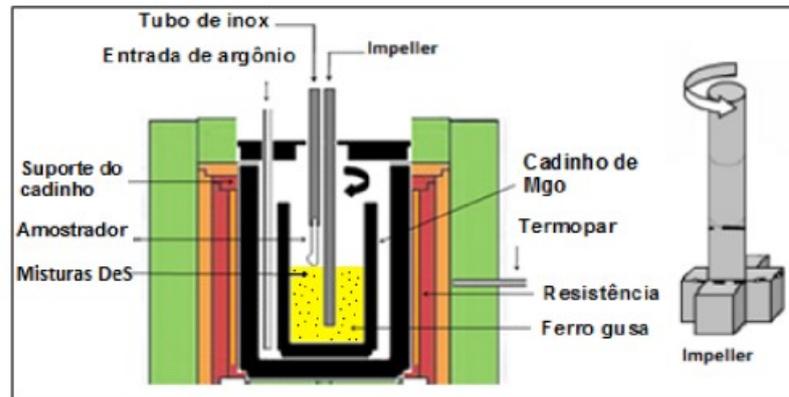


Figura 7. Esquema representativo do reator Kambara (Marchesi, 2018 *apud* Corteletti Junior, 2022).

A implementação da dessulfuração através do reator Kambara ocorre por meio de um sistema de agitação mecânica, utilizando um rotor ou impeller que realiza a agitação do banho metálico contido em um cadinho. Essa agitação tem o objetivo de promover um maior contato dos reagentes com o metal líquido, resultando em um aumento da área específica onde a reação de dessulfuração ocorre, ou seja, na interface metal/escória (Corteletti Junior, 2022), como ilustrado na Figura 7.

É fundamental destacar a importância da etapa de dessulfuração no processo produtivo do aço. O enxofre presente no gusa proveniente dos altos-fornos pode comprometer diretamente a qualidade do aço caso não seja removido. Portanto, a remoção eficiente desse elemento é essencial para garantir os padrões de qualidade necessários na produção do aço.

2.5. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DA ESCÓRIA KR

A escória KR é um subproduto residual proveniente de um alto-forno utilizado no processo de extração de ferro-gusa. Suas características são obtidas através de um tratamento complexo que envolve plantas de britagem, peneiramento e remoção de frações metálicas da escória gerada durante a dessulfuração do ferro-gusa. Após essa etapa, a escória é submetida ao resfriamento em um pátio, onde é pulverizada água para acelerar o processo e transformar o óxido de cálcio presente nesse material em hidróxido de cálcio. Além disso, uma porção do ferro presente na

escória é recuperada através de um processo que envolve o esmagamento e a separação magnética. A fração não magnética restante da escória é composta por grãos com diâmetro igual ou menor a 2 mm, conforme estudo realizado por Cho *et al.* em 2018.

De acordo com a caracterização realizada por Gonçalves (2016), a escória KR foi avaliada quanto à sua pozolanidade, seguindo os critérios estabelecidos pela norma NBR 12653 - Materiais pozolânicos - Requisitos (ABNT, 2014). Essa norma estabelece as condições necessárias para que materiais classificados como pozolânicos possam ser utilizados como adição, buscando-se uma ação aglomerante. No caso específico do coproduto KR, este se enquadrou na Classe E, como definido pela mencionada norma, pois não é considerado uma pozolana natural ou artificial (Classe N) nem uma cinza volante (Classe C).

Todavia, conforme apontado por Andrade (2018), o coproduto KR não pode ser caracterizado como um material pozolânico apropriado para utilização como adição ao cimento Portland, argamassa e pasta. Isso se deve ao fato de que, dentre os limites estabelecidos pela norma, quatro requisitos químicos não foram atendidos, não se enquadrando assim nos parâmetros exigidos.

De acordo com Oliveira Bridi (2020), foi constatado que a escória KR manifesta uma reação extremamente reativa quando submetida ao ácido clorídrico (HCL), evidenciada pela formação de bolhas. Tal comportamento pode indicar a presença de CaCO_3 (carbonato de cálcio) em sua composição química, atribuindo características alcalinas à escória. Quando em contato com uma solução aquosa, ocorre a hidrólise salina do CaCO_3 , resultando na formação de uma base forte com um pH elevado. Por outro lado, o coproduto KR apresenta um pH básico (alcalino) de 11,5. Esse alto valor de pH pode ser atribuído principalmente à presença predominante de compostos cálcicos no coproduto.

A composição química da escória KR é usualmente expressa por meio de óxidos simples, os quais são calculados a partir de análises elementares realizadas por fluorescência de raios-X. Esta escória consiste em uma mistura de óxidos, sendo os principais constituintes o CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 , MnO , MgO e Al_2O_3 (Tian *et al.*, 2022; Du *et al.*, 2022; Santo *et al.*, 2022; Costa *et al.*, 2021; Oliveira Bridi, 2020; Oliveira *et al.*, 2019; Dieguez *et al.*, 2019; Cho & Choi, 2016; Tong *et al.*, 2016; Kuo *et al.*, 2014; Shen *et al.*, 2014; Kuo & Hou, 2014; Harmaji *et al.*, 2012).

É importante ressaltar que as escórias KR não possuem uma natureza expansiva e contêm componentes químicos, como SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃, que são semelhantes aos encontrados no cimento Portland (Pires *et al.*, 2019). A Tabela 1 exibe a composição química de diferentes escórias KR investigadas.

Tabela 1 - Composição química da escória KR

<i>Autores</i>	<i>CaO</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>MnO</i>	<i>MgO</i>	<i>SO₃</i>	<i>C</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
Tian <i>et al</i> , (2022)	44,50	18,10	19,00	7,26	2,55	4,17				
Du <i>et al</i> , (2022)	53,50	9,90	18,00	3,40	1,20	6,50	4,00			
Santo <i>et al</i> , (2022)	36,10	8,06	45,90	3,67	1,07	1,64		1,89	0,10	1,43
Costa <i>et al</i> , (2021)	54,00	8,50	25,70	1,70	3,3,	1,60	3,60			
Oliveira Bridi, (2020)	51,01	10,48	6,91	3,69	1,70	1,94	5,38			
Oliveira <i>et al</i> , (2019)	44,80	14,60	26,00	5,10	1,70	2,70	3,80			
Dieguez <i>et al</i> , (2019)	47,80	12,30	*	4,50	1,04	3,80		4,20		1,25
Cho & Choi, (2016)	63,20	10,60	11,00	1,21		1,52	5,20	4,08		
Tong <i>et al</i> , (2016)	61,00	8,94	*	0,35	0,09	0,94	-			2,20
Kuo <i>et al</i> , (2014)	48,20	17,60	24,50	2,77	1,06	1,38	2,30			
Shen <i>et al</i> , (2014)	48,50	10,20	*	4,68		3,08			0,26	1,19
Kuo &	66,10	5,70	7,35	3,48	0,45	2,29	3,42			

Hou, (2014)							
Harmaji <i>et al.</i> , (2012)	20,70	12,80	38,00	14,90		8,87	0,69

* Apresentam Fe na sua composição química.

O ferro-gusa é submetido a um processo de agitação mecânica visando a remoção de enxofre, resultando na transformação do óxido de cálcio (CaO) em sulfeto de cálcio (CaS). A escória KR é composta por uma quantidade significativa de CaO, variando entre 40-60%, além de apresentar elevadas concentrações de ferro (Cho & Choi, 2016; Tong *et al.*, 2016; Pires *et al.*, 2019; Dieguez *et al.*, 2019; Costa *et al.*, 2021). Devido ao seu alto teor de CaO, a escória KR possui um grande potencial para ser utilizada como material de enchimento, substituindo a cal (Shen *et al.*, 2014). Os dados apresentados na Tabela 1 corroboram com a informação anteriormente mencionada, demonstrando que o CaO é o componente químico predominante na composição da escória KR.

O ensaio de difração de raios-X (DRX) é uma técnica que fornece informações valiosas sobre a estrutura cristalina de materiais, permitindo a identificação de picos característicos. Nesse contexto, ao analisar a escória KR em seu estado natural, foi observado que se trata de um material cristalino, apresentando vários picos distintos. Esses picos identificados indicam a presença de hidróxido de cálcio e dióxido de silício, evidenciando que a escória KR possui capacidade pozolânica.

No entanto, vale ressaltar que, para que as reações pozolânicas ocorram de forma eficiente, é necessário que os minerais presentes na escória estejam na forma amorfa. Isso ocorre porque a estrutura cristalina dos minerais impede ou retarda a reação pozolânica. Dessa forma, é essencial garantir que a escória seja devidamente tratada e processada, a fim de obter minerais amorfos que possibilitem a ocorrência das reações pozolânicas de forma adequada.

É importante destacar que o produto resultante dessas reações é um composto conhecido como silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o qual desempenha um papel fundamental no ganho de resistência à compressão do material a longo prazo. Esse composto contribui para a formação de uma matriz densa e coesa, conferindo maior resistência mecânica e durabilidade ao material.

Portanto, a utilização da escória KR como componente pozolânico em materiais de construção exige uma análise cuidadosa de sua estrutura cristalina por meio do ensaio de DRX, a fim de garantir que os minerais presentes estejam na forma amorfa, possibilitando a ocorrência das reações pozolânicas e, conseqüentemente, o desenvolvimento das propriedades desejadas, como o ganho de resistência no longo prazo. (Andrade, 2018).

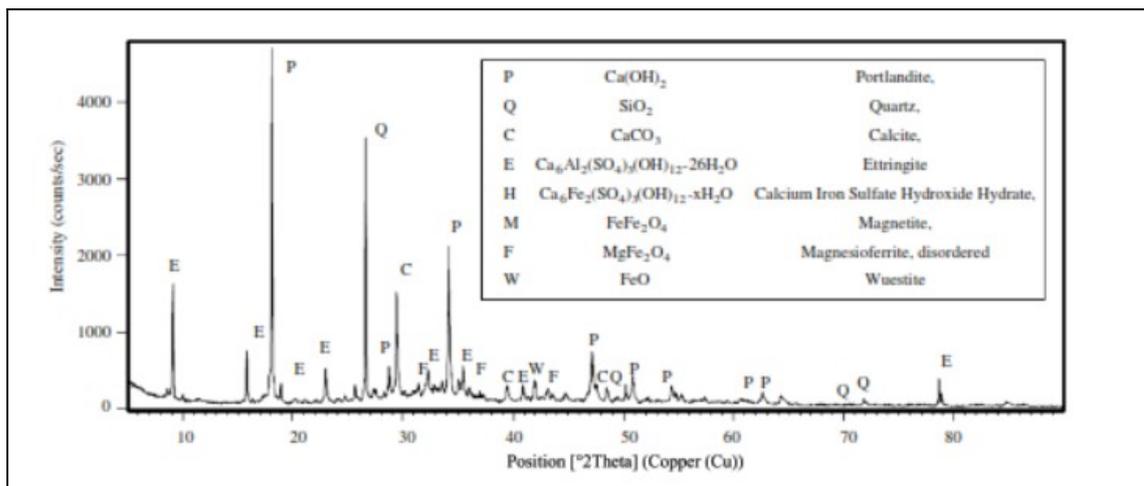


Figura 8. Difratoograma de raios-X da escória KR (Pires *et al*, 2019).

Com base na análise da Figura 8, é possível observar que o coproduto KR apresenta picos de cristalinidade bem definidos. Os resultados indicam que o carbonato de cálcio corresponde a aproximadamente 33,3% do material, enquanto a fase Portlandita representa cerca de 46%. A presença desses picos de Portlandita pode ser o resultado da transformação do óxido de cálcio em decorrência da exposição à umidade (Azeredo, 2018).

Além disso, foram identificados outros picos de difração, tais como quartzo, etringita, magnetita, wuestita, magnesioperrita desordenada e hidróxido de sulfato de ferro e cálcio hidratado. Esses picos são indicativos da presença de compostos químicos adicionais no coproduto KR.

Essas informações ressaltam a complexidade e a diversidade da composição do coproduto KR, evidenciando a presença de minerais e compostos químicos variados. Essa caracterização detalhada é de extrema importância para compreender as propriedades e comportamento desse

material em diferentes aplicações industriais, bem como para desenvolver estratégias de uso sustentável e reaproveitamento adequado.

2.6. ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM COPRODUTO KR

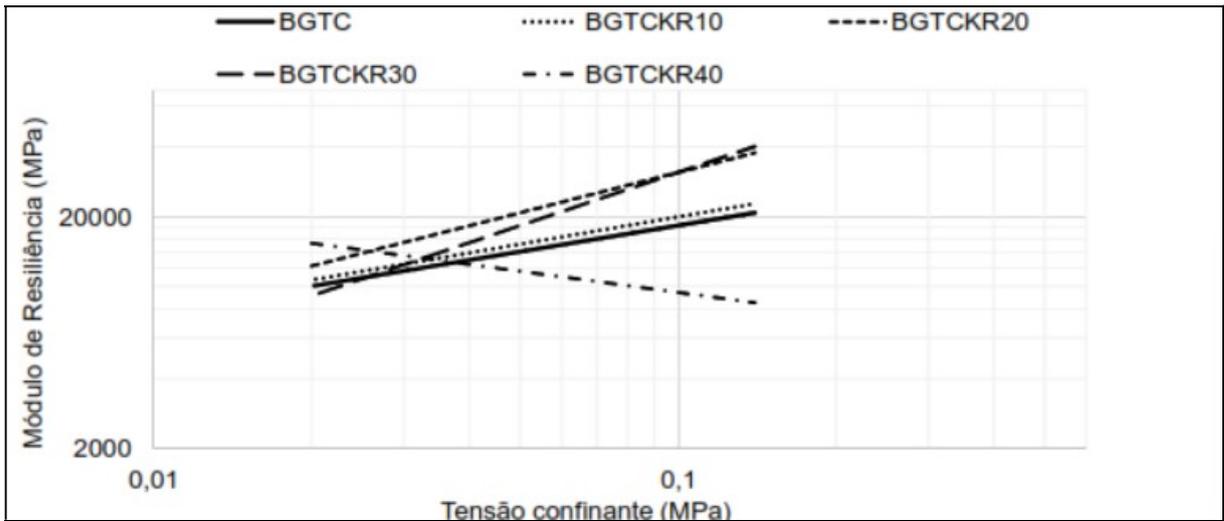
A escória de dessulfuração KR é um subproduto gerado durante o processo de pré-tratamento do aço, entre o alto-forno e a aciaria. Embora esse material seja produzido nessa etapa, a composição química da escória KR é mais semelhante às escórias de aciaria. A relação entre a composição química e a reatividade das escórias pode ser expressa pelo conceito de basicidade. Basicidade, de acordo com Ferraro (2014), pode ser definida de maneira simplificada como a relação mássica de CaO/SiO_2 , ou seja, C/S . Com base nesse parâmetro, as escórias podem ser classificadas como ácidas ($C/S < 1$), neutras ($C/S = 1$) ou básicas ($C/S > 1$).

De acordo com Tanzer *et al* (2014, *apud* Oliveira Bridi, 2020), é notável que à medida que aumenta a basicidade da escória, ocorre um incremento na proporção de CaO em relação à SiO_2 , resultando em uma expansão da rede de vidro e facilitando a quebra das ligações Si-O existentes.

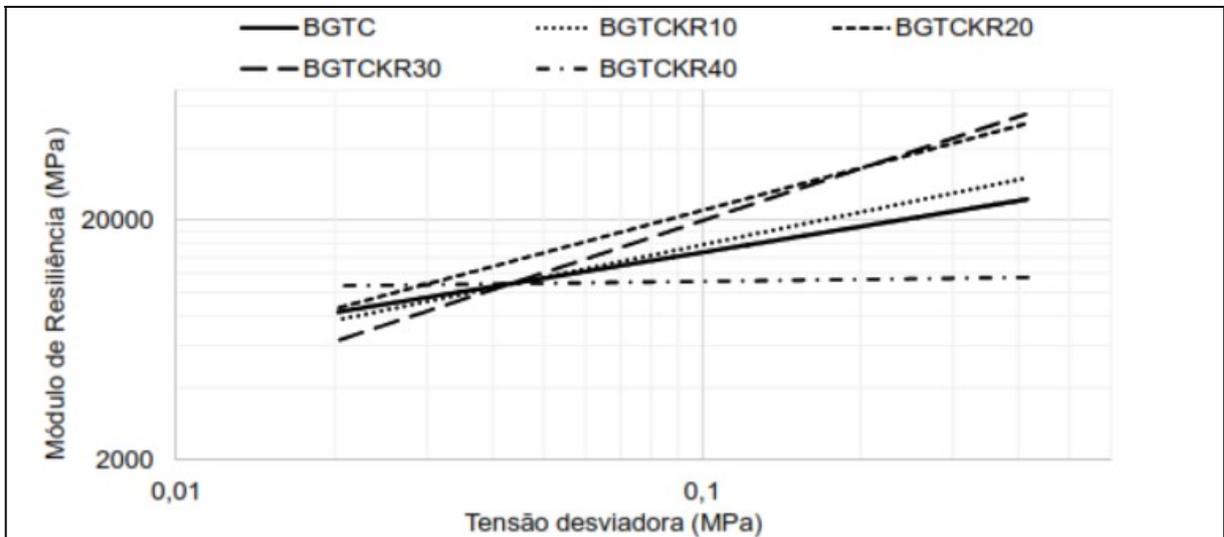
O estudo realizado por Andrade (2018) teve como objetivo avaliar o desempenho mecânico e microestrutural da brita graduada tratada com cimento com a incorporação do coproduto de aciaria KR. Na ausência de normas específicas para a utilização do coproduto KR, há incertezas quanto aos parâmetros para sua aplicação. Entretanto, observa-se que suas características estão de acordo com os padrões de aceitação e uso estabelecidos para escórias de aciaria mais conhecidas, conforme mencionado pelo autor.

Os resultados obtidos na campanha de ensaios indicaram que o uso do coproduto KR em camadas de BGTC é tecnicamente viável. Nas misturas que contaram com a incorporação do coproduto KR, verificou-se uma capacidade de ganho de resistência à compressão simples de até 20% ao longo do tempo, após 56 dias de cura. Essa característica pode estar relacionada à presença de alumínio e ferro na composição do KR. Esses componentes podem atuar como retardadores de pega no cimento, devido à retenção da água presente na mistura e à liberação gradual dessa água para a hidratação do cimento nas amostras, o que resulta em um ganho de resistência à compressão mais gradual em comparação com a BGTC padrão.

Apesar de as misturas com incorporação de KR apresentarem uma resistência à compressão inferior em relação à BGTC padrão, elas exibem um módulo de resiliência superior (Figura 9). Para fins de pavimentação, essa propriedade é de suma importância para a aplicação e durabilidade do material. A melhoria na capacidade de deformação e absorção de cargas fornecida pela incorporação do coproduto KR na mistura do BGTCR20 indica sua aplicabilidade nas camadas de base de rodovias.



(a)



(b)

Figura 9 – Curvas para obtenção dos coeficientes para (a) Modelo - Tensão confinante, (b) Modelo – Tensão desviadora, (Andrade, 2018)

No estudo de Ramos (2018), foi investigado o efeito da adição do coproduto KR no melhoramento de solos argilosos, com ênfase no ganho de resistência não drenada e

estabilização química. Os resultados dos ensaios de pozolanicidade e mineralogia do coproduto KR indicaram que este não é um material pozolânico e cristalino. No entanto, quando incorporado ao solo e ao solo com cimento, o coproduto apresentou características cimentantes que resultaram em um aumento nos valores de resistência não drenada.

Os valores da resistência não drenada (S_u) revelaram resultados satisfatórios e coerentes. Comparativamente, a mistura com cimento apresentou um valor mais elevado de S_u . No entanto, o coproduto KR demonstrou desempenho competitivo sob uma perspectiva econômica e ambiental.

Em relação aos ensaios de adensamento, observou-se que a adição dos aglomerantes usuais e do coproduto KR resultou em redução dos valores dos coeficientes de compressibilidade. Além disso, constatou-se que quanto menor a granulometria dos aglomerantes, melhores foram os resultados obtidos e maior foi a estabilização do solo.

Portanto, a autora concluiu que o coproduto KR promoveu ganhos de resistência não drenada, cuja magnitude variou dependendo da granulometria do coproduto. Ou seja, quanto mais fino foi o coproduto presente na mistura, maiores foram os resultados de S_u . Esse fenômeno pode ser explicado tanto pela maior facilidade de homogeneização da mistura como pela maior área específica, que intensifica as reações de hidratação entre os cimentantes e os argilominerais presentes no solo.

Conforme apontado por Gonçalves (2016), a análise dos solos revelou características inadequadas para a utilização como camadas de base em pavimentos. Contudo, a incorporação do coproduto KR resultou em uma melhora significativa tanto nas propriedades de suporte (CBR) quanto nas propriedades mecânicas (Figura 10). O autor ressalta que o uso do coproduto KR não apresenta riscos ambientais, uma vez que é classificado como não perigoso. Ele recomenda a incorporação desse material em obras de estradas de menor porte ou vicinais, nas quais o pavimento não é submetido a cargas elevadas. Assim, o coproduto KR se apresenta como uma opção acessível para a construção de pavimentos de qualidade.

