

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**HENRIQUE DELBONI FARDIN**

**AVALIAÇÃO DO COPRODUTO SIDERÚRGICO KR COMO ESTABILIZADOR  
PARA DIFERENTES TIPOS DE SOLO**

VITÓRIA

2024

**HENRIQUE DELBONI FARDIN**

**AVALIAÇÃO DO COPRODUTO SIDERÚRGICO KR COMO ESTABILIZADOR  
PARA DIFERENTES TIPOS DE SOLO**

Dissertação de Mestrado apresentado ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Geotecnia.

Orientador:

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires

Co-orientador: Prof. Dr. Guilherme J.C. Gomes

VITÓRIA

2024

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas -  
SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

F219a Fardin, Henrique Delboni, 1983-  
Avaliação do coproduto siderúrgico KR como estabilizador  
para diferentes tipos de solo / Henrique Delboni Fardin. - 2024.  
103 p. : il.

Orientador: Patrício José Moreira Pires.  
Coorientador: Guilherme J.C. Gomes.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -  
Universidade  
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Escória. 2. Pavimentos. I. Pires, Patrício José Moreira.  
II. Gomes, Guilherme J.C.. III. Universidade Federal do Espírito  
Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

---

**HENRIQUE DELBONI FARDIN**

**AVALIAÇÃO DO COPRODUTO SIDERÚRGICO KR COMO ESTABILIZADOR  
PARA DIFERENTES TIPOS DE SOLO**

Dissertação de Mestrado apresentado ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Geotecnia.

---

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires

Orientador

---

Prof. Dr. Guilherme J.C. Gomes

Co-orientador

---

Prof. Dr. Wagner Nahas Ribeiro

Avaliador Externo

---

Prof. Dra. Carla Therezinha Dalvi Borjaille Alledi

Avaliador Externo



## DOCUMENTOS DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO ALUNO HENRIQUE DELBONI FARFEL

Data e Hora de Criação: 01/04/2024 às 14:12:00

### Documentos que originaram esse envelope:

- ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO.doc (Documento Microsoft Word) - 1 página(s)
- FOLHA DE ROSTO.doc (Documento Microsoft Word) - 1 página(s)



### Hashs únicas referente à esse envelope de documentos

[SHA256]: 806459e4a427a66dfa9327117fc95edaf6205611747a550d3365f2af9fe7b3c5

[SHA512]: ed19a0180e6f1ee1be3aaf7583ef92cd15bb3de726d9ce2e1ce6259cb0f48ceb218004fd972bc28b9051167fa671d94701ce29e92e07ff95d7363622fec82735

### Lista de assinaturas solicitadas e associadas à esse envelope



#### ASSINADO - Carla Therezinha Dalvi Borjaille Alledi (carla.borjaille@gmail.com;borjaille@ifes.edu.br;)

Data/Hora: 03/04/2024 - 20:58:36, IP: 177.157.146.172

[SHA256]: 8db3ce415da100a4f54215a6fc1770b4b9e5c45e542c6fe793da4d00fbcfaf0



#### ASSINADO - Guilherme José Cunha Gomes (cunha\_guilherme@hotmail.com)

Data/Hora: 01/04/2024 - 14:49:16, IP: 200.239.166.226

[SHA256]: 9274d2b64340796b8a718859f4f6ae05f31d68bfc8f8c37e04cc083aaca73f3



#### ASSINADO - Patrício José Moreira Pires (patricio.pires@gmail.com;patricio.pires@ufes.br;)

Data/Hora: 01/04/2024 - 14:42:37, IP: 200.137.65.102, Geolocalização: [-20.273187, -40.305951]

[SHA256]: d080dfd2462f8d0f576e0520ee377d7b4c8351220305ba7c2be57b91cdf908e7



#### ASSINADO - Wagner Nahas Ribeiro (wagnernr2010@gmail.com)

Data/Hora: 01/04/2024 - 15:24:14, IP: 187.126.97.209, Geolocalização: [-22.865510, -43.778048]