O estudo realizado por Oliveira *et al* (2019) abordou a análise do comportamento químico, físico, mecânico e a caracterização microestrutural de uma escória KR visando avaliar o

potencial de estabilização de uma argila residual destinada à aplicação em pavimentos. Os resultados obtidos revelaram que a escória KR demonstrou ser eficiente na estabilização dos dois tipos de solos investigados, entretanto, a eficácia deste processo está diretamente relacionada ao tipo de solo utilizado. Destaca-se que o mecanismo principal para o ganho de resistência observado na mistura de solo é a estabilização química, a qual ocorre por meio da interação entre os componentes da escória KR e os argilominerais presentes.

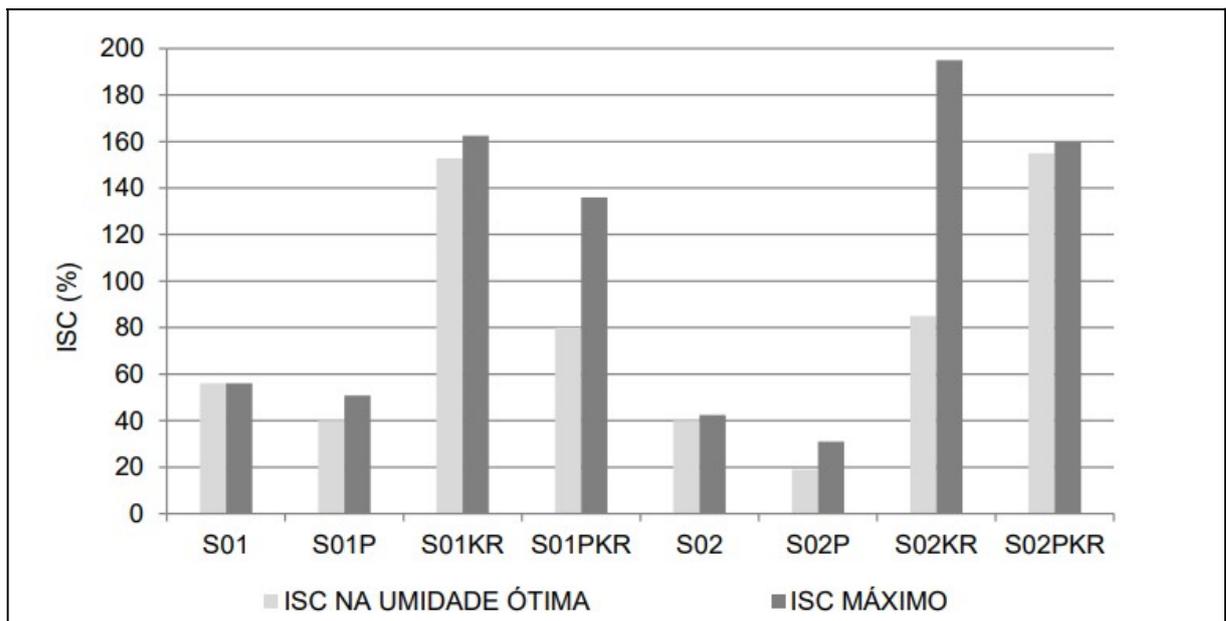


Figura 10 - Resumo dos valores de ISC para solos e as misturas, (Gonçalves, 2016)

O estudo, avaliou a influência de diferentes estabilizantes na estabilidade e comportamento dos solos residuais graníticos, especificamente um solo argiloso amarelo tropical (CH) e um argiloso rosa (SC). Para isso, foram analisadas 14 misturas contendo diferentes proporções e tipos de aditivos, como escória KR e cimento Portland.

A escória KR, foi classificada como A-1-b de acordo com a classificação de solos da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), apresentou características favoráveis devido à presença de partículas grandes e seu comportamento não plástico (NP). Além disso, em relação à instabilidade volumétrica, os resultados obtidos com a escória KR estão abaixo do limite superior de 3% estabelecido pela norma técnica brasileira DNER-ME 262 para sua aplicação em pavimentos.

Essas informações são essenciais para compreendermos os efeitos da estabilização dos solos residuais graníticos e a influência dos diferentes aditivos utilizados. Através da análise dos resultados, poderemos determinar a eficácia e viabilidade dessas misturas na construção de pavimentos, visando a otimização dos materiais empregados e o aumento da durabilidade das estruturas.

Tabela 2 - Caracterização e compactação resultantes das misturas estudadas, (Oliveira *et al.*, 2019)

Sample	γ_{max} .(g/cm ³)	OMC (%)	CBR (%)	Expansion (%)
CH	1.900	13.2	25.0	0.00
CH-KRS10	2.010	11.8	166.0	0.38
CH-KRS20	1.980	12.2	102.0	0.13
CH-KRS30	1.952	14.9	115.0	0.00
CH-PC10	1.831	13.6	163.0	0.00
CH-IM10	1.965	13.3	25.6	0.04
CH-IM20	1.975	11.7	22.5	0.00
CH-IM30	2.023	10.9	29.0	0.00
SC	1.782	16.5	55.0	0.06
SC-KRS10	1.827	16.7	80.0	0.06
SC-KRS20	1.816	17.3	129.0	0.04
SC-KRS30	1.860	15.6	182.0	0.01
SC-PC10	1.845	14.5	202.0	0.00
SC-IM10	1.998	12.0	51.0	0.25
SC-IM20	1.927	12.9	45.5	0.15
SC-IM30	1.877	13.7	33.3	0.06

No contexto dos parâmetros mecânicos das misturas de solos, tais como compactação, índice suporte California e expansão, os resultados obtidos revelaram distintas tendências de acordo com o tipo de solo em questão (Tabela 2). Notou-se que as misturas solo-KR exibiram valores superiores de densidade máxima seca quando comparadas aos valores observados nos solos puros e nas misturas solo-cimento. A estabilização do solo argiloso CH mediante o uso da escória KR não apenas promoveu um efeito de empacotamento decorrente da correção do tamanho das partículas, mas também resultou na formação de uma estrutura compacta em virtude dos mecanismos de troca catiônica. Ambos os solos puros apresentaram valores de CBR inferiores aos exigidos pelas normas brasileiras para utilização como base (CBR > 80%). No entanto, com a incorporação da escória KR, os valores de CBR se mostraram superiores aos dos solos puros e estiveram em conformidade com as normas técnicas aplicáveis. Portanto, os autores concluíram que a escória KR pode ser considerada um aditivo alternativo viável para a estabilização de solos tropicais, sobretudo para solos do tipo CH. A utilização de escórias KR configura uma solução ecologicamente correta para a estabilização de solos destinados à construção de pavimentos.

Os resultados obtidos na pesquisa desenvolvida por Furieri (2019) sugerem a aplicabilidade do coproduto KR em camadas de pavimentos, tanto para solos argilosos quanto para solos arenosos. Os achados revelaram baixos valores de expansão (<0,5%), o que indica a estabilidade do material. Além disso, os valores de CBR (California Bearing Ratio) excederam as recomendações normativas, demonstrando a capacidade de suporte do coproduto KR como um componente adequado para camadas de pavimentos (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores de ISC e expansão na umidade ótima e valores de expansão e umidade para o valor de ISC máximo - Solo AE + KR, (Furieri, 2019)

Energia Intermediária						
	ISC _{wótima}	W _{ótima} (%)	Exp _{wótima}	ISC _{máx} (%)	W _{ISCmáx} (%)	Exp _{ISCmáx}
Solo AE natural	22,7	17,0	0,02	39,0	15,5	0,17
AEKR15%	47,8	18,0	0,00	65,0	16,0	0,04
AEKR20%	81,2	17,4	0,02	82,5	17,0	0,03
AEKR25%	69,5	18,0	0,00	77,5	17,0	0,00
Energia Modificada						
	ISC _{wótima}	W _{ótima}	Exp _{wótima}	ISC _{máx}	W _{ISCmáx}	Exp _{ISCmáx}
Solo AE natural	25,3	16,3	0,04	38,0	14,5	0,30
AEKR15%	132,0	16,1	0,06	132,0	15,5	0,07
AEKR20%	103,2	15,5	0,04	104,5	15,0	0,03
AEKR25%	118,6	15,5	0,02	120,0	15,0	0,03

Adicionalmente, os resultados obtidos mostraram altos valores de módulos de resiliência, indicando a capacidade do coproduto KR de absorver e dissipar impactos e estresses, tornando-se eficaz na redução dos efeitos nocivos causados pelo tráfego de veículos. É importante ressaltar que tais valores foram encontrados em maior magnitude nos solos mais argilosos, evidenciando a contribuição significativa deste coproduto para o melhoramento do comportamento mecânico dessas composições de solo.

Essas descobertas abrem perspectivas promissoras para a utilização do coproduto KR em projetos de pavimentação, oferecendo benefícios como redução de custos e consumo de recursos naturais, uma vez que esse material de origem industrial se apresenta como uma alternativa sustentável. Dessa maneira, espera-se que essa pesquisa contribua para o avanço da engenharia de pavimentos, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e duráveis.

Pires *et al* (2019) conduziram um estudo investigativo abordando a possibilidade de utilizar escória KR enquanto estabilizador de solos. Para tanto, nove misturas de solos foram submetidas a análises laboratoriais, variando de acordo com o tipo de solo, a porcentagem e o tipo de aditivo empregado (escória KR e cimento Portland). Paralelamente, duas seções de teste foram construídas no campo e sujeitas a repetidas cargas de tráfego, utilizando-se um simulador de veículos pesados (HVS).

Com base na classificação dos solos segundo o método AASHTO, o solo S1 foi classificado como A-7-6, consistindo predominantemente de argila, com um elevado limite líquido e alto índice de plasticidade. Diante disso, o solo S1 apresenta baixa capacidade de suporte para ser aplicado como subleito de pavimentos. Já o solo S2 foi classificado como A-2-6, caracterizado como um solo arenoso contendo cascalho e argila, com graduação satisfatória, média plasticidade e valores de CBR de 49,9% e 89,19% para energias proctor intermediárias e modificadas, respectivamente. Portanto, o solo S2 mostra-se excelente para aplicação como subleito de pavimentação (Figura 11).

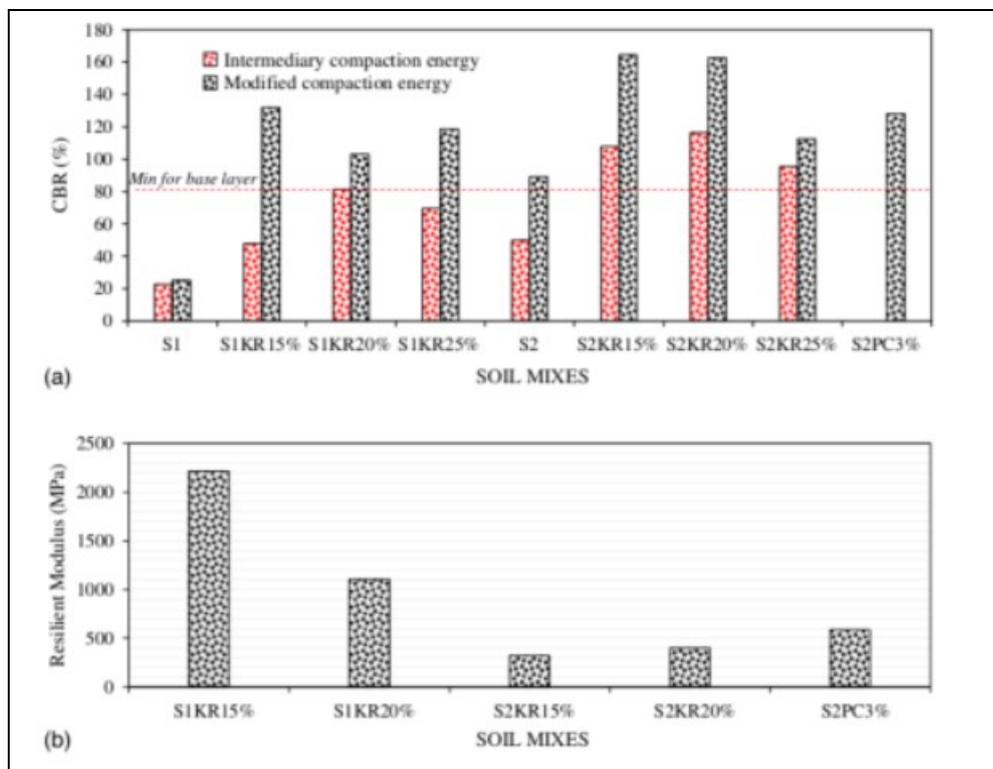


Figura 11- Resultados mecânicos das misturas estudadas: (a) ISC, (b) MR, (Pires *et al*, 2019)

Após a realização da caracterização física dos solos e das misturas estudadas, constata-se um aumento na massa unitária quando a escória KR é adicionada. Esse incremento pode ser atribuído à presença de compostos de ferro contidos na escória KR. Adicionalmente, observou-se uma mudança no comportamento do solo S1 de alta plasticidade para média plasticidade quando misturado com a escória KR. A escória KR mostrou-se capaz de estabilizar o solo S1 devido à elevada concentração de carbonato de cálcio e hidróxido de cálcio presentes nela, os quais podem ter reagido com as lamelas do solo argiloso, resultando numa considerável redução da dupla camada difusa na presença de água.

A partir da avaliação em campo, foi confirmado que a solução solo-escória KR pode ser uma alternativa viável para a aplicação em pavimentos. Não foram observadas diferenças significativas entre o comportamento da mistura solo-escória KR e o solo modificado com cimento (SMC). Ambas as soluções atenderam a todos os requisitos de avaliação de campo em termos de deformação permanente, sulcos e microtextura, comprovando a viabilidade do desempenho do pavimento (Pires *et al*, 2019).

Os resultados desta pesquisa demonstram que, em termos gerais, é viável utilizar um solo argiloso não modificado devido à sua estabilização com o subproduto da escória KR, proporcionando significativos benefícios econômicos e ambientais. A utilização da solução solo-escória KR como sub-base em rodovias oferece uma economia substancial em comparação com outras alternativas frequentemente utilizadas, como brita tratada com cimento, solo-cimento ou solo modificado por soluções de cimento.

Essa abordagem promissora destaca-se como uma opção economicamente viável e sustentável para a construção de rodovias, uma vez que o custo de implementação da solução solo-escória KR é consideravelmente menor. Além disso, deve-se destacar a redução significativa do impacto ambiental gerado por essa solução, uma vez que a utilização de um subproduto da escória KR permite minimizar a extração de recursos naturais e evitar a produção de resíduos adicionais (Pires *et al*, 2019).

É importante ressaltar que, além dos benefícios econômicos e ambientais, a utilização dessa solução também é vantajosa do ponto de vista técnico. As propriedades mecânicas melhoradas

proporcionadas pela estabilização do solo com a escória KR contribuem à capacidade de suporte do subleito, garantindo a durabilidade e a segurança das estruturas rodoviárias.

A pesquisa realizada por Oliveira Bridi (2020) investiga o efeito da estabilização com o coproduto KR nas propriedades físicas, mecânicas e químicas de solos com diferentes teores de finos (56,6%, 42,7% e 28,9%). Em relação à capacidade de troca de cátions (CTC), observa-se que a incorporação do coproduto KR nas amostras resulta em um aumento da CTC total, especialmente nos solos com maiores teores de finos. Esse aumento da CTC total promove e mantém a troca catiônica orientada pelo Ca^2 .

No que diz respeito à microestrutura do solo, o autor observa a presença de estruturas fibrilares nas primeiras idades após a estabilização, que ao longo do tempo levam à colmatação dos poros, união dos grãos adjacentes e consequente densificação da amostra. Portanto, verifica-se que a estabilização com o coproduto KR é um mecanismo válido para melhorar a estabilidade do solo.

Segundo o autor, fica evidente que a estabilização do solo com o coproduto KR, nas condições específicas do estudo, ocorre principalmente por meio de mecanismos de trocas catiônicas e reações de hidratação. Esses efeitos também têm impacto na mineralogia e na microestrutura das amostras, sendo essencial a presença de argilominerais nas frações mais finas do solo.

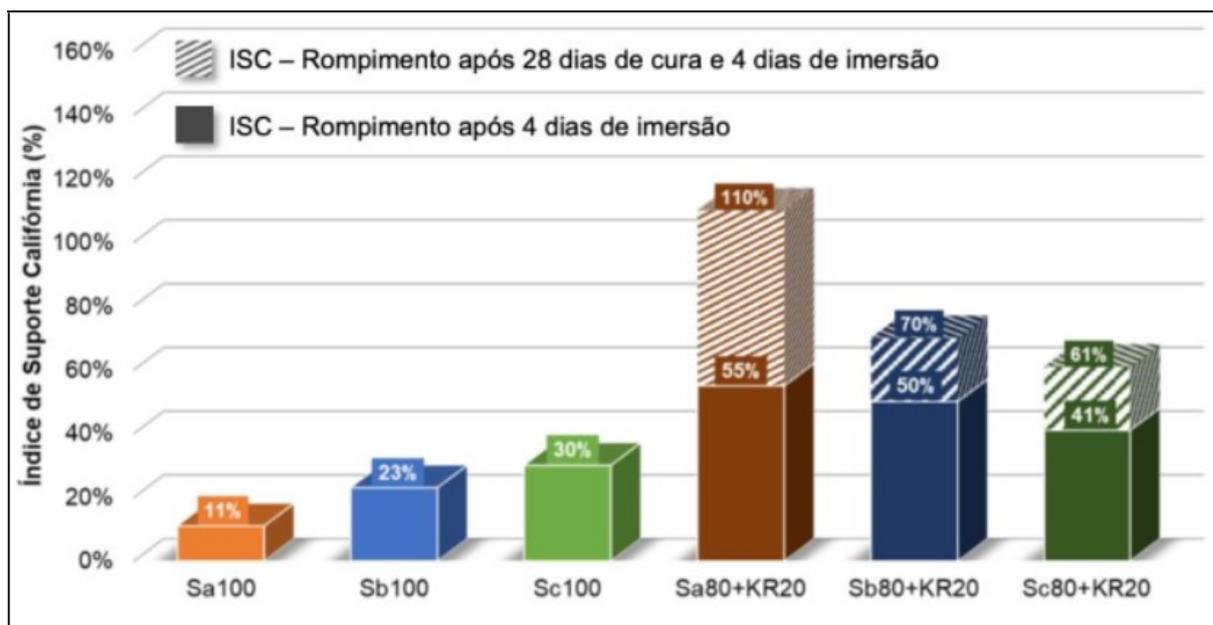


Figura 12 - ISC das amostras na umidade ótima após 96 horas de imersão e após 28 dias de cura e 4 dias de imersão

Em sua pesquisa, Oliveira Bridi (2020) utilizou três solos e três misturas, sendo Sa100 um material obtido naturalmente, com um teor de finos de 60%, Sb100 e Sc100 materiais obtidos artificialmente ao reduzir o teor de finos para 45% e 30%, respectivamente, e KR100 o coproduto de dessulfuração KR. Assim, ao preparar as misturas na proporção 80:20 (80% solo e 20% KR), o autor obteve os materiais Sa80+KR20, Sb80+KR20 e Sc80+KR20. A Figura 12 ilustra o aumento do Índice de suporte California com a incorporação do KR, bem como a influência do tempo nessa variação.

O estudo realizado por Shumacher *et al.* (2022) investigou o potencial de utilização de três diferentes escórias, que são subprodutos da indústria siderúrgica, como uma única camada de base em estradas não pavimentadas. Foram analisadas oito misturas diferentes envolvendo os subprodutos Linz-Donawitz (LD), Alto-forno (BF) e KR, além das combinações de LD/KR e BF/KR, em diferentes proporções de peso (50% e 75%) com um solo argiloso. O objetivo era desenvolver uma camada de base sustentável e economicamente viável para estradas rurais.

A inclusão de todos os subprodutos na mistura do solo resultou em um aumento no valor máximo de CBR. Quanto maior a quantidade de subproduto adicionado, maior foi a capacidade de suporte da amostra. A incorporação do solo aos subprodutos teve um efeito significativo na redução da expansão. Quando o subproduto KR foi adicionado à escória LD, a expansão foi cerca de 50% menor em comparação com as misturas contendo apenas solo e escória LD. Já a expansão das amostras com a combinação BF/KR não apresentou variação significativa. As misturas investigadas demonstraram ser materiais não expansivos adequados para o uso em camadas de base de estradas (Shumacher *et al.*, 2022).

Diante desses resultados, pode-se concluir que as escórias provenientes da indústria siderúrgica têm potencial para serem utilizadas como materiais alternativos na construção de estradas não pavimentadas. Além de reduzirem a expansão, as misturas estudadas mostraram-se ambientalmente amigáveis, aproveitando subprodutos que antes seriam descartados. Essa abordagem sustentável pode contribuir para a redução do impacto ambiental da indústria siderúrgica e para a construção de estradas mais duráveis e econômicas em áreas rurais.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, foram abordados os materiais e ensaios utilizados nesta pesquisa visando o aprimoramento e apropriação de solos finos utilizados em obras de pavimentação. A metodologia adotada consiste na realização de ensaios que permitam a avaliação da viabilidade do uso do coproduto de KR em pó, proveniente do processo de despoeiramento dos filtros de mangas realizado na aciaria, como agente de melhoria desses solos.

A maioria dos ensaios foram conduzidos no laboratório da empresa PROPAV Geotecnia e Serviços Eireli, localizada na cidade de Vila Velha, Estado do Espírito Santo. Os ensaios químicos de fluorescência e difratometria de raios-X foram conduzidos pela empresa ArcelorMittal Tubarão.

No Item 3.1, serão apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa, enquanto o Item 3.2 discorrerá acerca dos métodos e ensaios empregados no desenvolvimento deste trabalho.

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Solo

A presente investigação se concentrou no estudo de um solo de argila arenosa vermelha proveniente de uma jazida situada no município de Itarana, no estado do Espírito Santo (Figura 13). Este solo foi utilizado na pesquisa devido a que se trata de um solo que é altamente empregado no estado para obras do tipo rodoviária.

A coleta das amostras do material seguiu o preconizado na norma ABNT NBR 9604/1986. Feita a coleta das amostras, estas foram devidamente separadas e transportadas para o Laboratório para a preparação do material para a realização dos ensaios.



Figura 13. Aparência da argila arenosa vermelha estudada.

3.1.2. Escória KR

O pó de dessulfuração do despoejamento KR (KRSP) é gerado na usina siderúrgica, no sistema de remoção de poeira do processo de dessulfuração de ferro-gusa. O processo envolve a remoção parcial do enxofre contido no ferro-gusa líquido por meio da adição de um agente dessulfurante (Oliveira Bridi, 2020; Pires *et al.*, 2019; Schumacher, 2018; Gotardi, 2015). Esse processo acontece dentro do reator Kambara e é caracterizado pela liberação e dispersão de partículas provenientes da reação, que são aspiradas e direcionadas pelo sistema de remoção de poeira do filtro de mangas, como mostrado na Figura 14.

Para este estudo, foi utilizado um pó de escória de reator Kambara (KRSP) fornecido pela ArcelorMittal, uma empresa siderúrgica localizada no Espírito Santo, Brasil (Figura 15). O coproduto KR utilizado no trabalho com granulometria menor do que 0,075 mm (Nº 200) disponibilizados em sacos plásticos, identificados com o tipo de escória fornecida.

O pó da escória KR (Figura 14) é gerado na Aciaria, no sistema de despoejamento dos filtros de mangas no processo de dessulfuração do gusa. O processo acontece através da remoção do enxofre contido no ferro gusa líquido, por médio da adição de um agente dessulfurante. Esse processo acontece no reator Kambara e produto do despoejamento dele.

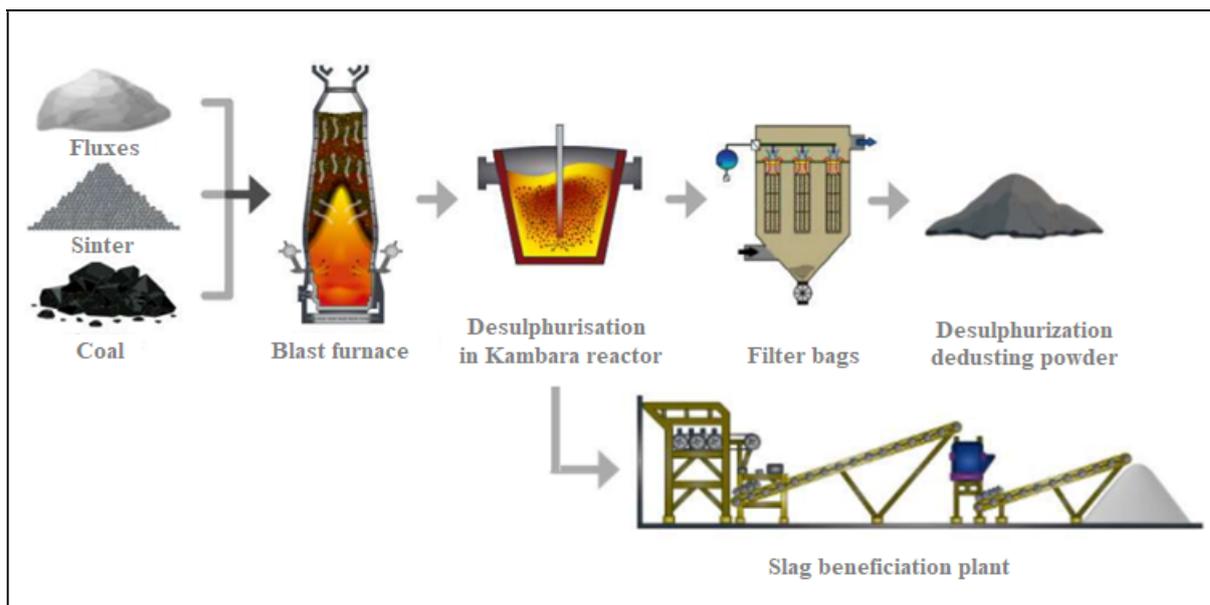


Figura 14. Esquema de geração de pó desulfuração e desempoeiramento do reator Kambara (Adaptado de ArcelorMittal).



Figura 15. Pó da escória KR (KRSP) doada pela ArcelorMittal.

3.1.3. Mistura solo-KRSP

A etapa de preparação das misturas de solo e coproduto KR envolveu a adição cuidadosa do pó de escória KR à argila arenosa vermelha em diferentes proporções, especificamente 3,0% e 5,0% em peso, conforme ilustrado na Figura 16. Esses teores foram selecionados com base nos estudos de misturas de solo aprimoradas com cimento para utilização em bases e sub-bases de pavimentos, que recomendam a faixa de 2% a 4% de teor de cimento.



Figura 16. Preparação das misturas solo-KRSP.

3.2. MÉTODOS

O ensaio experimental conduzido para investigar esses materiais é apresentado de maneira detalhada nos seguintes tópicos, que por sua vez, são subdivididos em três áreas de pesquisa distintas: caracterização química, caracterização física e caracterização mecânica.

3.2.1. Ensaio de caracterização química

- **Fluorescência de raios-x**

O ensaio de fluorescência de raios-x utiliza a interação entre a radiação de raios-x e a amostra para gerar um espectro de emissão característico dos elementos presentes. Esse espectro é então analisado pelo sistema do equipamento XRF, que utiliza a técnica de espectrometria de raios-x por dispersão de energia para quantificar os elementos presentes na amostra.

Através da análise dos espectros de raios-x, é possível determinar a concentração dos elementos em forma de óxido presentes no coproduto KR. Isso ocorre devido às características específicas de absorção e emissão dos raios-x pelos diferentes elementos, permitindo a identificação e quantificação dos mesmos.

O ensaio de XRF apresenta diversas vantagens, como a não necessidade de preparação especial da amostra, a rapidez na obtenção dos resultados e a capacidade de análise de uma ampla gama de elementos, desde os mais leves até os mais pesados. Além disso, a técnica é não destrutiva

Silva *et al* (2004), ou seja, a amostra não sofre danos ou alterações durante a análise, possibilitando um estudo mais completo e confiável da composição do coproduto KR.

Os resultados obtidos através do ensaio de XRF permitem uma avaliação precisa dos teores de elementos presentes nas amostras, sendo uma ferramenta fundamental para o controle de qualidade e para a caracterização de materiais.

- **Difratometria de raios-x**

A difração de raios-X é um fenômeno altamente relevante na caracterização de materiais, especialmente quando se trata da identificação de sua composição mineralógica. Esse método de ensaio consiste na interação entre o feixe de raios-X incidente e os elétrons dos átomos presentes no material analisado, resultando no espalhamento coerente dos raios-X.

A difração ocorre devido ao efeito da interferência entre as ondas de raios-X, resultando no fortalecimento das intensidades dos picos observados. Esses picos são características distintivas de cada fase cristalina presente nas partículas do material em questão. Assim, a análise por difração de raios-X permite a identificação das diferentes estruturas cristalinas e seus padrões de difração específicos.

Para realizar esse ensaio, o feixe de raios-X é direcionado em ângulos variáveis sobre uma amostra policristalina, que consiste em um arranjo aleatório de cristais em forma de pó. Essa amostra apresenta uma estrutura molecular ou atômica que se repete de maneira periódica e tridimensional.

Como resultado da difração, obtém-se o difratograma, que é um gráfico que relaciona o ângulo de espalhamento (denotado como 2θ) com a intensidade dos picos de incidência. Esse ângulo é formado entre a onda incidente e a onda espalhada, oferecendo informações cruciais sobre a estrutura cristalina do material analisado.

- **Potencial Hidrogeniônico (pH)**

O potencial hidrogeniônico, ou pH, consiste em uma importante medida utilizada na caracterização de soluções, incluindo amostras de solo. Nessa perspectiva, este estudo empregou

o método em água, conforme diretrizes presentes no manual de análise de solo da EMBRAPA (2017), para determinar o pH do pó de escória KR em seu estado sólido (Figura 17). Para tal, foram preparadas amostras com secagem prévia em estufa até atingirem constância de massa, garantindo a precisão e reprodutibilidade dos resultados obtidos.



Figura 17 Medição do Potencial Hidrogeniônico do pó de despoejamento KR

Comumente expresso em uma escala numérica, o pH representa a concentração de íons de hidrônio (H_3O^+) presentes em uma solução. Tal escala varia de 0 a 14, sendo que valores abaixo de 7 indicam a presença de caráter ácido, enquanto valores acima de 7 são associados a características básicas. Um pH igual a 7 traduz um comportamento neutro. Portanto, a aplicação do método em água na determinação do pH permite-nos inferir sobre a acidez, alcalinidade ou neutralidade da solução estudada.

3.2.2. Ensaios de caracterização física

Os procedimentos adotados durante a realização dos ensaios foram baseados nas diretrizes estabelecidas pelas seguintes normas técnicas:

- ABNT NBR 7181/2016: Esta norma tem como objetivo orientar a análise granulométrica do solo.
- ABNT NBR 6458/2016: Esta norma estabelece o procedimento para determinar a massa específica dos grãos de solo que passam pela peneira de abertura com dimensões de 4,8 mm.

- ABNT NBR 6459/2016: Norma que descreve o método para determinação do limite de liquidez do solo.
- ABNT NBR 7180/2016: Esta norma trata do procedimento para determinar o limite de plasticidade do solo.
- ABNT NBR 7182/2016: Norma que estabelece o ensaio de compactação do solo, visando determinar suas características de adensamento.
- ABNT NBR 9895/2016: Esta norma descreve o método de ensaio para determinação do índice de suporte California do solo.

A utilização dessas normas garante a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios, além de permitir a padronização dos procedimentos adotados na análise do solo. Ao seguir as diretrizes dessas normas, é possível obter dados consistentes que são indispensáveis para avaliações técnicas precisas e seguras.

- **Granulometria por peneiramento e sedimentação**

Os procedimentos adotados para a determinação da granulometria por peneiramento e sedimentação (Figura 18) seguiram rigorosamente as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 7181/2016 da ABNT (2016), em relação às diferentes amostras analisadas, incluindo o solo puro (S), o coproduto (KRSP) e as misturas solo-coproduto (SKRSP3 e SKRSP5), todas no estado solto. Antes da realização dos ensaios, todas as amostras foram submetidas a um processo de secagem prévia em estufa até atingirem constância de massa.



Figura 18. Ensaio de granulometria por sedimentação.

Os resultados obtidos neste experimento apresentam a análise granulométrica por meio da curva de distribuição de tamanho de partículas. Tal curva é representada no eixo das abscissas por uma escala logarítmica dos diâmetros das partículas, enquanto no eixo das ordenadas é adotada uma escala aritmética que reflete as proporções percentuais em massa das frações de tamanho correspondentes aos diâmetros das peneiras mencionadas anteriormente.

- **Limites de consistência**

Para a determinação do limite de plasticidade (LP) e do limite de liquidez (LL) de amostras de solo (Figura 19), foram adotadas as normas NBR 6459/2016 e NBR 6459/2016 da ABNT (2016). As amostras selecionadas para o estudo foram denominadas de S, KRSP, SKRSP3 e SKRSP5. Antes dos ensaios, as amostras foram submetidas à secagem em estufas até que fosse atingida a constância de massa e posteriormente foram peneiradas para obtenção de um diâmetro máximo de 0,425 mm (No. 40).



Figura 19. Ensaio de determinação do Limite de liquidez.

- **Massa específica dos grãos**

O presente estudo trata da realização do ensaio para a determinação da massa específica dos grãos de solos que passam na peneira de abertura 4,8 mm (No. 4), utilizando como base a norma NBR 6458/2016 da Associação Brasileira de Normas Técnicas. A pesquisa foi conduzida utilizando quatro amostras distintas, identificadas como S, KRSP, SKRSP3 e SKRSP5 (Figura 20).



Figura 20. Ensaio de determinação da massa específica.

3.2.3. Ensaios de caracterização mecânica

- **Ensaio de compactação**

O presente estudo consistiu em realizar o ensaio de determinação da curva de compactação, seguindo rigorosamente as diretrizes estabelecidas na norma NBR 7182/2016 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2016). Foram selecionadas as amostras S, KRSP3 e SKRSP5 para essa análise, visando obter resultados representativos para esses materiais.

Com o intuito de garantir a confiabilidade dos resultados, optou-se por moldar as amostras em cinco diferentes teores de umidade (Figura 21), evitando o reuso de material. Além disso, a compactação foi realizada utilizando a energia Proctor Intermediária (12 golpes em cada uma das 3 camadas), que é a energia de compactação mais amplamente adotada nas rodovias brasileiras, conforme apontado por Pires *et al.* (2019).



Figura 21. Compactação de amostras na energia Proctor Intermediária.

- **Índice de suporte California (CBR)**

A fim de calcular e avaliar o índice de suporte California, também conhecido como CBR (California Bearing Ratio), foi conduzido o ensaio conforme estabelecido pela norma NBR 9895/2016 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em 2016. O ensaio foi realizado utilizando as amostras S, SKRSP3 e SKRSP5, as quais foram previamente submetidas ao ensaio de determinação da curva de compactação e em seguida deixadas imersas em água por um período de 96 horas, conforme ilustrado na Figura 22.



Figura 22. Imersão em água dos corpos de prova para a determinação do CBR.

- **Expansão**

O presente estudo consistiu na realização do ensaio para a determinação da expansão, seguindo rigorosamente as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 9895/17 da ABNT (2017).

- **Resistência à compressão simples**

A fim de conhecer os valores de resistência à compressão simples das misturas SKRSP3 e SKRSP5, empregou-se a norma ABNT NBR 12253:2012, Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento – Procedimento. Esta norma estabelece os requisitos para a determinação da quantidade de cimento Portland capaz de estabilizar solos, para emprego como camada de pavimento de solo-cimento, pela medida da resistência à compressão simples de corpos de prova cilindros.

A compactação do ensaio foi realizada conforme a ABNT NBR 12023, usando os teores de pó de dessulfuração de KR de 3,0% e 5,0%. Os corpos-de-prova foram moldados e levados a cura por 7 dias. Decorrido o período de cura, os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de compressão simples. A norma ABNT NBR 12253:2012 estabelece que a resistência média à compressão deve ser igual ou superior a 2,1 MPa aos 7 dias de idade.

- **Módulo de resiliência (MR)**

O ensaio para a determinação dos módulos de resiliência das misturas SKRSP3 e SKRSP5, diante da ausência de trabalhos sobre o comportamento de misturas de solos com o pó de dessulfuração KR. A norma para determinar os valores dos módulos de resiliência a ser utilizada foi a norma do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) ME 134 – Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio (DNIT, 2018), a qual estabelece um método para determinar ditos valores para carias tensões de cargas aplicadas.

O aparelho opera a uma frequência de 1 Hz, sendo 0,1 s de carga e 0,9 s de repouso. A norma especifica que, para o condicionamento, devem ser feitas três sequencias com pares diferentes de tensões desvio e confinante, cada uma com 500 ciclos. Para este ensaio, foram moldados para cada mistura estudada três corpos de prova, como recomendado pela norma. Os corpos de

provas para o MR foram selados em sacolas plásticas transparentes e enterrados em pó de serra saturada de água por 96 horas e posteriormente ensaiadas (Figura 23), assim como o no ensaio de índice de suporte California.



Figura 23. Cura dos corpos de prova selados e enterrados em pó de serra saturada de água.

- **Deformação permanente (DP)**

Para a determinação das deformações permanentes nas misturas SKRSP3 e SKRSP5, o ensaio foi executado usando a norma DNIT 179/2018 -Instrução de Ensaio. O equipamento utilizado para obtenção do comportamento das misturas sob os diferentes estados de tensões foi o equipamento MS 151 – Triaxial dinâmico.



Figura 24. Determinação das deformações permanentes.

Assim como os corpos de provas para a determinação do módulo de resiliência, estes foram selados em sacolas plásticas para evitar a perda de umidade nos mesmos e enterrados em serragem completamente saturada de água por 96 horas e posteriormente ensaiados (Figura 24).

De acordo com o preconizado na norma DNIT 179/2019 – IE, deve-se ensaiar no mínimo seis corpos de prova, e cada CP deve ser submetido a um par diferente de tensões desvio e confinante. Ainda a norma especifica que a frequência seja entre 1 a 5 Hz, sendo recomendada a frequência de 2 Hz, o que foi utilizado neste trabalho. Inicialmente são feitos 50 ciclos de condicionamento e em seguida o ensaio ocorre com 150,000 ciclos para o par de tensões estabelecidos.

Para este ensaio, só foi possível a ensaiar um corpo de prova para cada mistura, para um par de tensões.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

4.1.1. Fluorescência de raios-x

A fim de obter informações detalhadas sobre a composição química da escória de KR em pó, foram realizadas análises de fluorescência de raios-X (XRF). Os resultados obtidos dessas análises estão apresentados na Tabela 4, onde os elementos e compostos foram expressos na forma de óxidos, tais como óxido de cálcio (CaO), dióxido de silício (SiO₂), óxido de magnésio (MgO), óxido de manganês (MnO) e óxido de alumínio (Al₂O₃).

Identificou-se que os principais componentes químicos do coproduto KR em forma de pó são o óxido de cálcio (CaO) e o dióxido de silício (SiO₂). O CaO representa a maior fração do coproduto, correspondendo a uma porcentagem de 31,6%. Por sua vez, o SiO₂ é o segundo maior componente, com uma taxa de 10,6%. É interessante ressaltar que o valor obtido para o CaO é semelhante ao encontrado por Santo *et al.* (2022) em sua pesquisa, que registrou uma porcentagem de 36,19%. Além disso, em outros estudos, como os realizados por Cho & Choi (2016), Pires *et al.* (2019), Dieguez *et al.* (2019) e Costa *et al.* (2019), foram encontrados valores de CaO superiores a 40%.

Esses dados são de extrema importância para compreender as propriedades físico-químicas do coproduto KR em pó, permitindo sua aplicação adequada em diferentes setores industriais.

Tabela 4 - Composição química do coproduto KR estudado

<i>Autores</i>	<i>CaO</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>MnO</i>	<i>MgO</i>	<i>SO₃</i>	<i>C</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
Presente estudo	31,60	10,60	-	1,20	2,49	5,67	-	0,14	0,55	0,02
Oliveira Bridi, (2020)	51,01	10,48	6,91	3,69	1,70	1,94	5,38			

Oliveira <i>et al</i> , (2019)	44,80	14,60	26,00	5,10	1,70	2,70	3,80
Gonçalves, (2016)	54,60	9,92	15,5*	5,19	0,77	3,20	

Ao realizar uma comparação entre a composição química do coproduto KR em pó e outros coprodutos KR de granulometria grosseira fornecidos pela ArcelorMittal (conforme apresentado na Tabela 1), é possível observar que as porcentagens de CaO no coproduto (gráudo) são superiores a 40%. Além disso, foi constatado que esses outros coprodutos apresentam óxidos ou o elemento ferro (Fe) em sua composição, o que difere do observado no pó de KR. Tal diferença pode ser justificada pelo fato de que o método utilizado para obter o coproduto em pó é distinto do utilizado para obter o coproduto com maiores tamanhos de partículas. O pó de KR é resultante do processo de despoeiramento dos filtros de mangas utilizados para a redução das emissões de poeira.

Ao comparar os resultados deste trabalho com o teor de enxofre relatado em outros estudos (consulte a Tabela 1), observou-se que o pó de dessulfuração coletado do filtro de saco continha uma quantidade insignificante de enxofre (0,02%). No entanto, a porcentagem de enxofre detectada nos outros estudos variou de 1,19% a 2,20%. De acordo com Zhang *et al.* (2022), a Norma Europeia EN 15167-1 estipula que os níveis de sulfeto e sulfato na escória não devem exceder 2,0% e 2,5%, respectivamente. A principal razão para essa restrição é a possibilidade de formação de etringita tardia, o que poderia ter um efeito prejudicial na resistência mecânica do cimento de escória endurecido. Além disso, há preocupação de que um aumento no teor de enxofre na escória possa contribuir para a corrosão da armadura, o que leva ao ceticismo sobre sua adequação para certas aplicações.