[SHA256]: 4559a8fb2a72285a3e014f105dd876706b9e6e4239da83250bb6619b33deeb80

### Histórico de eventos registrados neste envelope

- 03/04/2024 20:58:36 - Envelope finalizado por carla.borjaille@gmail.com;borjaille@ifes.edu.br;, IP 177.157.146.172
- 03/04/2024 20:58:36 - Assinatura realizada por carla.borjaille@gmail.com;borjaille@ifes.edu.br;, IP 177.157.146.172
- 01/04/2024 15:24:14 - Assinatura realizada por wagnernr2010@gmail.com, IP 187.126.97.209
- 01/04/2024 15:24:00 - Envelope visualizado por wagnernr2010@gmail.com, IP 187.126.97.209
- 01/04/2024 14:49:16 - Assinatura realizada por cunha\_guilherme@hotmail.com, IP 200.239.166.226
- 01/04/2024 14:49:14 - Envelope visualizado por cunha\_guilherme@hotmail.com, IP 200.239.166.226
- 01/04/2024 14:42:37 - Assinatura realizada por patricio.pires@gmail.com;patricio.pires@ufes.br;, IP 200.137.65.102
- 01/04/2024 14:42:31 - Envelope visualizado por patricio.pires@gmail.com;patricio.pires@ufes.br;, IP 200.137.65.102
- 01/04/2024 14:13:13 - Envelope registrado na Blockchain por sidney.barbara@ufes.br, IP 200.137.65.106
- 01/04/2024 14:13:12 - Envelope encaminhado para assinaturas por sidney.barbara@ufes.br, IP 200.137.65.106
- 01/04/2024 14:12:08 - Envelope criado por sidney.barbara@ufes.br, IP 200.137.65.106

## DEDICATÓRIA

Ao meu pai, João Henrique Fardin (*in memoriam*), e ao meu filho Pedro.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus.

A minha esposa Sara, por todo incentivo e apoio.

A minha mãe por todo amor, e ao meu irmão e irmã (*in memoriam*) por contribuírem tanto na minha formação pessoal e profissional.

Ao professor Patrício pela dedicação, ensinamentos e companheirismo durante todo esse processo.

Ao professor Guilherme pela atenção e contribuições enriquecedoras.

Ao DER-ES, e as empresas PROPAV e HF.

A equipe do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação e a UFES.

## RESUMO

O modal rodoviário brasileiro é responsável por 65% do transporte de cargas e enfrenta desafios, com apenas 12,4% de sua malha rodoviária pavimentada. A pesquisa destaca a escassez de materiais para pavimentação, impulsionando o estudo do coproduto siderúrgico KR (CP-KR) como estabilizador de solos. Como este resíduo demonstra viabilidade técnica e ambiental para uso em pavimentos, o objetivo do trabalho foi avaliar a utilização do desempenho do coproduto siderúrgico tipo KR como estabilizador de solos para pavimentação. Foram realizados ensaios laboratoriais para avaliação de parâmetros físicos, mecânicos e mecanísticos de solos com diferentes percentuais de finos e relacionados com resultados obtidos pelos demais autores. O estudo sobre CP-KR para pavimentação revelou seu potencial ao modificar índices físicos dos solos e aumentar de resistência mecânica. Maiores incrementos de resistência ocorrem em solos com 55% de finos, enquanto o Módulo de Resiliência aumentou mais em solos menos argilosos, atingindo incremento de resistência de 275%. Os solos apresentaram uma redução significativa na deformação plástica, com diminuição média de 72%. Os resultados demonstraram o potencial do CP-KR como estabilizador de solos para composição de pavimentos rodoviários.

Palavras-chave: escória de aço KR; pavimentação; estabilização química; estabilização do solo.

## **ABSTRACT**

Brazilian road transport sector is responsible for 65% of freight transportation and faces challenges, with only 12.4% of its road network paved. The research highlights the shortage of materials for paving, driving the study of the steel co-product KR (CP-KR) as a soil stabilizer. As this residue demonstrates technical and environmental feasibility for use in pavements, the aim of the work was to evaluate the performance of the steel co-product type KR as a soil stabilizer for paving. Laboratory tests were conducted to evaluate the physical, mechanical, and mechanistic parameters of soils with different percentages of fines and related to results obtained by other authors. The study on CP-KR for paving revealed its potential in modifying the physical indices of soils and increasing mechanical strength. The greatest increases in strength occur in soils with 55% fines, while the Resilient Modulus increased more in less clayey soils, reaching a strength increase of 275%. The soils showed a significant reduction in plastic deformation, with an average decrease of 72%. The results demonstrated the potential of CP-KR as a soil stabilizer for the composition of road pavements.