4.1.2. Difratomia de raios-x

Na Figura 25, é apresentado o resultado da análise da mineralogia por difratometria na amostra do pó de KR. A figura revela a presença de picos cristalográficos característicos da Portlandita, Carbono, Calcita, Quartzo e Brucita. As principais frações identificadas são a Portlandita (Ca(OH)_2) com uma proporção de 73,0%, seguida pelo Carbono (C) com 16,6%, Calcita (CaCO_3) com 6,6%, Brucita (Mg(OH)_2) com 2,5% e Quartzo (SiO_2) com 1,3%. A Portlandita

surge como resultado da hidratação residual da cal durante o processo de produção de aço, enquanto a calcita se forma por meio da carbonatação da portlandita. Deng *et al.* (2008), citado por Shen *et al.* (2014), observam que o carbono proveniente do ferro é incorporado nas escórias KR durante a dessulfuração, e o teor de carbono na escória KR é influenciado pelo teor de ferro.

A partir de uma análise minuciosa e individual da amostra KR100 no estado solo, realizada no estudo de Oliveira Bridi (2020), verificou-se a presença de portlandita, calcita e quartzo. Além disso, o coproduto utilizado pelo autor revelou constituintes como nacrita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), caulinita (Al_2O_3), gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sulfato ferroso (FeSO_4) e magnetita (Fe_3O_4). No entanto, é importante ressaltar que, conforme Oliveira (2018), o coproduto individualmente apresentaria também etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}$), porém tal composto não foi identificado neste estudo em questão. A ausência dos mencionados compostos deve-se ao baixo teor de Al_2O_3 , bem como à inexistência de Fe na composição química do material (conforme mostrado na Tabela 4), e ao método de obtenção do pó de despoeiramento de dessulfuração KR, o qual difere da produção do coproduto KR.

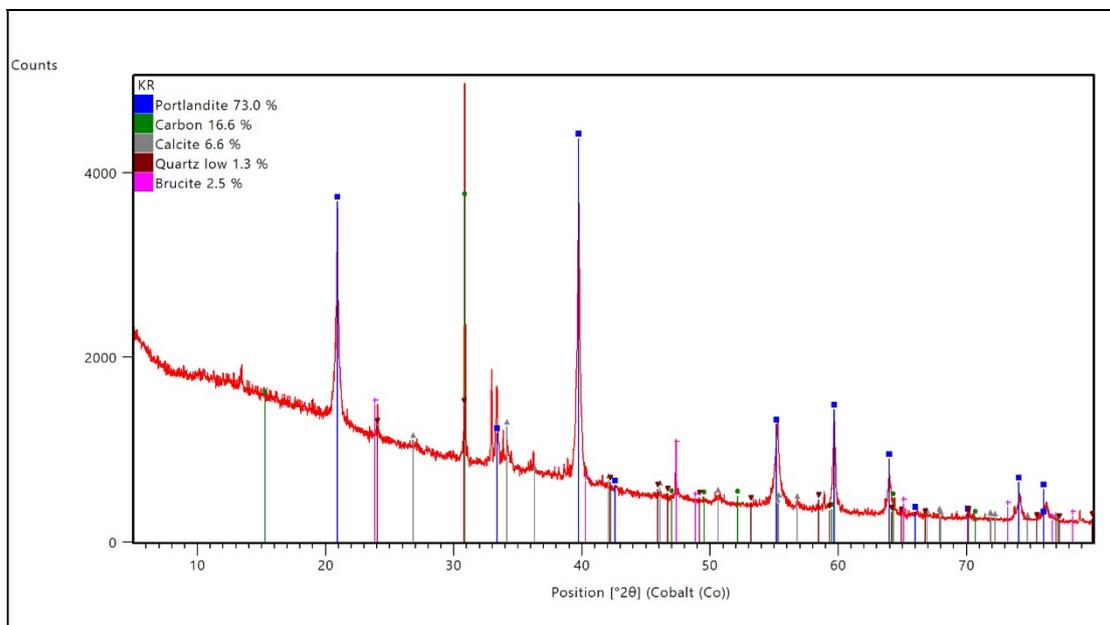


Figura 25. Difratomia de raios-X do KRSP.

A detecção concomitante de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e dióxido de silício (SiO_2) indica a presença de uma potencial capacidade pozolânica no material. No entanto, vale ressaltar que para que as reações pozolânicas possam ocorrer de forma efetiva, é imprescindível que os

minerais estejam em sua forma amorfa. Isso se deve ao fato de que, nessa configuração, os minerais são capazes de reagir com outros elementos presentes na matriz, resultando na formação de um composto conhecido como silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Esse composto, por sua vez, é responsável por conferir um significativo aumento na resistência à compressão do material ao longo do tempo, o que é desejável em aplicações de longa duração.

4.1.3. Potencial Hidrogeniônico (pH)

A amostra KRSP apresenta pH básico ou alcalino, de 13,4; isto, devido a que os principais constituintes no pó de escória de dessulfuração são compostos cálcicos, presumivelmente devido à adição de cal como agente dessulfurante no processo da fabricação do aço. A dissociação desses compostos em solução pode levar a formação de ions de cálcio Ca^{2+} e ions hidroxila OH^- , responsáveis pelo aumento do valor de pH. Segundo Little *et al.*, 2010 *apud* Oliveira Bridi, 2020, para fins rodoviários, o pH é uma variável importante na promoção e na sustentabilidade das reações de hidratação, a curto prazo, e das reações pozolânicas, a longo prazo, ambas desenvolvidas na estabilização química de solos.

O resultado da basicidade do Potencial Hidrogeniônico do pó de escória KR era o esperado, isto, devido à relação mássica entre os compostos de CaO/SiO_2 , denominada C/S, obtida do ensaio de fluorescência de raios-X, onde valores de $\text{C/S} > 1$ classifica o material como básico. No caso do KRSP o valor da relação está dado por $\text{C/S} = 31,60 \% / 10,60 \% = 2,98$, classificando-se como um material básico.

4.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.2.1. Granulometria por peneiramento e sedimentação

Na Tabela 5, são apresentados os resultados da distribuição granulométrica com base nas faixas granulométricas habitualmente reconhecidas na engenharia geotécnica (argila, silte, areia fina, areia média, areia grossa, pedregulho fino, pedregulho médio e pedregulho grosso). Esses resultados foram obtidos por meio dos ensaios de determinação da granulometria por peneiramento e sedimentação das amostras submetidas a esses procedimentos.

Por sua vez, na Figura 26, podemos observar o comportamento das curvas de distribuição granulométrica das amostras analisadas. Essas curvas nos fornecem informações valiosas sobre

a distribuição dos diferentes tamanhos de partículas presentes nas amostras, permitindo uma melhor compreensão da composição granulométrica do material analisado.

Tabela 5 - Distribuição granulométrica das amostras

<i>Fração passante acumulada (%)</i>	<i>Solo</i>	<i>KRSP</i>	<i>SKRSP3</i>	<i>SKRSP5</i>	<i>KR100 (Oliveira Bridi, 2020)</i>	<i>KR100 (Furieri, 2019)</i>
<i>4,8 mm (N° 4)</i>	98,80	100	98,97	99,60	58,00	36,60
<i>2,0 mm (N° 10)</i>	95,20	100	96,58	98,32	34,00	16,00
<i>0,42 mm (N° 40)</i>	63,28	99,94	70,83	73,52	25,50	11,00
<i>0,075 mm (N° 200)</i>	43,92	96,75	45,90	50,47	11,50	3,00

De acordo com os resultados obtidos e o Manual de pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2016), é possível classificar o solo e as misturas solo-coproducto KR com base no tamanho de grãos, sendo consideradas como areias aquelas frações de solo que passam pela peneira de 2,00 mm (N° 10) e ficam retidas na peneira de 0,075 mm (N° 200). Além disso, observa-se que a fração de silte e argila representa mais de 40% do total. No caso específico do pó do coproducto KR, constata-se que este é predominantemente constituído por partículas de diâmetros inferiores a 0,0075 mm, conforme ilustrado na Figura 26.

Ao analisarmos a dimensão das partículas dos coproductos KR utilizados nos estudos de Oliveira Bridi (2020) e Furieri (2019), é possível observar a presença de uma fração grossa claramente definida. Em contraste, no caso da fração fina, as frações passantes acumuladas encontradas por esses autores são de 11,50% e 3,00%, respectivamente. Em contraposição, no presente estudo, a fração fina do coproducto utilizado apresenta um valor de 96,75% para as frações passantes acumuladas.

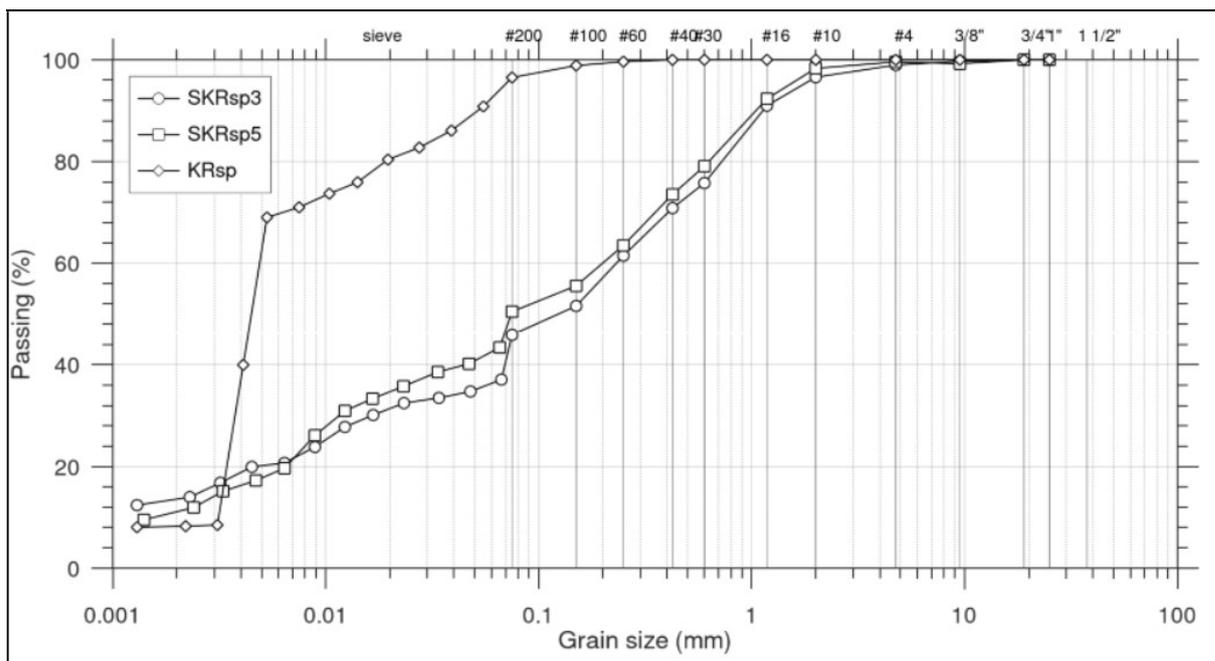


Figura 26. Curvas granulométricas das amostras.

Com base nas informações apresentadas na Figura 26, pode ser observado que o comportamento das distribuições granulométricas das misturas SKRSP3 e SKRSP5 é semelhante, embora haja uma pequena variação nos valores da fração passante acumulada. Essa variação pode ser atribuída à maior quantidade de coproduto KRSP adicionada na mistura SKRSP5 em comparação com a mistura SKRSP3.

De acordo com Shen *et al.* (2014), a formação das faixas granulométricas mais grossas do coproduto de dessulfuração KR está relacionada ao teor residual de escória de alto-forno não removida na etapa de alto-forno e ao teor residual de ferro não removido na etapa de separação magnética. No caso do KRSP, que é um produto resultante do despoeiramento dos filtros de mangas para redução da poluição do ar e se trata de um pó, espera-se a formação de faixas granulométricas mais finas.

4.2.2. Massa específica real dos grãos

Os resultados obtidos no experimento de determinação da massa específica real dos grãos são apresentados na Tabela 6. Esse ensaio visa medir a densidade dos grãos, fornecendo informações sobre a sua compactidade e eficiência de empacotamento.

Tabela 6 – Massa específica real dos grãos

<i>Massa específica real dos grãos (g/cm³)</i>	<i>Solo</i>	<i>KRSP</i>	<i>SKRSP3</i>	<i>SKRSP5</i>	<i>KR100 (Oliveira Bridi, 2020)</i>	<i>KR100 (Furieri, 2019)</i>
	2,66	2,23	2,61	2,59	3,18	3,31

Observa-se que a amostra de solo revelou uma densidade de 2,66 g/cm³, sendo que a adição do coproduto KRSP resultou em uma diminuição nos valores de densidade do solo (2,61 g/cm³ e 2,59 g/cm³) em decorrência do acréscimo de massa do referido coproduto. Tal fenômeno é atribuído à baixa densidade específica do coproduto KRSP.

Em contraposição, é importante ressaltar que as diferentes escórias siderúrgicas apresentam uma considerável amplitude de variação nos valores de massa específica, devido à sua composição intrínseca e aos processos envolvidos na cadeia produtiva. Em relação à amostra KRSP em particular, constata-se um valor de 2,23 g/cm³, o qual é relativamente baixo quando comparado aos resultados obtidos por Oliveira Bridi (2020) e Furieri (2019), os quais reportaram valores de 3,18 g/cm³ e 3,31 g/cm³, respectivamente. A massa específica dos grãos do KRSP deve ser consequência da ausência de teores de ferro em sua composição química, bem como da distribuição granulométrica dos grãos.

4.2.3. Limites de consistência

Os resultados das determinações dos limites de liquidez, limites de plasticidade e índice de plasticidade das amostras submetidas aos ensaios foram registrados e apresentados na Tabela 7.

A análise dos dados da Tabela 7 revela que a amostra de solo em estudo demonstra valores de limite de liquidez e limite de plasticidade de 36,6% e 21,1% respectivamente, além de um índice de plasticidade de 15,5%. Em contrapartida, o coproduto KR revela um comportamento não-líquido e não-plástico, o que corrobora com os achados de pesquisas anteriores conduzidas por Oliveira Bridi (2020), Furieri (2019), Ramos (2018) e Gonçalves (2016).

Tabela 7– Limites de consistência

<i>Limites de consistência</i>	<i>Solo</i>	<i>KRSP</i>	<i>SKRSP3</i>	<i>SKRSP5</i>	<i>KR100 (Oliveira Bridi, 2020)</i>
Limite de liquidez (%)	36,6	NL	NL	NL	NL
Limite de plasticidade (%)	21,1	NP	NP	NP	NP
Índice de plasticidade (%)	15,5	-	-	-	-

A inclusão do coproduto de KR em pó nas amostras de solo (SKRSP3 e SKRSP5) ocasionou alterações significativas nos índices de liquidez (LL) e plasticidade (LP) das misturas, resultando em uma transformação do solo, que passou a se comportar de maneira semelhante ao coproduto de KR. De acordo com Oliveira Bridi (2020), não foram observadas mudanças significativas nos valores de LL e LP nas amostras de solo ensaiadas. Isso ocorreu devido à exclusão das frações granulométricas superiores a 0,425 mm durante a realização dos ensaios, o que reduziu a presença do coproduto (que é composto por aproximadamente 76% de grãos com diâmetro maior que 0,425 mm) e também possui uma menor porcentagem de grãos com diâmetro inferior a 0,075 mm (11,50%), em comparação com os 96,75% do coproduto de KR utilizado no presente estudo.

4.2.4. Classificação dos solos

A classificação de solos é um processo fundamental na engenharia geotécnica, pois permite compreender e categorizar os diferentes tipos de solos presentes em uma área, levando em consideração suas propriedades físicas e características geotécnicas. Nesse sentido, duas metodologias tradicionais têm sido amplamente utilizadas nesse campo: a metodologia AASHTO (sigla em inglês para Associação Americana de Autoridades de Estradas e Transportes) e a SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos).

A metodologia AASHTO é baseada em critérios específicos definidos por essa associação, com o objetivo de classificar os solos de acordo com sua resistência, granulometria e propriedades de expansão. Nesse método, são atribuídos diferentes grupos e subgrupos aos solos, de forma a facilitar a compreensão das suas características e auxiliar na tomada de decisões relacionadas a projetos de engenharia.

Já o SUCS, também amplamente utilizado, aborda a classificação dos solos a partir de sua textura e características de plasticidade. Esse sistema considera a presença de argila, silte e areia no solo, além de definir limites e parâmetros para a classificação propriamente dita. Dessa forma, permite uma análise mais precisa e detalhada das características geotécnicas dos solos.

A classificação do solo e misturas foram realizadas de acordo às duas metodologias acima supracitada.

- **Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)**

Na Figura 27, é exibido o ponto referente à amostra de solo puro no ábaco de Casagrande, o qual permite a classificação do solo de acordo com suas propriedades de limites de Atterberg. Além disso, na Tabela 8, são apresentadas as identificações das amostras submetidas a essa classificação. Porém, é importante ressaltar que as misturas de solo com o coproduto KR não podem ser representadas no ábaco de Casagrande devido à ausência de propriedades de liquidez e plasticidade, conforme evidenciado na Tabela 8.

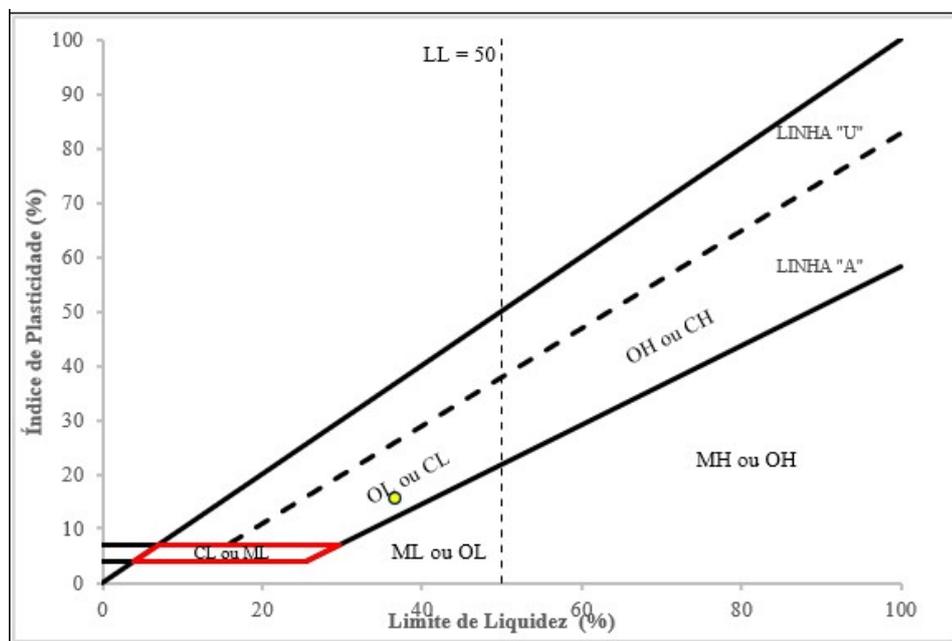


Figura 27. Ábaco de Casagrande SUCS.

Tabela 8– Classificação de solos SUCS

<i>Classificação SUCS</i>	<i>Solo</i>	<i>KRSP</i>	<i>SKRSP3</i>	<i>SKRSP5</i>
Identificação	CL	SM	SM	SM
Descrição	Argila de baixa compressibilidade		Areia siltosa	

De acordo com a análise demonstrada na Figura 27, é possível classificar o solo como CL, ou seja, como argila de baixa compressibilidade. No caso das misturas solo-KR e pó de KR, estas são classificadas como areias siltosas (SM) devido à incorporação do pó de KR na mistura de argila, o que resulta na ausência de características de liquidez e plasticidade mencionadas anteriormente. Os resultados da classificação do solo e das misturas de acordo com o método SUCS podem ser observados na Tabela 8.

- **American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)**

A Tabela 9 ilustra os índices de grupo e as identificações das amostras utilizadas na classificação AASHTO, acompanhadas de suas respectivas descrições dos materiais predominantes.

Tabela 9– Classificação de solos AASHTO

<i>Classificação AASHTO</i>	<i>Solo</i>	<i>KRSP</i>	<i>SKRSP3</i>	<i>SKRSP5</i>
Índice de grupo	A6	A4	A4	A4
Descrição	Solo argiloso		Solos siltosos	

Observa-se claramente que a adição de KRSP em quantidades reduzidas (3% e 5%) provoca a mudança na classificação do solo argiloso A6 para um solo siltoso A4 e A4, respectivamente. É válido salientar que esse comportamento foi também observado na classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos).

Conforme os resultados obtidos nos métodos de classificação de solos SUCS e AASHTO, em ambos os métodos, o solo puro classificou-se como um solo argiloso (CL, A6). E quando adicionado o pó de dessulfuração de KR, observou-se com que as classificações mudaram, sendo estas as de uma areia siltosa (SM) no método SUCS e de um solo siltoso (A4) no método AASHTO. Isto, devido a que as adições de 3,0% e 5,0% do coproduto fizeram com que passasse de um solo com plasticidade e liquidez, um solo não líquido e não plástico.

4.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

No intuito de caracterizar mecanicamente as misturas de solo e coproduto KR, foram realizados ensaios de compactação, expansão, CBR, Resistência à compressão simples, Módulo de Resiliência e Deformação Permanente. Esses ensaios foram conduzidos no Laboratório de Geotecnia da PROPAV Eireli, seguindo as normas técnicas NBR 7182/16 - Solo: Ensaio de Compactação, utilizando energia Proctor Intermediária; NBR 9895/87 - Solo: Índice de Suporte Califórnia; NBR 12253/12 – Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento – Procedimento; DNIT ME 134 - Pavimentação - Solos - Determinação do Módulo de Resiliência - Método de Ensaio; e DNIT 179/2018 - Instrução de Ensaio.

4.3.1. Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação visam determinar a massa específica aparente seca máxima e os valores de umidade ótima do solo puro, assim como das misturas de solo-coproduto KR. Tais ensaios foram realizados empregando-se a energia de Proctor intermediária, a fim de obter resultados precisos e confiáveis. A Figura 28 apresenta os resultados obtidos a partir desses ensaios, proporcionando uma visualização clara e representativa dessas propriedades dos materiais estudados.

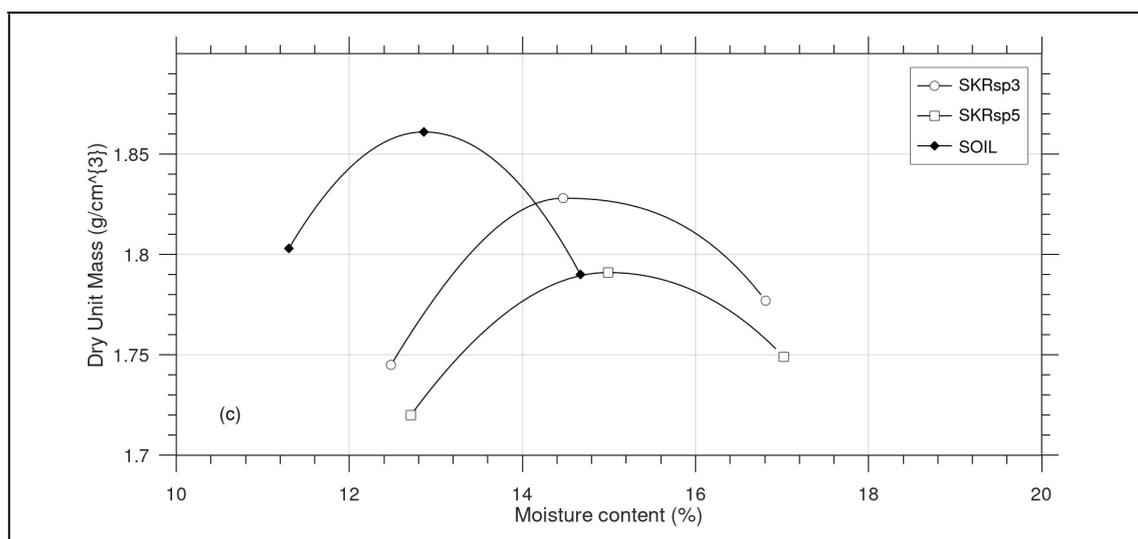


Figura 28. Curvas de compactação do solo e misturas.

Um resumo dos resultados obtidos na execução dos ensaios é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10– Resultados do ensaio de compactação das amostras

<i>Ensaio de compactação</i>	<i>Solo</i>	<i>SKRSP3</i>	<i>SKRSP5</i>
Massa Específica Aparente Seca Máxima (g/cm ³)	1.860	1.831	1.791
Umidade ótima (%)	12.80	14.90	15.20

Ao realizar uma análise extensiva das curvas de compactação, é possível constatar que a inclusão do coproduto KR acarreta a diminuição do valor da massa específica aparente. Notavelmente, quanto maiores forem os valores de coproduto KR utilizados, menores serão os valores de massa específica obtidos. Tal comportamento pode ser claramente observado na nos resultados expostos na Tabela 10. Essa tendência se assemelha ao que é observado nos dados correspondentes à massa específica real dos grãos.

Ao analisar essa tendência, constata-se um padrão decrescente nos valores das massas conforme ocorre um aumento na porcentagem de coproduto KR adicionado. Porém, é importante destacar o aumento nos valores da umidade ótima à medida que aumenta o teor do referido coproduto nas misturas. Este comportamento pode ser atribuído ao aumento da superfície específica dos grãos presentes nas misturas, resultante da adição do coproduto KR, que consiste principalmente de diâmetros de grãos inferiores a 0,075 mm (representando 96,75% do material). Segundo Kou *et al* (2014), as escórias provenientes do processo de dessulfuração são conhecidas por sua alta capacidade de absorção de água.

4.3.2. Índice de suporte California (CBR) e Expansão

Após a realização dos ensaios de compactação, os corpos de prova foram imersos em água por um período de 96 horas, a fim de determinar os valores dos índices de suporte California. A figura 29 representa graficamente o comportamento obtido para as amostras analisadas, evidenciando as propriedades de resistência e capacidade do solo em suportar cargas.

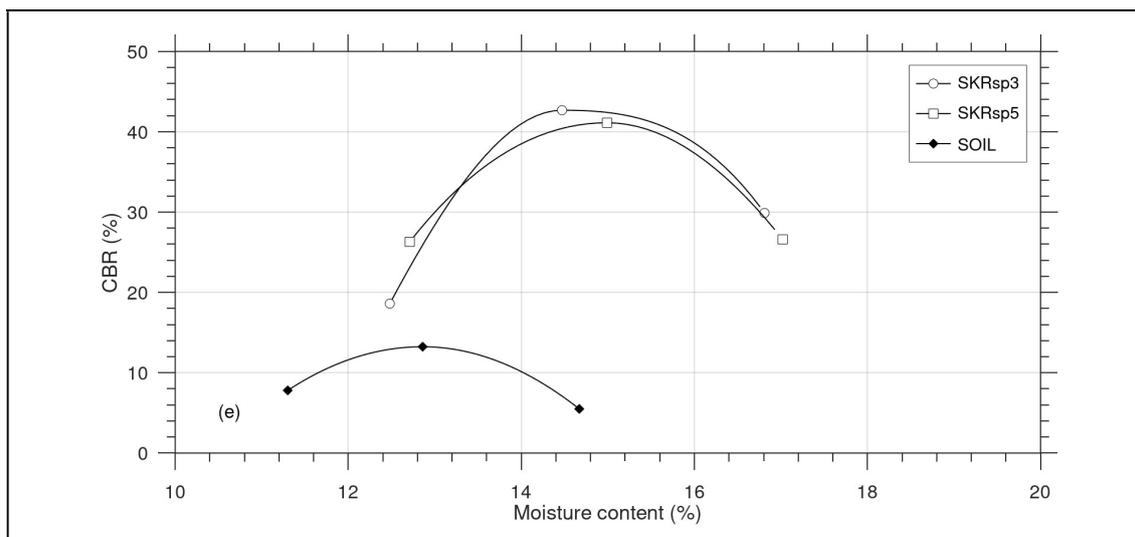


Figura 29. Curvas de CBR do solo e misturas.

Na Figura 29, é possível observar que as duas misturas analisadas apresentaram desempenho semelhante em termos de CBR. Após a adição do pó de escória KR, os valores de CBR aumentaram em comparação ao solo puro. Na verdade, houve um incremento de 13% para 42% e 41% para o solo argiloso quando misturado com 3% e 5% de KRSP, respectivamente. Isso significa um aumento de 300% nos valores de CBR em ambos os casos, indicando que o pó de escória KR tem a capacidade de estabilizar a argila arenosa vermelha. Tal capacidade pode ser atribuída a um efeito sinérgico de troca catiônica e reações pozolânicas, conforme mencionado por Oliveira *et al.* (2019).

Na Figura 29 e Tabela 11, é possível observar que os índices de suporte California para a mistura SKRSP3 apresentaram valores ligeiramente superiores em relação à sua contraparte com 5% de KRSP incorporado. Essa discrepância pode ser atribuída ao fato de que o período de cura de 4 dias não foi suficiente para uma reação completa da mistura SKRSP5. Essa conclusão segue uma linha de raciocínio semelhante às encontradas por Shulka e Parihar (2016), que investigaram a incorporação de escória microfina em solo argiloso plástico

Tabela 11 – Resultados do ensaio de CBR

<i>Ensaio de compactação</i>	<i>Solo</i>	<i>SKRSP3</i>	<i>SKRSP5</i>
CBR (%)	13,12	42,40	41,00
Expansão (%)		0,04	0,47

No entanto, é importante ressaltar que, apesar de atenderem aos critérios estabelecidos pela norma para sub-base rodoviária, as misturas não apresentam valores de CBR superiores a 80%, exigidos para aplicação em base rodoviária.

Apesar dessa restrição, as misturas demonstram ótimo desempenho como soluções de estabilização de solo, especialmente para a formação de sub-bases rodoviárias (CBR > 20%). A baixa expansão observada, abaixo do limite máximo estabelecido pelas normas brasileiras, confirma sua capacidade de minimizar problemas relacionados à deformação do solo durante a vida útil da pavimentação.

Além disso, vale ressaltar que embora as misturas não possuam a granulometria para o seu uso como sub-base, a aplicação delas como alternativas de solução para estabilização de solo traz diversos benefícios. O uso desse tipo de técnica contribui para a redução de custos em relação a outras opções de melhoria e reforço de solos. Além disso, promove a sustentabilidade na construção e manutenção de rodovias, uma vez que reduz o desperdício de material e contribui para a preservação do meio ambiente.

4.3.3. Resistência à compressão simples (UCS)

Os resultados dos testes de resistência à compressão simples (UCS) foram comparados com o preconizado na brasileira ABNT NBR 12253 (ABNT, 2012) para misturas solo-cimento. Os resultados indicam que, quando foi adicionado 3,0% de pó de dessulfuração KR, o SKRSP3 apresentou um valor máximo de UCS de 1,25 MPa após 7 dias de cura. No entanto, esse valor está abaixo do valor mínimo exigido de 2,1 MPa para aplicações em pavimentos, conforme descrito na norma brasileira ABNT NBR 12253 (ABNT, 2012).

De acordo com Hernandez *et al.* (2018), o tipo de cura e as condições de umidade durante os primeiros dias de hidratação das pastas de cimento influenciam a formação do gel CSH, além do tamanho, quantidade e distribuição dos cristais de portlandita. A cura em condições secas permite a perda de água, o que gera uma diminuição na velocidade e nas características dos processos de hidratação, causando alterações na microestrutura da pasta que afetam diretamente suas propriedades mecânicas, especialmente a resistência à compressão.

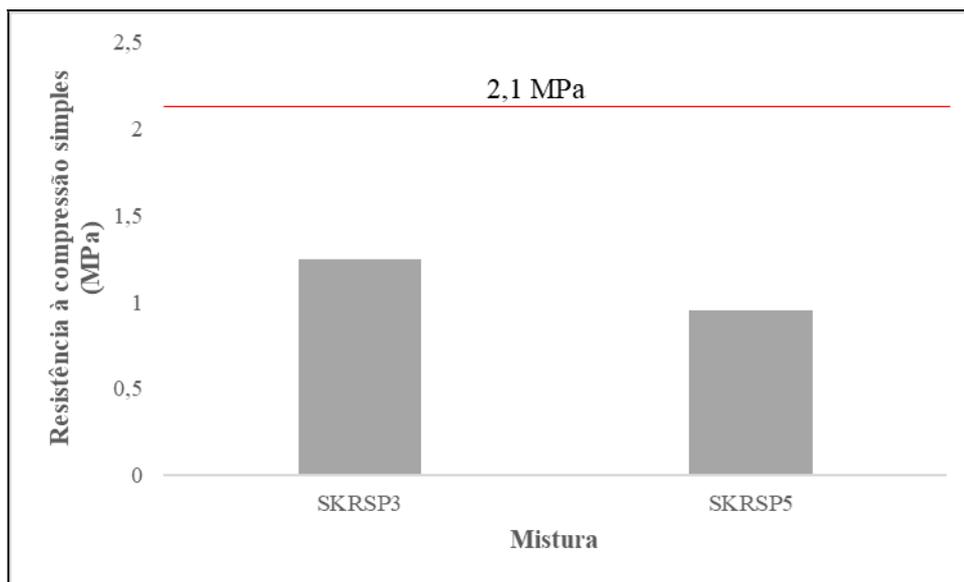


Figura 30 - Resistência à compressão simples das misturas após 7 dias de cura

A mistura SKRSP5 apresentou um valor máximo de UCS de 0,95 MPa, o que não atende aos critérios mínimos para aplicações em pavimentação e é inferior à mistura SKRSP3 (conforme Figura 30). Embora esses resultados não atendam à norma brasileira, são promissores, pois o KRSP pode fornecer uma solução alternativa para a estabilização de solos de baixa qualidade.

4.3.4. Módulo de resiliência (MR)

Os resultados do módulo resiliente foram obtidos a partir de testes triaxiais dinâmicos para misturas SKRSP3 e SKRSP5 após o tempo de cura de 96 horas são apresentados nas Figuras 31 e 32, assim como nas Tabelas 16 e 20. Trabalhou-se com 4 modelos de equações (Equações 1) para observar o comportamento das misturas diante da influência das tensões aplicadas.

- (a) $MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$ (1)
- (b) $MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$
- (c) $MR = k_1 \cdot \theta^{k_2}$
- (d) $MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$

O modelo (a) toma a tensão confinante como única influenciadora para a determinação do módulo de resiliência, enquanto o modelo (b) utiliza somente a tensão desvio. O modelo (c) é composto da soma das tensões principais ($\theta = \sigma_d + 3\sigma_3$), e o modelo (d) é composto pelas duas variáveis e possível ainda analisar qual das duas tem maior influência sobre o resultado.

Para a determinação dos modelos dos módulos de resiliência foram ensaiados 3 corpos-de-prova para cada mistura, e utilizados os valores de estes para a definição dos modelos matemáticos que melhor representam o comportamento dos solos com diferentes pares de tensões. A norma DNIT 134/2010 – ME (Tabela 12) apresenta os diferentes pares de tensões aplicados nas amostras, sendo estas:

Tabela 12 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência, DNIT 134/2010-ME

σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	σ_3/σ_d	σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	σ_3/σ_d
	0,020	2		0,070	2
0,020	0,040	3	0,070	0,140	3
	0,060	4		0,210	4
	0,035	2		0,105	2
0,035	0,070	3	0,105	0,210	3
	0,105	4		0,315	4
	0,050	2		0,140	2
0,050	0,100	3	0,140	0,280	3
	0,150	4		0,420	4

- **Mistura – SKRSP3**

Os resultados do ensaio de MR para a mistura SKRSP3 podem ser visualizados na Tabela 13, 14 e 15 e ilustrado nas Figuras 31 (a), (b), (c) e (d).

Tabela 13 – Ensaio do MR, CP01 – SKRSP3

Tensões de referência		Tensões do Ensaio						
(DNIT - 134/2018)		(DNIT - 134/2018)						
- Tabela 2		- Tabela 2						
σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	% diferença σ_3	% desvio σ_d	ϵ_r	MR (Mpa)	
	0,020	0,02180	0,02245	9,00%	12,25%	1,15E-04	194,530	
0,020	0,040	0,02133	0,04228	6,63%	5,70%	1,98E-04	213,236	
	0,060	0,02143	0,06237	7,13%	3,95%	2,91E-04	214,387	
	0,035	0,03668	0,03722	4,79%	6,34%	4,96E-05	757,576	
0,035	0,070	0,03653	0,07191	4,36%	2,73%	1,85E-04	389,769	
	0,105	0,03638	0,10663	3,93%	1,55%	3,85E-04	276,714	
	0,050	0,05143	0,05161	2,85%	3,22%	7,89E-05	654,718	
0,050	0,100	0,05165	0,10174	3,30%	1,74%	2,86E-04	355,496	
	0,150	0,05210	0,15192	4,20%	1,28%	5,37E-04	283,154	
	0,070	0,07158	0,07126	2,25%	1,80%	1,33E-04	537,731	
0,070	0,140	0,07143	0,14177	2,04%	1,26%	4,39E-04	322,834	
	0,210	0,07138	0,21204	1,96%	0,97%	7,85E-04	270,171	
	0,105	0,10728	0,10660	2,17%	1,52%	2,50E-04	426,965	
0,105	0,210	0,10730	0,21195	2,19%	0,93%	6,94E-04	305,475	
	0,315	0,10693	0,31945	1,83%	1,41%	1,10E-03	290,427	
	0,140	0,14263	0,14229	1,87%	1,63%	3,40E-04	418,428	
0,140	0,280	0,14228	0,28364	1,63%	1,30%	8,70E-04	326,077	
	0,420	0,14228	0,42351	1,63%	0,83%	1,39E-03	304,623	

Tabela 14 – Ensaio do MR, CP02 – SKRSP3

Tensões de referência		Tensões do Ensaio						
(DNIT - 134/2018)		(DNIT - 134/2018)						
- Tabela 2		- Tabela 2						
σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	% diferença σ_3	% desvio σ_d	ϵ_r	MR (Mpa)	
	0,020	0,02138	0,02169	6,88%	8,45%	8,32E-05	260,828	
0,020	0,040	0,02135	0,04212	6,75%	5,29%	1,70E-04	248,298	
	0,060	0,02178	0,06197	8,87%	3,29%	3,01E-04	205,948	
0,035	0,035	0,03673	0,03698	4,93%	5,66%	9,22E-05	401,408	
	0,070	0,03665	0,07164	4,71%	2,34%	2,82E-04	253,895	

	0,105	0,03658	0,10679	4,50%	1,70%	5,27E-04	202,709
	0,050	0,05193	0,05205	3,85%	4,09%	1,00E-04	518,853
0,050	0,100	0,05195	0,10157	3,90%	1,57%	3,59E-04	283,024
	0,150	0,05185	0,15202	3,70%	1,35%	6,39E-04	238,019
	0,070	0,07153	0,07196	2,18%	2,80%	1,93E-04	372,199
0,070	0,140	0,07140	0,14217	2,00%	1,55%	5,39E-04	263,671
	0,210	0,07138	0,21208	1,96%	0,99%	9,17E-04	231,239
	0,105	0,10728	0,10692	2,17%	1,83%	2,93E-04	364,967
0,105	0,210	0,10703	0,21214	1,93%	1,02%	7,73E-04	274,473
	0,315	0,10703	0,31818	1,93%	1,01%	1,26E-03	252,467
	0,140	0,14258	0,14232	1,84%	1,66%	3,92E-04	363,282
0,140	0,280	0,14225	0,28368	1,61%	1,31%	9,86E-04	287,635
	0,420	0,14235	0,42142	1,68%	0,34%	1,56E-03	270,703