**Keywords:** KR steel slag; paving; chemical stabilization; soil stabilization.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Granulometria para base granula.....	22
Tabela 2 – Resultados físicos e mecânicos de misturas de solos estabilizados com Pó de Mármore e Cal.....	30
Tabela 3 – Comparação entre as especificações de bases estabilizadas granulometricamente com materiais naturais e com coprodutos siderúrgicos. ....	33
Tabela 4 – Caracterização física dos solos S1 e S2. ....	37
Tabela 5 – Caracterização Mecânica dos solos em estado natural e modificado. ....	43
Tabela 6 – Avaliação do incremento de resistência obtido por Bridi (2020).....	45
Tabela 7 – Materiais Selecionados .....	47
Tabela 8 – Ensaio de caracterização física .....	48
Tabela 9 – Ensaio de caracterização mecânica .....	48
Tabela 10 – Ensaio de caracterização mecânica .....	48
Tabela 11 – Distribuição granulométrica dos solos e amostras. ....	55
Tabela 12 – Distribuição granulométrica dos solos melhorados com CP-KR. ....	57
Tabela 13 – Granulometria do CP-KR.....	57
Tabela 14 – Granulometria da fração passante dos materiais analisados. ....	58
Tabela 15 - Massa Específica Real do Grãos .....	59
Tabela 16 – Resultados dos ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade .....	60
Tabela 17 – Variação do IP dos solos estabilizados com CP-KR .....	61
Tabela 18 – Classificação SUCS. ....	63
Tabela 19 – Classificação AASHTO.....	64

Tabela 20 – Ensaio de compactação. ....	66
Tabela 21 – Expectativa de resistência mecânica e resultados obtidos (ISC). ....	69
Tabela 22 – Resultados dos ensaios de I.S.C.....	70
Tabela 23 - Resultados obtidos para o ensaio de expansão.....	76
Tabela 24 – Sequência de tensões para fase de condicionamento .....	77
Tabela 25 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência.....	77
Tabela 26 – Resultados do Módulo de Resiliência para o Solo S1 - Cascalho Arenoso. .....	78
Tabela 27 – Resultados do Módulo de Resiliência para o Solo S1 - Cascalho Arenoso modificado com KR .....	79
Tabela 28 – Resultados do Módulo de Resiliência e Deslocamento Permanente. ...	83
Tabela 29 – Resultados do Módulo de Resiliência para o Solo S2.....	83
Tabela 30 – Resultados do Módulo de Resiliência para o Solo S2 modificado com KR. .....	84
Tabela 31 – Resultados do Módulo de Resiliência e Deslocamento Permanente ....	87
Tabela 32 – Resultados do Módulo de Resiliência para o Solo S3 .....	88
Tabela 33 – Resultados do Módulo de Resiliência para o Solo S3 modificado com KR .....	89
Tabela 34 – Resultados do Módulo de Resiliência e Deslocamento Permanente ....	92

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação das Bases e Sub-bases e tipo de estabilização .....	19
Figura 2 – Resultado de CBR do Rejeito (R), Solo (A), Mistura 90% solo e 10 Rejeito, Mistura 80% solo e 20 Rejeito e Mistura 70% Solo e 30% rejeito .....	21
Figura 3 – Distribuição de carga no subleito para bases não estabilizadas e bases estabilizadas com cimento. ....	25
Figura 4 – Exemplo da cimentação em solos grossos (arenosos). ....	26
Figura 5 – Estrutura de solos finos (argilosos/siltosos) tratados com cimento. ....	27
Figura 6 – Variação do pH em relação ao teor de cal. ....	29
Figura 7 - Resultados de Resistencia a compressão simples para misturas de solos estabilizados com Pó de Mármore e Cal .....	31
Figura 8 – Granulometria das misturas solo-coproducto estudadas. ....	34
Figura 9 – Valores de CBR e Índice de Plasticidade das misturas solo-coproducto ...	34
Figura 10 – Resultados dos ensaios de ISC para os solos estabilizados com coproducto KR. ....	37
Figura 11 – Composição e misturas utilizadas. ....	38
Figura 12 – Limites de consistencia. ....	39
Figura 13 – ISC das amostras na umidade ótima após 4 dias de imersão e após 28 dias de cura e 4. ....	39
Figura 14 – Resultados obtidos por Oliveira (2018). ....	41
Figura 15 – Curva granulométrica para os solos AE e JP06. ....	43
Figura 16 – Comportamento do incremento de resistência em função da granulometria do solo. ....	46
Figura 17 – Solos e coproducto KR selecionados para programa experimental. ....	49

Figura 18 – Ensaio de limite de liquidez e limite de plasticidade.....	51
Figura 19 - Ensaio de Compactação (A) e ISC (B).....	52
Figura 20 - Ensaio de Módulo de Resiliência sendo realizado.....	53
Figura 21 - Quadro resumo de programa experimental .....	54

## LISTA DE SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

BGS – Brita graduada simples

BGTC – Brita graduada tratada com cimento

CBR – California Bearing Ratio

CP-KR – *Coproduto Siderúrgico Tipo KR*

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

ISC – Índice de Suporte de Califórnia

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS DA PESQUISA</b>	<b>17</b>
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
3.1	ESTABILIZAÇÃO SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO	18
3.1.1	<b>Estabilização Mecânica/Compactação</b>	<b>20</b>
3.1.2	<b>Estabilização Química</b>	<b>23</b>
3.1.2.1	<b>Estabilização com Cimento</b>	<b>24</b>
3.1.2.2	<b>Estabilização com Cal</b>	<b>27</b>
3.2	Estabilização de solos com coprodutos siderúrgicos	31
3.2.1	<b>Estabilização com Coproduto KR (CP-KR)</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>40</b>
4.1	Materiais	40
4.1.1	<b>Solo</b>	<b>40</b>
4.1.2	<b>Teor de coproduto</b>	<b>40</b>
4.1.3	<b>Influência do teor de Finos</b>	<b>42</b>
4.2	MÉTODOS	46
4.2.1	<b>Delineamento Experimental</b>	<b>46</b>
4.2.2	<b>Caracterização Físicas dos Materiais</b>	<b>49</b>
4.2.3	<b>Caracterização Mecânica dos Materiais</b>	<b>51</b>

4.2.4	<b>Caracterização Mecânica dos Materiais</b>	<b>52</b>
4.2.5	<b>Análise Conjunta de dados</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>55</b>
5.1	<b>CARACTERIZAÇÃO FÍSICA</b>	<b>55</b>
5.1.1	<b>Granulometria por peneiramento e sedimentação</b>	<b>55</b>
5.1.2	<b>Massa Específica Real dos Grãos</b>	<b>59</b>
5.1.3	<b>Limites de Consistência</b>	<b>60</b>
5.1.4	<b>Classificações</b>	<b>63</b>
5.1.4.1	Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)	63
5.1.4.2	American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).	64
5.2	<b>CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA</b>	<b>66</b>
5.2.1	<b>Curva de Compactação</b>	<b>66</b>
5.2.2	<b>Índice de Suporte Califórnia (ISC)</b>	<b>67</b>
5.2.3	<b>Expansão</b>	<b>75</b>
5.3	<b>CARACTERIZAÇÃO MECANÍSTICA</b>	<b>76</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>95</b>
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	96
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>97</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O modal rodoviário é o mais utilizado no Brasil, representando 65% do transporte de carga e 95% do transporte de passageiros, mesmo apresentando um percentual de rodovias pavimentadas de apenas 12,4% em relação a malha total. Atualmente, o estado geral das rodovias brasileiras está classificado como ótimo ou bom em apenas 38,2%. Essa característica tem impacto socioambiental e econômico, visto que rodovias de baixa qualidade, seja na condição do pavimento ou capacidade operacional, implicam diretamente nos custos de transportes e na segurança dos usuários (CNT, 2021).

A situação atual da malha rodoviária nacional indicada reflete a necessidade de investimentos robustos em pavimentação, aumento de capacidade operacional, duplicação e manutenção de rodovias. Em qualquer dos cenários, se faz necessária a obtenção de materiais para construção dos pavimentos, embora a extração mineral de materiais naturais para camadas de pavimentação tenha se mostrado uma prática não sustentável (GAUTAM et al., 2018).