Tabela 15 – Ensaio do MR, CP03 – SKRSP3

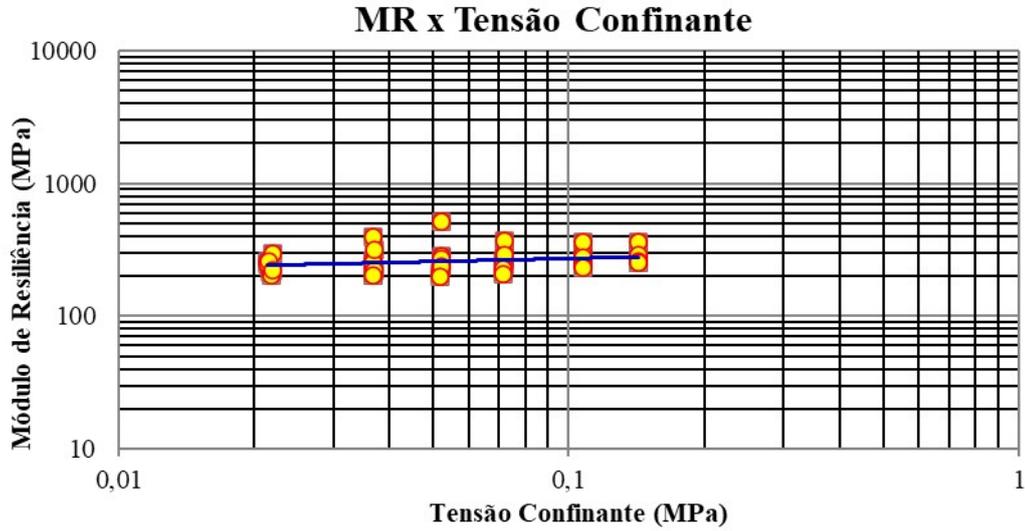
Tensões de referência

Tensões do Ensaio

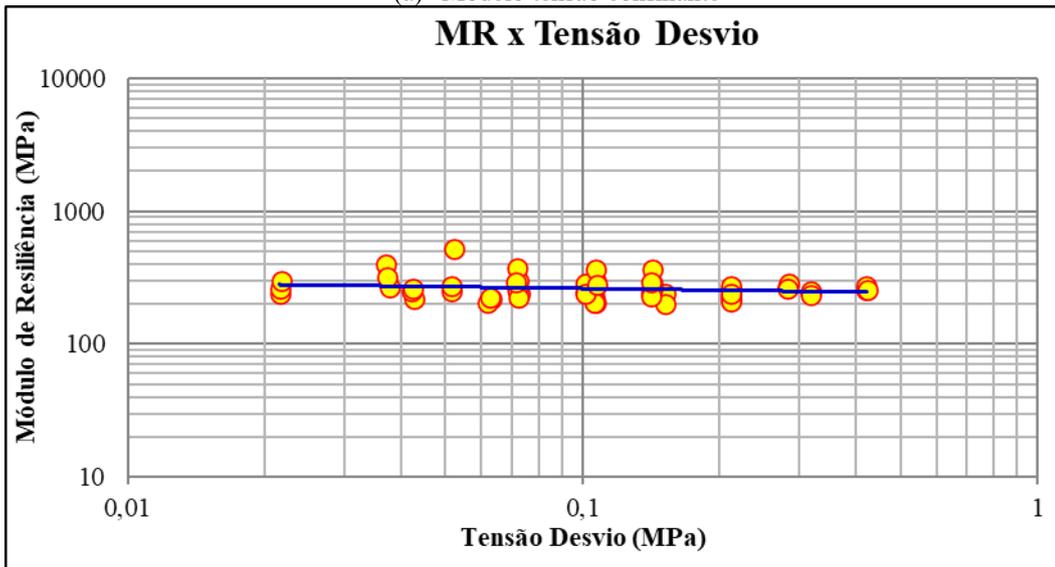
**(DNIT - 134/2018)
- Tabela 2**

σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	% diferença σ_3	% desvio σ_d	ϵ_r	MR (Mpa)
	0,020	0,02195	0,02178	9,75%	8,90%	7,33E-05	297,015
0,020	0,040	0,02143	0,04248	7,13%	6,20%	1,63E-04	260,754
	0,060	0,02185	0,06253	9,25%	4,22%	2,79E-04	223,803
	0,035	0,03698	0,03726	5,64%	6,46%	1,17E-04	319,915
0,035	0,070	0,03683	0,07230	5,21%	3,29%	3,23E-04	224,124
	0,105	0,03675	0,10609	5,00%	1,04%	5,17E-04	205,390
	0,050	0,05193	0,05157	3,85%	3,13%	1,89E-04	272,863
0,050	0,100	0,05190	0,10144	3,80%	1,44%	4,29E-04	236,683
	0,150	0,05168	0,15211	3,35%	1,40%	7,54E-04	201,800
	0,070	0,07158	0,07138	2,25%	1,97%	2,43E-04	293,978
0,070	0,140	0,07143	0,14176	2,04%	1,26%	6,18E-04	229,544
	0,210	0,07120	0,21215	1,71%	1,02%	1,01E-03	209,760
	0,105	0,10740	0,10749	2,29%	2,37%	3,86E-04	278,196
0,105	0,210	0,10725	0,21194	2,14%	0,92%	8,83E-04	240,059
	0,315	0,10720	0,31692	2,10%	0,61%	1,34E-03	236,304
	0,140	0,14255	0,14183	1,82%	1,31%	4,82E-04	294,298
0,140	0,280	0,14263	0,28216	1,87%	0,77%	1,07E-03	263,757
	0,420	0,14228	0,42177	1,63%	0,42%	1,65E-03	255,402

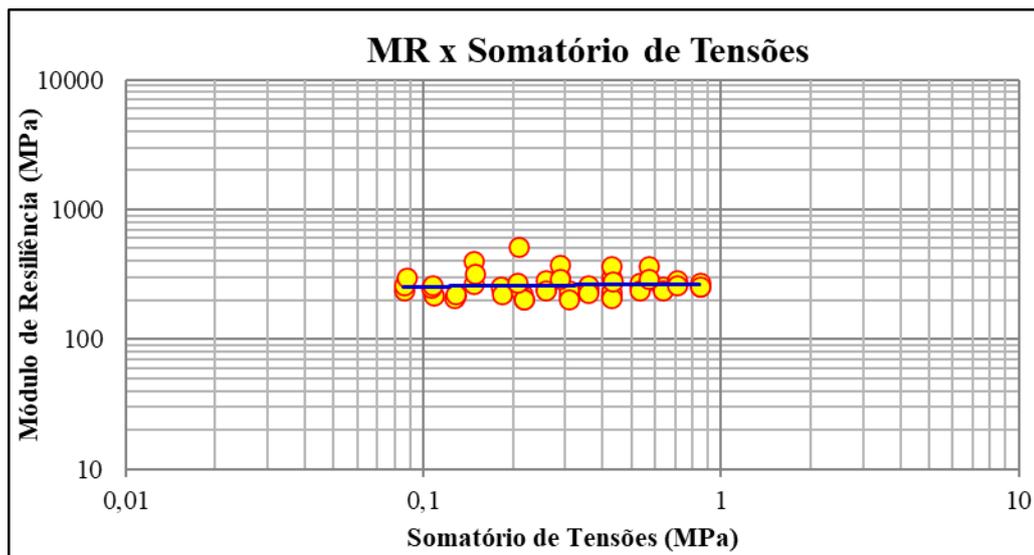
Para os modelos matemáticos foram utilizados os valores de módulos de resiliência obtidos da aplicação da sequência de tensões dos corpos-de-prova ensaiados, ou seja, estes foram agrupados. A representação gráfica dos modelos é apresentada na Figura 31.



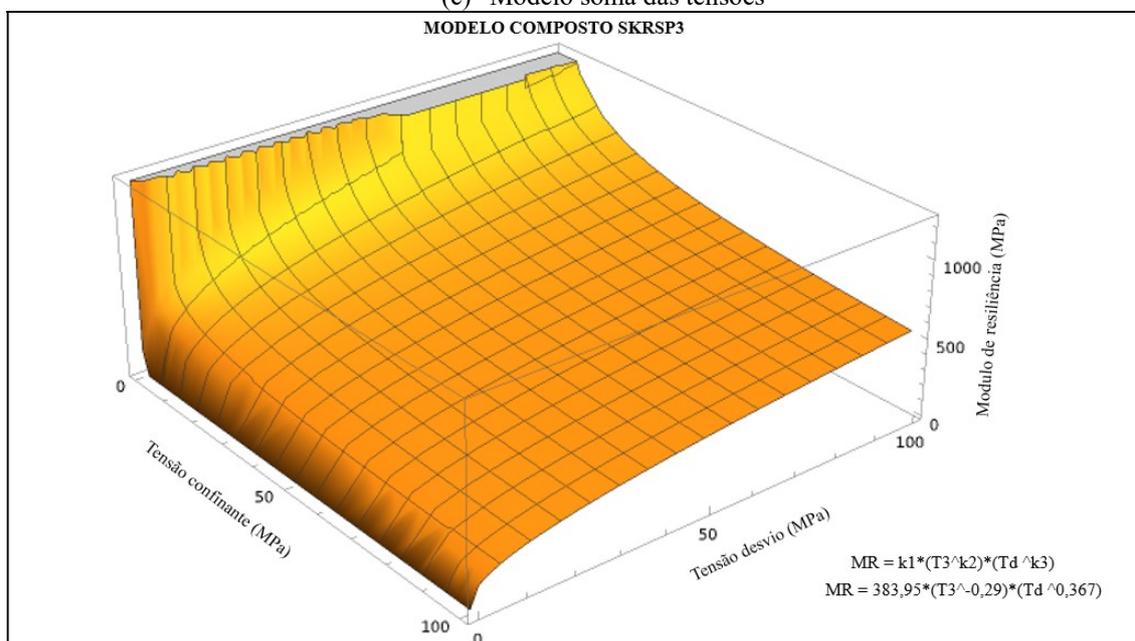
(a) Modelo tensão confinante



(b) Modelo tensão desvio



(c) Modelo soma das tensões



(d) Modelo composto

Figura 31. Modelos do Módulo de resiliência da mistura SKRSP3.

Para a obtenção dos parâmetros dos modelos elásticos não lineares gerados, foi realizada uma retroanálise, a Tabela 16 apresenta os valores obtidos assim como os valores de R-square.

Tabela 16– Resultados dos coeficientes do Módulo de resiliência da mistura SKRSP3

<i>Modelo</i>	<i>k₁</i>	<i>k₂</i>	<i>k₃</i>	<i>R²</i>
$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$	322,63	0,076	-	0,071
$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	236,31	-0,044	-	0,035

$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2}$	268,15	0,023	-	0,007
$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	383,95	-0,29	0,367	0,576

Ao analisar os dados anteriormente expostos, percebe-se que o modelo de tensão confinante, tensão desvio, e somatório de tensões não se adequam bem aos resultados obtidos para a mistura SKRSP3, resultando em baixos valores de R^2 . Por outro lado, o modelo composto apresentou R^2 um de 57,6%, representando melhor o comportamento do módulo de resiliência com a variação das tensões, tanto as de confinamento quanto a tensão desvio.

- **Mistura – SKRSP5**

Os resultados do ensaio de MR para a mistura SKRSP5 podem ser visualizados na Tabela 17, 18 e 19 e ilustrado nas Figuras 32 (a), (b), (c) e (d).

Tabela 17 – Ensaio do MR, CP01 – SKRSP5

Tensões de referência		Tensões do Ensaio							
(DNIT - 134/2018)									
- Tabela 2									
σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	% diferença σ_3	% desvio σ_d	ϵ_r	MR (Mpa)		
	0,020	0,02150	0,02161	7,50%	8,03%	9,12E-05	237,122		
0,020	0,040	0,02165	0,04273	8,25%	6,82%	1,96E-04	217,857		
	0,060	0,02175	0,06290	8,75%	4,83%	2,91E-04	216,565		
	0,035	0,03675	0,03775	5,00%	7,85%	1,41E-04	268,185		
0,035	0,070	0,03663	0,07300	4,64%	4,29%	3,05E-04	239,225		
	0,105	0,03663	0,10612	4,64%	1,07%	4,77E-04	222,578		
	0,050	0,05198	0,05147	3,95%	2,93%	2,04E-04	252,007		
0,050	0,100	0,05200	0,10141	4,00%	1,41%	4,15E-04	244,323		
	0,150	0,05178	0,15144	3,55%	0,96%	7,02E-04	215,609		
	0,070	0,07163	0,07216	2,32%	3,09%	2,42E-04	298,516		
0,070	0,140	0,07153	0,14191	2,18%	1,36%	5,86E-04	242,138		
	0,210	0,07133	0,21219	1,89%	1,04%	9,68E-04	219,238		
	0,105	0,10728	0,10686	2,17%	1,77%	3,55E-04	301,101		
0,105	0,210	0,10735	0,21179	2,24%	0,85%	8,21E-04	258,057		
	0,315	0,10715	0,31716	2,05%	0,69%	1,30E-03	244,846		
0,140	0,140	0,14253	0,14214	1,80%	1,53%	4,94E-04	287,547		

0,280	0,14228	0,28196	1,63%	0,70%	1,06E-03	266,296
0,420	0,14223	0,42152	1,59%	0,36%	1,65E-03	255,532

Tabela 18 – Ensaio do MR, CP02 – SKRSP5

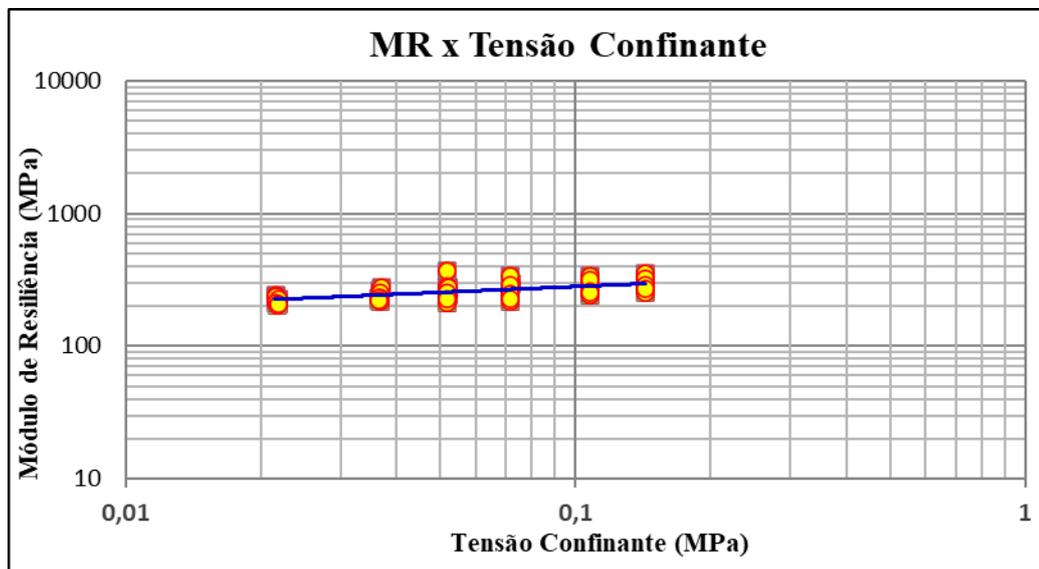
Tensões de referência		Tensões do Ensaio					
(DNIT - 134/2018)							
- Tabela 2							
σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	% diferença σ_3	% desvio σ_d	ϵ_r	MR (Mpa)
	0,020	0,02150	0,02247	7,50%	12,33%	9,27E-05	242,295
0,020	0,040	0,02145	0,04293	7,25%	7,31%	1,78E-04	240,998
	0,060	0,02178	0,06250	8,87%	4,17%	2,75E-04	227,345
	0,035	0,03685	0,03783	5,29%	8,07%	1,35E-04	280,117
0,035	0,070	0,03675	0,07226	5,00%	3,22%	2,80E-04	258,179
	0,105	0,03665	0,10713	4,71%	2,02%	4,57E-04	234,297
	0,050	0,05175	0,05265	3,50%	5,31%	1,42E-04	369,769
0,050	0,100	0,05170	0,10196	3,40%	1,96%	3,60E-04	283,506
	0,150	0,05163	0,15215	3,25%	1,43%	6,05E-04	251,648
	0,070	0,07153	0,07186	2,18%	2,65%	2,09E-04	343,591
0,070	0,140	0,07150	0,14192	2,14%	1,37%	5,29E-04	268,317
	0,210	0,07128	0,21231	1,82%	1,10%	8,24E-04	257,777
	0,105	0,10740	0,10722	2,29%	2,12%	3,17E-04	337,748
0,105	0,210	0,10710	0,21213	2,00%	1,02%	7,07E-04	300,255
	0,315	0,10705	0,31731	1,95%	0,73%	1,13E-03	280,309
	0,140	0,14253	0,14278	1,80%	1,99%	3,97E-04	360,141
0,140	0,280	0,14248	0,28297	1,77%	1,06%	9,19E-04	307,888
	0,420	0,14213	0,42336	1,52%	0,80%	1,45E-03	292,365

Tabela 19 – Ensaio do MR, CP03 – SKRSP5

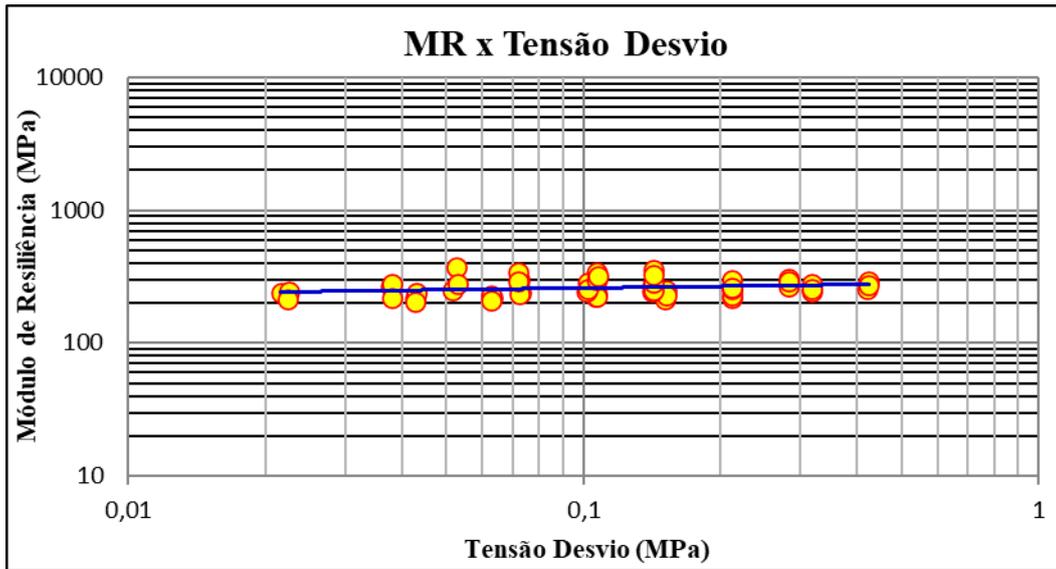
Tensões de referência		Tensões do Ensaio					
(DNIT - 134/2018)							
- Tabela 2							
σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	% diferença σ_3	% desvio σ_d	ϵ_r	MR (Mpa)
	0,020	0,02145	0,02242	7,25%	12,10%	1,06E-04	212,182
0,020	0,040	0,02163	0,04260	8,12%	6,49%	2,07E-04	205,553
	0,060	0,02173	0,06258	8,63%	4,30%	3,00E-04	208,714
0,035	0,035	0,03678	0,03793	5,07%	8,37%	1,73E-04	219,107

	0,070	0,03648	0,07242	4,21%	3,46%	3,09E-04	234,460
	0,105	0,03638	0,10707	3,93%	1,97%	4,78E-04	224,041
	0,050	0,05185	0,05279	3,70%	5,59%	1,89E-04	278,765
0,050	0,100	0,05175	0,10222	3,50%	2,21%	3,96E-04	258,193
	0,150	0,05175	0,15220	3,50%	1,47%	6,69E-04	227,497
	0,070	0,07130	0,07191	1,86%	2,73%	2,49E-04	289,107
0,070	0,140	0,07130	0,14208	1,86%	1,48%	5,73E-04	247,882
	0,210	0,07138	0,21211	1,96%	1,01%	9,24E-04	229,449
	0,105	0,10703	0,10741	1,93%	2,29%	3,40E-04	315,980
0,105	0,210	0,10735	0,21190	2,24%	0,90%	8,04E-04	263,451
	0,315	0,10710	0,31728	2,00%	0,73%	1,23E-03	258,512
	0,140	0,14260	0,14216	1,86%	1,54%	4,31E-04	329,748
0,140	0,280	0,14233	0,28245	1,66%	0,87%	9,67E-04	292,002
	0,420	0,14240	0,42253	1,71%	0,60%	1,56E-03	270,595

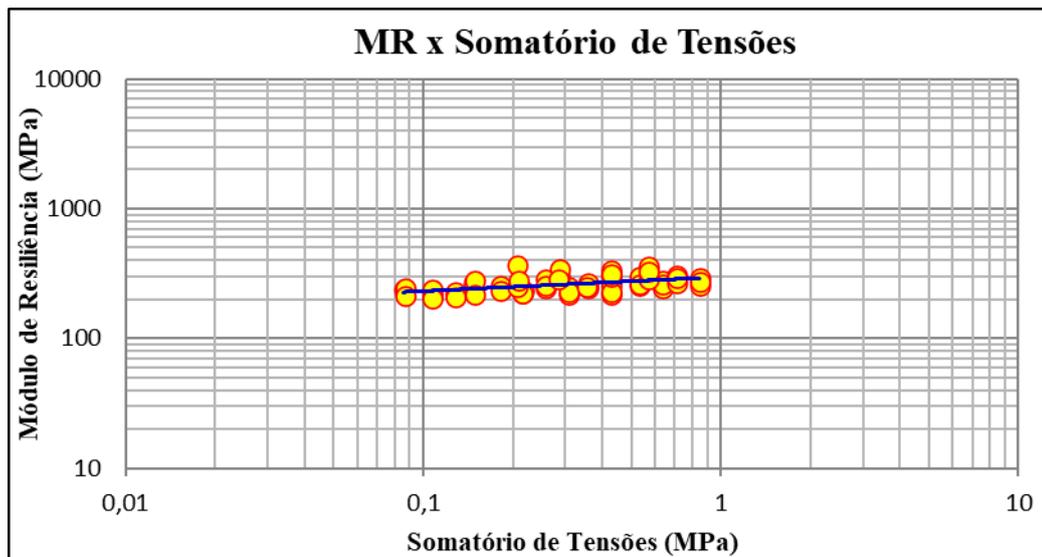
Para os modelos matemáticos foram utilizados os valores de módulos de resiliência obtidos da aplicação da sequência de tensões dos corpos-de-prova ensaiados, ou seja, estes foram agrupados. A representação gráfica dos modelos é apresentada na Figura 32.



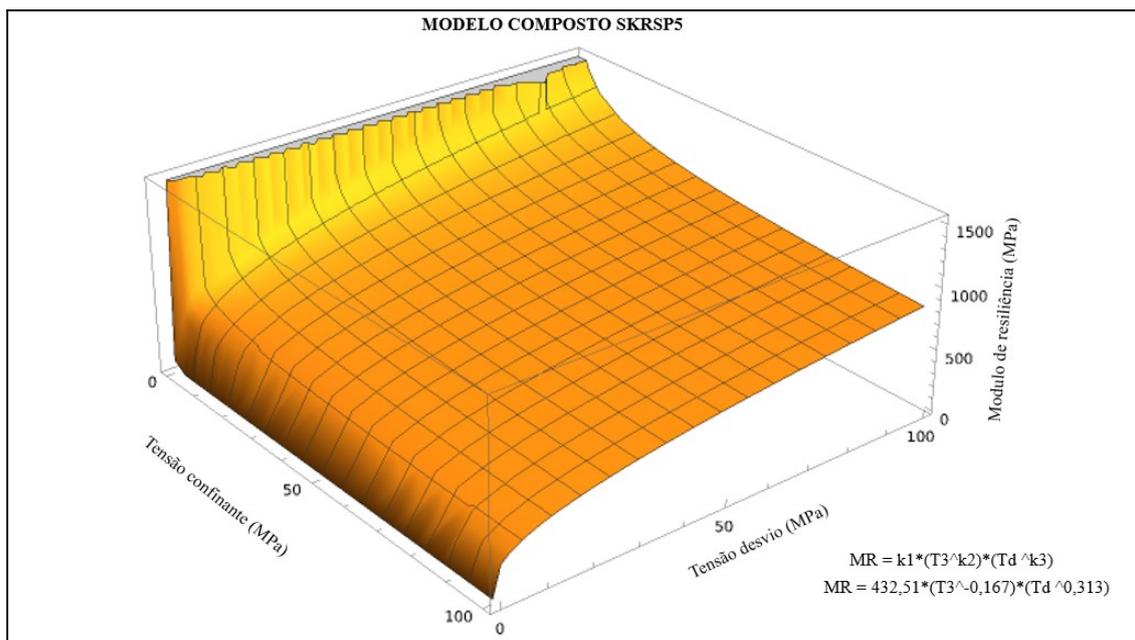
(a) Modelo tensão confinante



(b) Modelo tensão desvio



(c) Modelo soma das tensões



(d) Modelo composto

Figura 32. Modelos do Módulo de resiliência da mistura SKRSP5.

Tabela 20– Resultados dos coeficientes do Módulo de resiliência da mistura SKRSP5

<i>Modelo</i>	k_1	k_2	k_3	R^2
$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$	391,89	0,145	-	0,418
$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	286,66	0,044	-	0,056
$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2}$	297,33	0,109	-	0,251
$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	432,51	-0,167	0,313	0,685

Ao realizar uma análise dos dados apresentados anteriormente, é possível observar que o modelo de tensão desvio e o modelo de somatório de tensões não são adequados para explicar satisfatoriamente os resultados obtidos para a mistura SKRSP5, como evidenciado pela baixa magnitude dos valores de R^2 . No entanto, o modelo de tensão confinante demonstrou um coeficiente de determinação (R^2) de 41,8%, enquanto o modelo composto apresentou um R^2 de 68,5%, evidenciando uma melhor capacidade de representar o comportamento do módulo de resiliência em relação à variação das tensões, tanto as relacionadas ao confinamento quanto aquelas provenientes do desvio de tensão.

Para a análise dos modelos obtidos, a Tabela 21 apresenta os valores dos coeficientes dos modelos aplicados, assim como os valores do Módulo de Resiliência para um par de tensões de $\sigma_d = 0,1 \text{ MPa}$, e $\sigma_3 = 0,1 \text{ MPa}$, conforme Oliveira *et al.*, 2019.

Tabela 21– Valores dos Módulo de resiliência das misturas

<i>Mistura</i>	<i>Modelo</i>	k_1	k_2	k_3	R^2	<i>MR (MPa)</i>
SKRSP3	$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$	322,63	0,076	-	0,071	270,83
	$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	236,31	-0,044	-	0,035	261,51
	$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2}$	268,15	0,023	-	0,007	262,56
	$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	383,95	-0,29	0,367	0,576	321,57
SKRSP5	$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$	391,89	0,145	-	0,418	280,65
	$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	286,66	0,044	-	0,056	259,04
	$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2}$	297,33	0,109	-	0,251	269,07
	$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	432,51	-0,167	0,313	0,685	309,03

A análise dos resultados da Tabela 21 revela um aspecto importante: os valores do módulo de resiliência para os modelos (a), (b), (c) e (d) das duas misturas são próximos, independentemente do R-square obtido. Especificamente, para o modelo de soma de tensões principais, observa-se que a mistura SKRSP3 apresenta um valor de módulo de resiliência de 262,56 MPa, com um R-square de 0,7%, enquanto a mistura SKRSP5 registra um valor de módulo de resiliência de 269,07 MPa, com um R-square de 25,1%. Dessas observações, infere-se que o modelo composto exibe o melhor ajuste, com valores de R-square de 57,6% e 68,5%, além de apresentar módulos de resiliência de 321,57 MPa e 309,03 MPa, respectivamente, para as misturas SKRSP3 e SKRSP5.

Uma consideração relevante diz respeito à relação entre os valores dos módulos de resiliência das misturas obtidos para cada modelo. Ao analisar a relação (SKRSP3/SKRSP5) dos modelos, é observado que os valores variam entre 0,965 e 1,031. Mais especificamente, são encontrados os seguintes valores: 0,965 para o modelo de tensão confinante, 1,008 para o modelo de tensão desvio, 0,975 para o modelo de somatório de tensões e 1,031 para o modelo composto. Com base nessas informações, pode-se afirmar que o comportamento das misturas, considerando os teores de coproduto utilizados, é relativamente igual.

A partir dos modelos compostos obtidos para os MR, pode-se deduzir que ambas as misturas apresentam um desempenho similar. Das Figuras 31 (d) e 32 (d) nota-se que os módulos de resiliência diminuem quando o σ_3 aumenta e o σ_d permanece constante; um comportamento oposto é obtido quando o estresse de confinamento permanece constante e o estresse desviador aumenta. De acordo com Nguyen B. T & Mohajerani A (2016), isso pode ser devido à granulometria das misturas, uma vez que a influência do σ_3 na MR é irrelevante em solos finos, porque a resistência dos solos finos provém principalmente da coesão, e não da fricção ou do travamento das partículas, e neste caso, isso também ocorre devido às reações químicas da KRSP no solo.

4.3.5. Deformação permanente (DP)

No caso da deformação permanente, só foi possível realizar um par de tensões por cada mistura devido à alta demanda de ensaios no Laboratório de Geotecnia da PROPAV, ainda assim, foi possível determinar o modelo de Monismith para as misturas estudadas.

Para as misturas SKRSP3 e SKRSP5 foram realizados os ensaios com tempo de cura de 4 dias. A fim de analisar o comportamento das misturas, foram geradas as Figuras 33 e 34 e Tabela 23.

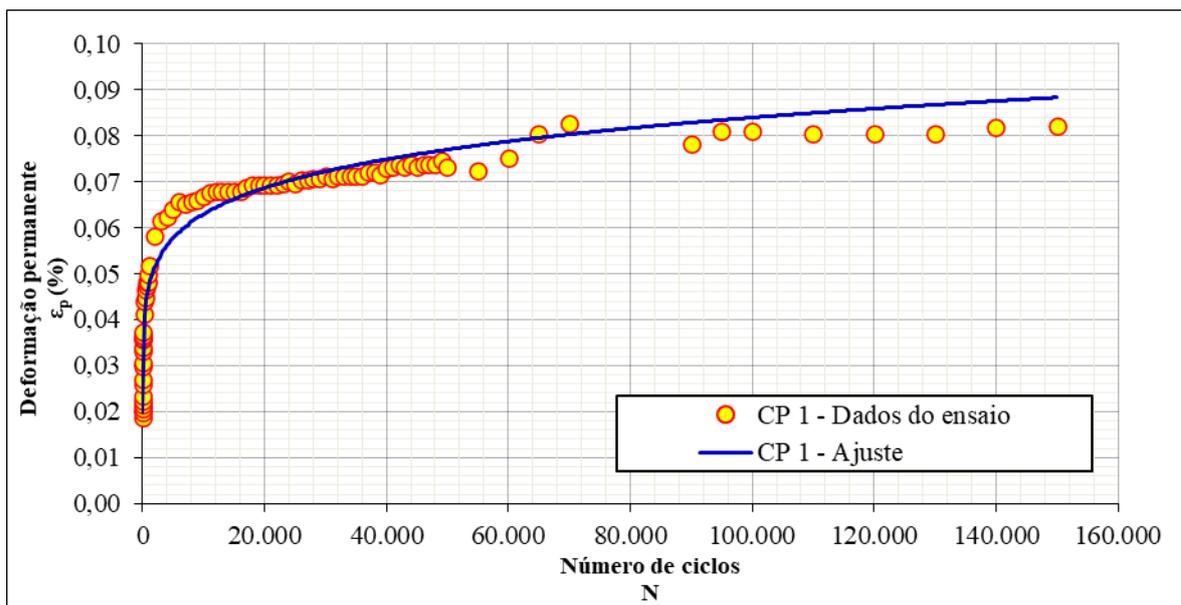


Figura 33 - Deformação permanente da mistura SKRSP3

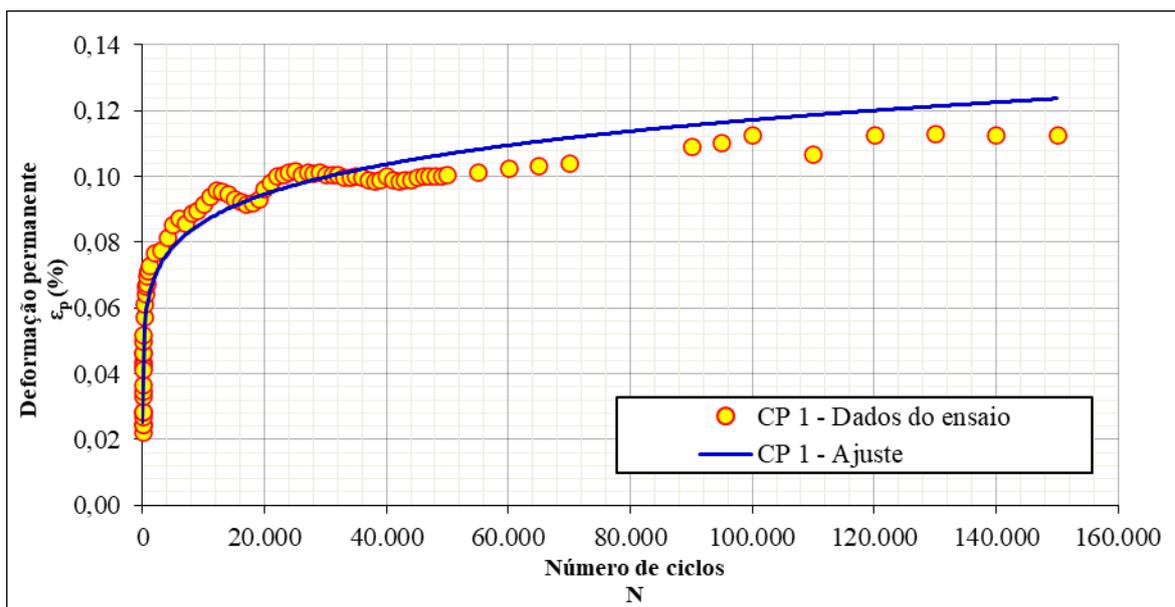


Figura 34 - Deformação permanente da mistura SKRSP5

Os modelos apresentados nas Figuras 33 e 34 podem ser expressos por meio do modelo matemático de Monismith $\epsilon_p = A \cdot N^B$. Neste contexto, A e B representam coeficientes específicos e N indica o número de ciclos aplicados durante a experimentação. Para facilitar a análise, a Tabela 21 resume os valores dos coeficientes obtidos e também apresenta a medida da aderência do modelo (R-quadrado) para cada caso estudado.

Tabela 22– Modelos Monismith das misturas estudadas

<i>Mistura</i>	<i>Modelo</i>	<i>k₁</i>	<i>k₂</i>	<i>R²</i>
SKRSP3	$\epsilon_p = A \cdot N^B$	0,0200	0,1246	0,9794
SKRSP5	$\epsilon_p = A \cdot N^B$	0,0254	0,1324	0,9660

Para um número de 150.000 ciclos, obtém-se valores de deformação permanente de 0,0883% e 0,123% para as misturas de SKRSP3 e SKRSP5 respectivamente. O aumento no valor da deformação pode ser atribuído ao aumento do teor de coproduto na amostra, embora precise-se de outros estudos para confirmar esta hipótese.

Os gráficos representados nas Figuras 33 e 34 permitem a visualização de que houve uma tendência à estabilização das deformações permanentes com o número de ciclos do

carregamento para os pares de tensões aplicadas. Segundo a Norma Técnica do DNIT 179/2018 – ME: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio, o comportamento visualizado nos gráficos ilustrados corresponde ao Tipo II – Acomodamento plástico (Figura 35).

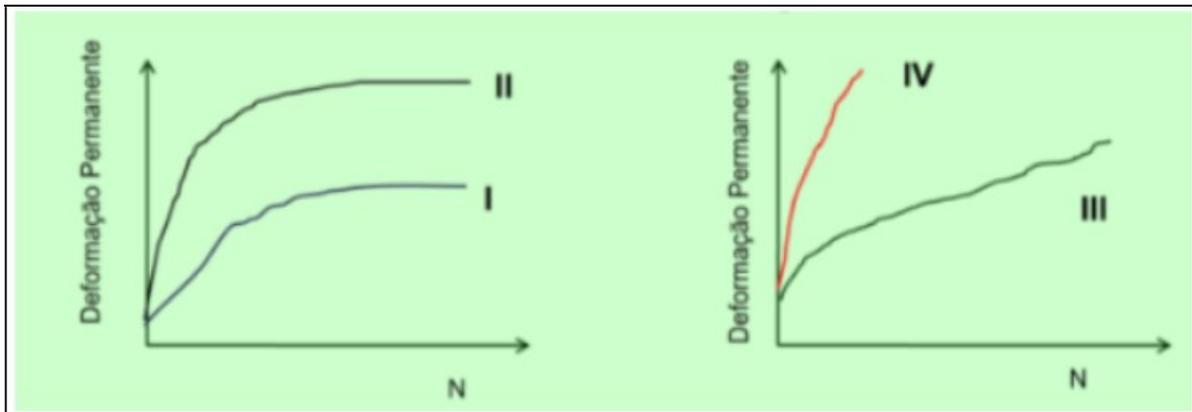


Figura 35 - Modelos de comportamento à deformação permanente de vários materiais ou de um mesmo material a vários níveis de solitação de cargas cíclicas, (DNIT, 2018)

Ainda a norma DNIT 179/2018, apresenta os modelos de comportamento à deformação permanente de solos – análise do acomodamento (shakedown). O eixo X representa a deformação permanente acumulada, e o eixo Y, a taxa de acréscimo de tal deformação. Neste tipo de gráfico, considera-se que houve acomodamento quando os resultados ficam paralelos ao eixo Y após certo número de ciclos (Figura 36).

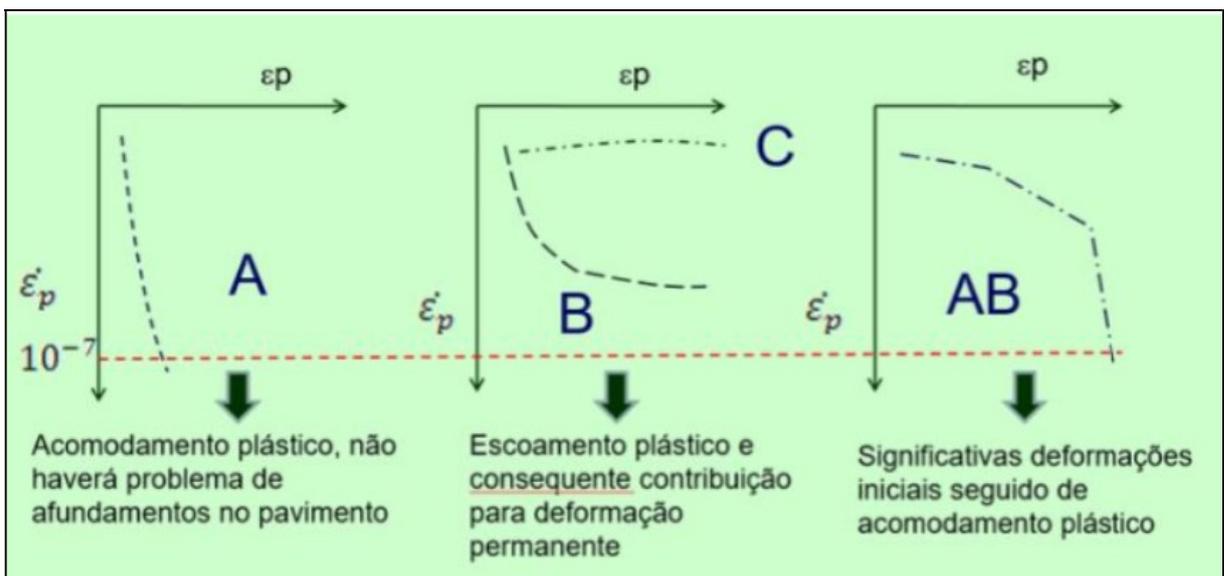


Figura 36 - Modelos de comportamento à deformação permanente de solos - análise do acomodamento ou

shakedown, (DNIT, 2018)

No caso das misturas SKRSP3 e SKRSP5 estas apresentaram um comportamento do Tipo A (Figura 37 e 38), ou seja, houve acomodamento plástico, o que indica que não haverá problema de afundamentos no pavimento. Comportamento ideal para o emprego das misturas nas camadas de pavimentação.