Outro ponto a ser observado se refere a obtenção dos materiais utilizados para construção e estabilização dos solos, que tem grande influência nos custos e impactos gerados pela construção (GOMES et al., 2021). Do ponto de vista ambiental, um fator relevante é a distância de transporte de materiais a serem utilizados nas camadas de pavimentação. A disponibilidade de solos com aptidão para utilização na região da construção, assim como o uso de estabilizantes, é de grande relevância para a escolha do material (GOMES et al., 2021).

Fontes de materiais que apresentem características técnicas compatíveis com as requeridas para as camadas de base e sub-base tem se mostrado cada vez mais escassas no Brasil (Pires *et al.*, 2019). Adicionalmente, a necessidade de adequação a legislação ambiental, tem dificultado a obtenção deste tipo de material (BALAGUERA et al., 2018).

Concomitantemente a escassez dos materiais, tem aumentado a demanda por projetos de construção sustentáveis na manutenção e pavimentação de estradas (JAMSHIDI et al., 2017; GOMES et al., 2021). Dentre os materiais utilizados, estão os coprodutos siderúrgicos empregados na estabilização de materiais de pavimentação

(CHEN; WEI, 2016; GU et al., 2018; LOUREIRO et al., 2022). Sua viabilidade técnica e ambiental foi demonstrada por diversos estudos (DÍAZ-PILONETA et al., 2021; MAGALHÃES et al., 2020; GU et al., 2018; FERREIRA et al., 2016). Do ponto de vista ambiental, a utilização de coproduto siderúrgico em substituição de materiais convencionais representou redução dos impactos ambientais gerados (FERREIRA et al., 2016), inclusive com reduções de até 50% no total de emissões de gases de efeito estufa (JAMSHIDI et al., 2017). Do ponto de vista técnico, tem apresentado desempenho mecânico igual ou superior aos pavimentos construídos com material convencional (TEIXEIRA et al., 2019).

Dentre os coprodutos oriundos da siderurgia, está aquele obtido ao final do processo de dessulfuração. Como esse processo ocorre no Kambara Reactor (KR), o resíduo resultando tem sido denominado coproduto siderúrgico tipo KR (PIRES et al., 2019; BRIDI, 2020; OLIVEIRA et al., 2021). Aproximadamente 40kg/t de coproduto siderúrgico tipo KR (CP-KR) é gerado ao final do processo de dessulfurização (LIN et al., 2024).

Em termos de resistência mecânica, o CP-KR tem apresentado grande viabilidade de utilização para finalidades diversas. Tong et al. (2016) realizaram a caracterização do material a fim de promover sua valorização e possibilidades de reutilização, Sheng et al. (2014) para aplicação do CP-KR como neutralizador de rejeitos de mineração e por Kuo (2015) para utilização como agregado em concretos utilizado para pavimentação.

A utilização do CP-KR como estabilizante de solos tem sido estudada de maneira pioneira no Brasil. Estudos técnicos-científicos realizados por pesquisadores brasileiros têm avaliado o desempenho do CP-KR como substituição de agregados naturais para pavimentação ou como estabilizante de solos para misturas aptas a construção de camadas de base, sub-base ou reforço do subleito, apresentando bons resultados (PIRES et al., 2019; BRIDI, 2020; OLIVEIRA et al., 2021).

Dentre suas características, pode-se ressaltar aquelas que seriam importantes para a utilização em pavimentos, como o potencial cimentante, o baixo potencial de expansão e a capacidade de estabilização de solos com baixa aptidão para pavimentação (PIRES et al., 2019), além da elevada resistência mecânica e da dureza do material (CHO, CHOI, 2016).

Sendo assim, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a utilização do desempenho coproduto siderúrgico tipo KR (CP-KR) como estabilizador de solos para pavimentação, por meio de parâmetros físicos, mecânicos e mecanísticos.