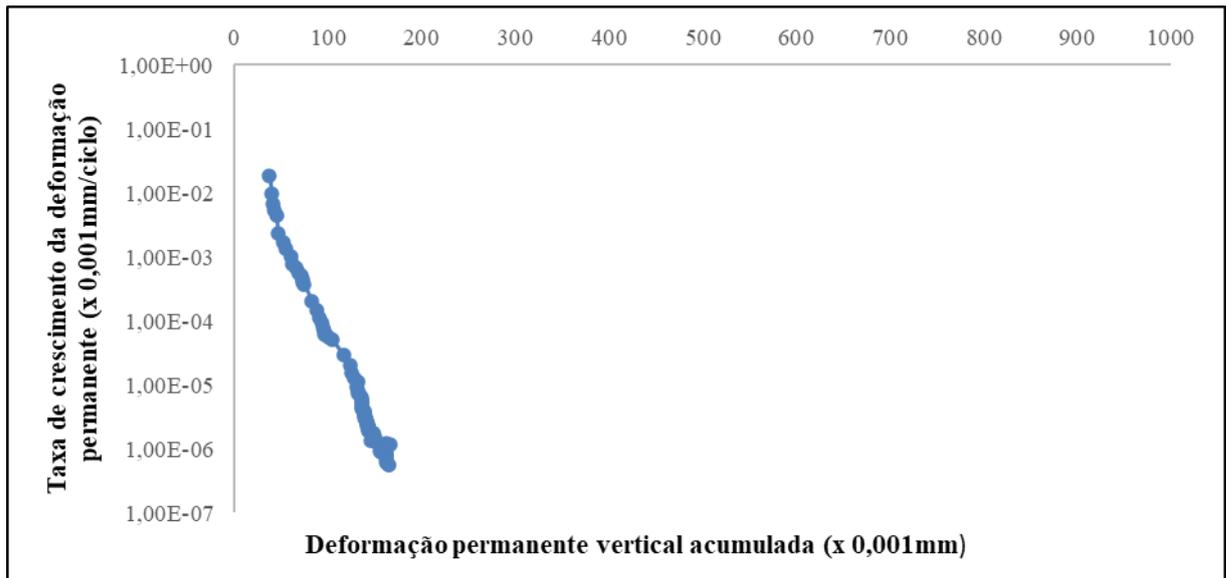


Figura 37 - Análise do comportamento do material de acordo com a deformação permanente - SKRSP3

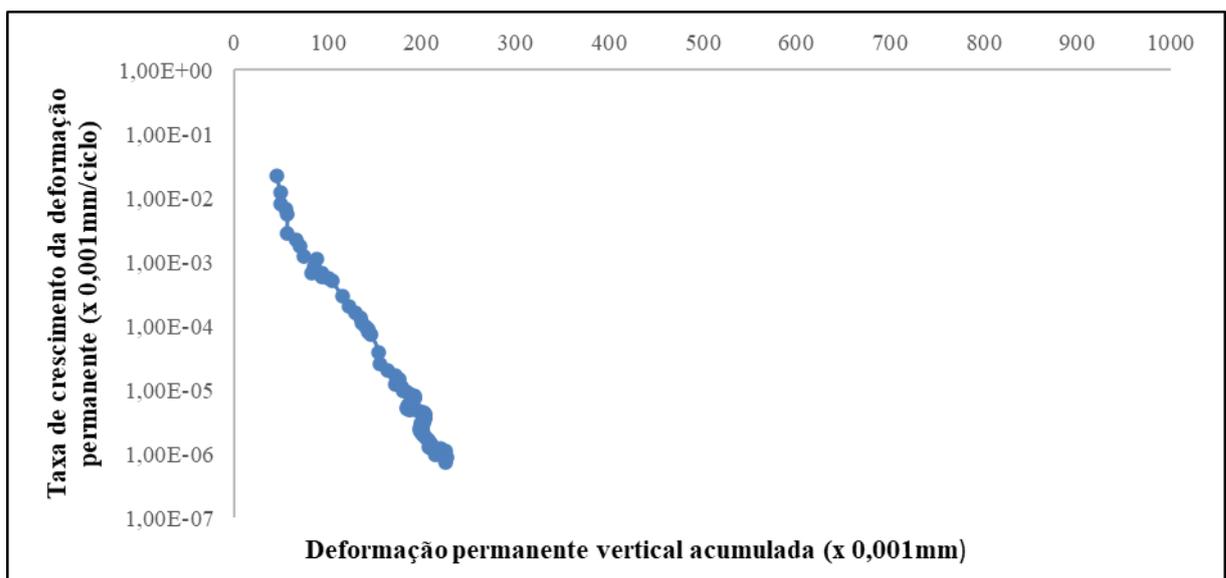


Figura 38 - Análise do comportamento do material de acordo com a deformação permanente - SKRSP5

CAPÍTULO 5

5.1. CONCLUSÕES

O pó de escória produto do processo de dessulfuração do reator Kambara foi examinado como um potencial agente estabilizante para a estabilização de um solo argiloso comumente empregado como subleito no Brasil. Duas misturas de solo-coproducto envolvendo diferentes proporções de pó de escória KR (3% e 5% em peso) foram estudadas como novas soluções de para melhoria do solo. O programa de laboratório realizado para investigar as propriedades geotécnicas das misturas estabilizadas incluiu massa específica real dos grãos, limites de Atterberg, distribuição de tamanho de partícula, compactação Proctor intermediária, expansão CBR, módulo de resiliência e deformação permanente. As seguintes conclusões foram tiradas:

- O estudo revelou que a densidade específica do pó de escória de dessulfuração KR era significativamente menor ($2,23 \text{ g/cm}^3$) quando comparada à escória KR granulada. Além disso, a análise de fluorescência de raios-X não detectou presença de ferro (Fe) e a porcentagem de óxido de cálcio (CaO) foi encontrada abaixo dos valores relatados na literatura ($< 40\%$). Essas descobertas têm implicações importantes para o uso potencial do pó de escória KR em diversas aplicações, fornecendo informações valiosas para futuras pesquisas nessa área.
- O estado puro do solo examinado demonstrou valores de CBR abaixo do requisito padrão para aplicação de base e sub-base de estradas no Brasil. No entanto, com a incorporação de KRSP, os valores de CBR aumentaram significativamente acima tanto do CBR natural do solo quanto do requisito padrão para sub-base de estradas. Apesar dessa melhoria, ambas as misturas não conseguiram atender aos critérios de UCS exigidos de 2,1 MPa para o uso de misturas de solo-cimento em camadas de pavimento. No entanto, elas alcançaram valores de 1,25 MPa e 0,95 MPa para SKRSP3 e SKRSP5, respectivamente, correspondendo a 59.5% e 45.2% dos requisitos de resistência à compressão não confinada.
- Verificou-se que as misturas solo-coproducto KR não eram plásticas, o que pode ser resultado da troca de cátions entre os íons da argila e o pó da escória do reator de

Kambara. A incorporação de 3% e 5% de pó de escória KR ao solo resultou em um aumento substancial de CBR (superior a 300%), o que significa que a resistência das misturas aumentou visivelmente mesmo com uma quantidade menor de pó de escória KR.

- Uma correlação linear positiva entre módulo de resiliência e CBR foi derivada ($MR = 7,55 \text{ CBR}$). CBR e RM para SKRSP3 foram ligeiramente superiores aos observados para SKRSP5, indicando que a adição de 3% de KRSP ao solo foi suficiente para estabilizar o solo.
- Em geral, o aproveitamento desse tipo de coproduto pode ser um agente alternativo de estabilização de solos para obras rodoviárias. Como as misturas estudadas são não plásticas e não expansivas, com valores de CBR superiores ao exigido pela norma brasileira para sub-base de primeira classe, os resultados apresentados são notáveis.
- As descobertas apoiam a reutilização do pó de escória KR como um material rodoviário sustentável e oferecem uma solução promissora de gerenciamento de resíduos para a indústria siderúrgica.

5.2. SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS

Tendo em vista o aproveitamento do pó de escória KR e o comportamento mecânico reportado no capítulo 4, sugere-se as etapas a seguir para complemento dos trabalhos desenvolvidos nesta dissertação.

- Execução de ensaios com teores de pó de escória KR até 10%, para observar as propriedades físicas e o comportamento mecânico das misturas resultantes.
- Execução de ensaios ambientais como lixiviação.
- Executar ensaios de deformação permanente completo para obter um modelo matemático e ser aplicado ao Modelo de dimensionamento Nacional de Pavimentos MeDiNa.
- Comparar o comportamento do pó de escória KR com o cimento Portland como agente estabilizador de solos.

REFERÊNCIAS

Abdullah, H. H.; Shahin, M. A.; Walske M. L.; Karrech A. 2020. **Systematic approach to assessing the applicability of fly-ash-based geopolymer for clay stabilization**. Canadian Geotechnical Journal, v. 57, n.9, p. 1356–1368.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnica. 2016. **NBR 6458: Grãos de solos que passam na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica**, Rio de Janeiro.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2017. **NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de liquidez**, Rio de Janeiro.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2016. **NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de plasticidade**, Rio de Janeiro.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2018. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**, Rio de Janeiro.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2020. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação**, Rio de Janeiro.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1982. **NBR 7207: Terminologia e classificação de pavimentação**, Rio de Janeiro.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2017. **NBR 9895: Solo – índice de suporte California (ISC) – Método de ensaio**, Rio de Janeiro.

Afrin, H. 2017. **A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques**. International Journal of Transportation Engineering and Technology, v. 3, n. 2, p. 19–24.

Amadi, A. A. 2014. **Enhancing durability of quarry fines modified black cotton soil subgrade with cement kiln dust stabilization**. Transportation Geotechnics, v. 1, n. 1, p. 55-61.

Andrade, Carlos Magno Sossai. 2018. **Avaliação de desempenho mecânico e microestrutural da brita graduada tratada com cimento com incorporação de coproduto de aciaria KR.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória.

Athulya, G. K.; Dutta, S.; Mandal, J. N. 2017. **Performance evaluation of stabilised soil–slag mixes as highway construction material.** International Journal of Geotechnical Engineering, v. 11, n.1, p.51–61.

Azeredo, Leidyane de Bortoli. 2018. **Verificação do potencial de uso de resíduos siderúrgicos provenientes de diferentes etapas do processo de refino do aço como agregados em misturas asfálticas do tipo SMA.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitoria.

Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. 2010. **Pavimentação asfáltica. Formação básica para engenheiros.** 3ª Reimpressão.

Brown, S. F. 1996. **Soil mechanics in pavement engineering.** Géotechnique, v. 46, n. 3, p. 383–426.

Cho, B.; Choi, H. 2016. **Physical and Chemical Properties of concrete using GGBFS-KR slag-gypsum binder.** Construction and Building Materials, v. 123, p. 436-443.

Cho, B.; Koo, K.; Choi, S. 2018. **Compressive Strength and Microstructure Properties of Alkali-Activated Systems with Blast Furnace Slag, Desulfurization Slag, and Gypsum.** Advances in Civil Engineering, v. 2018, n. 6123070.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. 2022. **Pesquisa CNT de rodovias 2022**, Brasil.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. 2020. **Anuário CNT do transporte, Estatísticas consolidadas**, Brasi.

Costa, H. N.; Noberto, C. C.; Almeida, L. A.; Nogueira, R. E. F. Q.; Cabral, A. E. B. 2021. **Alkaline activation of cement pastes with desulfurization slag**. *Cerâmica*, v. 67, n. 384, p. 399–405.

Corteletti Junior, Carlos Alberto. 2022. **Estudo comparativo entre dessulfuração via escória de topo e via reator Kambara**. Monografia (graduação) – Instituto Federal do Espírito Santo, Curso Superior de Engenharia Metalúrgica, Vitória.

Cristelo, N. M. C. 2001. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho.

Díaz-Piloneta, Marina *et al.* 2021. **Comprehensive análisis of Steel slag as aggregate for road construction: Experimental testing and environmental impact assessment**. *Materials*, v. 14, n. 13.

Dieguez, A. C. O.; Oliveira, S. L. N.; Araújo, G. S.; Galdino, A. G. S. 2019. **Comparison of Kambara reactor slag with blast furnace slag for Portland cement industry applications**. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 8, n. 3, p. 2786–2795.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. 2018. **DNIT 134/2018 – Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. 2018. **DNIT 179/2018 – Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio**. Rio de Janeiro.

DNIT. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. 2006. **Manual de pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro.

Du H.; Li J.; Ni, W. *et al.* 2022. **Optimization of the whole-waste binder containing molten iron desulfurization slag from Kambara Reactor for concrete production**. *Journal of Building Engineering*, v. 54, n. 104594.

Etim, R. K.; Eberemu, A. O.; Osinubi, K. J. 2017. **Stabilization of black cotton soil with lime and iron ore tailings admixture**. *Transportation Geotechnics*, v. 10, p. 85-95.

Ferraro, Bruno Bertelli. 2014. **Estudos das Propriedades Termofísicas de Escória Metalúrgica e de Escória Sintéticas de CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo.

Furieri, Elaine Cristina. 2019. **Avaliação em Laboratório e em Campo por meio de Simulador Linear de Tráfego Móvel de Solos Estabilizados com Coproduto KR, Cimento Portland Blindasolo®**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória.

Gautam, Pradeep Kumar *et al.* 2018. **Sustainable use of waste in flexible pavement: A review**. Elsevier Ltd.

Gokalp, I.; Uz, V. E.; Saltan, M.; Tutumluer, E. 2018. **Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications**. *Transportation Geotechnics*, v. 14, p. 61–69.

Gomes, Guilherme J. C. *et al.* 2021. **A Sustainability-oriented framework for the application of industrial byproducts to the base layers of low-volume roads**. *Journal of Cleaner Production*, v. 295.

Gonçalves, Raphael de Martin. 2016. **Incorporação de coproduto de aciaria KR e polímero PDC em solos para base de pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória.

Gottardi, Eduardo Valadares. 2015. **Aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e de escória moída de aciaria como filler em pavimentos de concreto asfáltico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória.

Gupta, D.; Kumar, A. 2017. **Performance evaluation of cement-stabilized pond ash-rice husk ash-clay mixture as a highway construction material**. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v. 9, n. 1, p. 159–169.

Gurbuz, A. 2015. **Marble powder to stabilise clayey soils in sub-bases for road construction**. Road Materials and Pavement Design, v. 16, n. 2, p. 481–492.

Harmaji, A.; Hardiansyah, A., Widianingsih, X., Jannah, R., Soepriyanto, S. 2012. **The effect of Basic Oxygen Furnace, Blast Furnace, and Kanbara Reactor Slag as Reinforcement to Cement Based Mortar**. JPSE (Journal of Physical Science and Engineering), v. 7, n. 1, p. 1–8.

Hernandez, N.; Lizarazo-Marriaga, J.; Rivas, M A. 2018. **Petrographic characterization of Portlandite crystal sizes in cement pastes affected by different hydration environments**. JPSE (Construction and Building Materials), v. 182, p. 541–549.

Huang, D. S., & Huang, F. C. 2014. **Coupled thermo-fluid stress analysis of Kambara Reactor with various anchors in the stirring of molten iron at extremely high temperatures**. Applied Thermal Engineering, v. 73, n. 1, p. 222–228.

IABr, Instituto Aço Brasil. 2021. **Aço & sustentabilidade 2021**. Rio de Janeiro.

IABr, Instituto Aço Brasil. 2022. **Anuário estatístico 2022**. Rio de Janeiro.

IABr, Instituto Aço Brasil. 2020. **Relatório de sustentabilidade 2020**. Rio de Janeiro.

Kirmse, Odair José. 2006. **Estudo do Comportamento Metalúrgico do Reator Kambara através da Modelagem Física**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Kou, W-T.; Hou, T-C. 2014. **Engineering properties of alkali-activated binders by use of desulfurization slag and GGBFS**. Construction and Building Materials, v. 66, p. 229–234.

Kuo, W-T.; Wang, H-Y.; Shu, C-Y. 2014. **Engineering properties of cementless concrete**

produced from GGBFS and recycled desulfurization slag. Construction and Building Materials, v. 63, p. 189–196.

Lopes, L. S. E. 2011. **Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de base de pavimentos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Magalhães, A. J.; Gomes, G. J. C.; Pires, P. J. M. 2020. **Toward improved performance of unpaved roads: Laboratory tests and field investigation of a soil-byproduct base layer.** Road Materials and Pavement Design, v. 23, n. 1, p. 184-198.

Manso, J. M.; Ortega-López, V.; Polanco, J. A.; Pires, J. 2013. **The use of ladle furnace slag in soil stabilization.** Construction and Building Materials, v. 40, p. 126–134.

Medina, Jaques de. 2015. **Mecânica dos pavimentos.** 3 ed. Interciência.

Mir, B. A.; Sridharan, A. 2013. **Physical and Compaction Behaviour of Clay Soil–Fly Ash Mixtures.** Geotechnical and Geological, Engineering, v. 31, p. 1059-1072.

Mohammadinia, A.; Arulrajah, A.; Haghghi, H.; Horpibulsuk, S. 2017. **Effect of lime stabilization on the mechanical and micro-scale properties of recycled demolition materials.** Sustainable Cities and Society, v. 30, n. 2, p. 58–65.

Nepomuceno, Daiana Valt. 2019. **Avaliação em campo de estrutura de pavimento incorporando solo estabilizado com coproduto de aciaria KR sujeita a carregamento com simulador HVS em comparação com previsões de desempenho segundo o novo método brasileiro de dimensionamento MeDiNa.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória.

Nguyen, B. T.; Mohajerani, A. 2016. **Resilient modulus of fine-grained soil and a simple testing and calculation method for determining an average resilient modulus value for pavement design.** Transportation Geotechnics, v. 7, p. 59–70.

OECD, Organisation for economic co-operation and development. 2022. **Regulatory Governance in the Mining Sector in Brazil**, OECD Publishing, Paris.

Oliveira Bridi, Lucas. 2020. **Estudo do efeito da estabilização com coproduto de dessulfuração KR sob as propriedades físicas, mecânicas e químicas de solos com diferentes teores de finos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória.

Oliveira, C. F.; Pires, P. J. M.; Teixeira, J. E. S. L. 2019. **Physical, mechanical and microstructure investigation of tropical clayey soil with desulfurisation slag for pavement application**. Road Materials and Pavement Design, v. 22, n. 6, p. 1442-1453.

Onyejekwe, S.; Ghataora, G. S. 2015. **Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: sulphonated oil and a polymer**. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 74, n. 2, p. 651-665.

Pedreira, C. L. S.; Goularte, C. L. 2009. **Estabilização Química de Solo com Adição de Cimento ou Cal como Alternativa de Pavimento**. In: V Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, 2009, Pelotas/Rs. Anais de Congresso. Pelotas/RS. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos.

Pinto, Carlos de Sousa. 2006. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3 Ed. Oficina de Textos.

Pires, Patricio Moreira *et al.* 2019. **Laboratory and Field Evaluation of KR slag-Stabilized Soil for Paving Applications**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 31, n.9, p. 04019182.

Purnomo, Chandra Wahyu *et al.* 2018. **Improvement of cement plant dust emission by bag filter system**. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, v. 316, p. 012031.

Ramos, Luisa Braz da Silva. 2018. **Estudo do ganho de resistência e da estabilização química pela adição do coproduto KR no melhoramento de solos argilosos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória.

Resende, Paulo Tarso Vilela De. 2018. **Custos logísticos no Brasil 2017**, Fundação Dom Cabral, Brasil.

Rodrigues, Klaus Henrique de Paulo. 2018. **Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Saberian, M.; Li, J.; Boroujeni, M.; Law, D.; Li C-Q. 2020. **Application of demolition wastes mixed with crushed glass and crumb rubber in pavement base/subbase**. Resources, Conservation and Recycling, v. 156, p. 104722.

Santo, E.V. D. E.; Soares, S. G.; Oliveira, H. C. C. *et al.* 2022. **Replacement of lime with industrial wastes in hot metal desulfurization mixtures**. Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy, v. 58, p. 243–252.

Schrama, F. N. H.; Beunder, E. M.; den Berg, B. V.; Yang, Y.; Boom, R. 2017. **Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking**. Ironmaking & Steelmaking, v. 44, n. 5, p. 333–343.

Schumacher, A. G.; Gomes, G. J. C.; Schneider, D. S. G.; Pires, P. J. M.; Gomes, R. G. 2022. **Blending Linz-Donawitz, and Blast Furnace slags with the Kambara reactor byproduct to improve their reuse in roadworks**. Journal of Material Cycles and Waste Management, v. 24, p. 2555-2568.

Schumacher, Aécio Guilherme. 2018. **Avaliação dos efeitos da expansão de agregados siderúrgicos nas características do material e no desempenho de misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória.

Sharma, R. K. 2020. **Utilization of Fly Ash and Waste Ceramic in Improving Characteristics of Clayey Soil: A Laboratory Study**. Geotechnical and Geological Engineering, p.1–14.

Senço, Wlastermiller de. 2001. **Manual de técnicas de pavimentação: volume II**, 2. Ed. Ampl., Pini.

Senço, Wlastermiller de. 2008. **Manual de técnicas de projetos rodoviários**, 1. Ed. Ampl., Pini.

Shen, G.; Huang, P.; Wang, S.; Chen, G. 2014. **Potential Reuse of Slag from the Kambara Reactor Desulfurization Process of Iron in an Acidic Mine Drainage Treatment**. Journal of Environmental Engineering, v. 7, n. 04014023.

Shulka, R. P., Parihar, N. S. 2016. **Stabilization of Black Cotton Soil Using Micro-fine Slag**. Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, v. 97, p. 299-306.

Silva, R. M. C.; Filho, V. F. M.; Appoloni, C. R. 2004. **Fluorescencia de raios-x por dispersão de energia**. Departamento de Física, Universidade Estadual de Londrina, Vol. 08, nº 1, 1ª ed., Londrina.

Soliz, Valeria Vaca Pereira. 2007. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. Rio de Janeiro: 2007. Rio de Janeiro.

Sukprasert, S.; Hoy, M.; Horpibulsuk, S. *et al.* 2019. **Fly ash based geopolymer stabilisation of silty clay/blast furnace slag for subgrade applications**. Road Materials and Pavement Design, p. 1–15.

Tanzer, Ricarda; Buchwald, Anja; Stephan, Dietmar. 2015. **Effect of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag**. Materials and Structures. v. 48, p. 629-641.

Teixeira, Jamilla Emi Sudo Lutif *et al.* 2019. **Expansion Level of Steel Slag Aggregate Effects on Both Material Properties and Asphalt Mixture Performance**. Transportation Research Record, v. 2673, n. 3, p. 506-515.

Tian, E.; Liu, Y.; Cheng, X.; Zeng, W. 2022. **Characteristics of Pavement Cement Concrete Incorporating Steel Slag Powder**. Advances in Materials Science and Engineering.

Tong, Z.; Ma, G.; Cai, X. *et al.* 2016. **Characterization and Valorization of Kanbara Reactor Desulfurization Waste Slag of Hot Metal Pretreatment.** Waste and Biomass Valorization, v. 7, p.1–8.

Wang, L. 2002. **Cementitious stabilization of soils in the presence of sulfates.** Department of Civil Environmental Engineering, & Wuhan University of Technology, Louisiana/USA.

Zhang Y, Schlangen E, Çopuroglu O. 2022. **Effect of slags of different origins and the role of sulfur in slag on the hydration characteristics of cement-slag systems.** Construction and Building Materials, v. 316, p. 125266.

DECLARAÇÃO

Eu, Luis Eduardo Causado Mendoza, declaro que esta dissertação intitulada é inteiramente e exclusivamente de minha autoria e que, com exceção das citações diretas e indiretas claramente indicadas e referenciadas neste trabalho, e do uso autorizado de banco de dados, todos os dados foram obtidos por mim e não contém plágio. Além disso, essa dissertação foi submetida ao programa autoplágio (CopySpider), tendo sido encontrado um percentual menor do que 3%.

Luis Eduardo Causado Mendoza