## 2 OBJETIVOS DA PESQUISA

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a utilização do coproduto tipo KR como estabilizador de solos para pavimentação por meio de parâmetros físicos, mecânicos e mecânicos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O projeto de pesquisa tem ainda os seguintes objetivos específicos:

- Analisar os diversos estudos de estabilização de solos com CP-KR já realizados do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação UFES;
- Avaliar o efeito do comportamento do ISC em função da variação da granulometria de solos estabilizados com CP-KR;
- Avaliar o efeito do comportamento do Módulo de Resiliência em função da variação da granulometria de solos estabilizados com CP-KR;
- Propor uma previsão de comportamento mecânico de misturas de solo com CP-KR, com base na granulometria do solo e do CP-KR, de modo a auxiliar a tomada de decisão para utilização do material na construção de rodovias.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ESTABILIZAÇÃO SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO

A estabilização de solos para fins de pavimentação pode ser definida como o fornecimento de resistência a deformação e ruptura para uma determinada carga aplicada, no intervalo de tempo em que o pavimento estiver exercendo suas funções mecânicas. Um solo estabilizado deve resistir ao cisalhamento e a deformação impostas pelas cargas aplicadas (Senço, 2008).

A estabilização dos solos para pavimentação deve ser realizada de acordo com as características dos materiais que compõem os pavimentos, de modo a extrair do solo estabilizado a resistência mecânica necessária (Senço, 2008).

Os materiais que compõem as camadas do pavimento podem ser classificados como materiais terrosos, materiais pétreos e materiais diversos. Os Materiais Terrosos são provenientes de fontes naturais e são obtidos pela exploração mineral de solos com aptidão para utilização em pavimentação. Os materiais Pétreos podem ser obtidos de fontes naturais ou artificiais e são denominados, na pavimentação, como agregados. São utilizados como único componente de uma camada de pavimentação ou como parte de uma mistura de materiais que compõem a camada do pavimento. Os Materiais Diversos, são os demais materiais que compõem o pavimento que não se enquadram nas descrições anteriores. Geralmente são estabilizantes como a cal hidratada, cimento *Portland* e ainda coprodutos provenientes da indústria como a Cinza Volante (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, 2006) .

A construção de um pavimento é viabilizada por meio da estabilização dos materiais que compõem cada camada. As características do material determinarão o tipo de estabilização que será realizada, seja por processos mecânicos ou químicos. O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) classifica as bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas conforme a Figura 1.

**Figura 1 – Classificação das Bases e Sub-bases e tipo de estabilização**



Fonte: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (2006)

Os tipos de base e sub-base estabilizados demonstrados na Figura 1 podem ser divididos em matérias granulares (Estabilização Mecânica) e materiais estabilizados com aditivos (Estabilização Química). Os materiais granulares podem ser estabilizados granulometricamente e são compostos geralmente de solo brita, brita graduada ou brita corrida. Já os materiais com aditivos são estabilizados quimicamente com cimento, cal ou betume, obtendo as seguintes misturas de materiais estabilizados para base e sub-base: solo cimento, solo melhorado com cimento, solo cal, solo melhorado com cal, solo betume e bases betuminosas.

O emprego de materiais naturais nas camadas de pavimentação para a utilização do processo de estabilização granulométrica depende da exploração mineral de fontes de material disponíveis nas regiões das obras. Essas fontes, que devem apresentar características técnicas compatíveis com a requeridas para as camadas de base e sub-base tem se mostrado cada vez mais escassas no Brasil (Pires *et al.*, 2019). Adicionalmente, a legislação ambiental para exploração mineral tem se mostrado cada vez mais efetiva, o que dificulta a obtenção deste tipo de material (Balaguera *et al.*, 2018).

Os melhoramentos de solos podem ser realizados através de duas técnicas, sendo elas: estabilização mecânica e estabilização química. A estabilização mecânica é

realizada através da aplicação de carga no solo promovendo a compressão e compactação dos componentes do solo, podendo ser melhorada a depender da granulométrica do solo. A estabilização química ocorre com a adição de materiais como cimento, cal hidratada, material betuminoso, materiais reciclados ou coprodutos siderúrgicos, objetivando promover a melhoria nas propriedades dos solos.

### **3.1.1 Estabilização Mecânica/Compactação**

A estabilização mecânica de solos é amplamente difundida na engenharia geotécnica para realização de obras de terras e pavimentação de rodovias.

A compactação de um solo é caracterizada pelo aumento da sua massa específica aparente, através da aplicação de pressão, impacto e vibração, ou a combinação destas ações. A compactação gera maior proximidade entre as partículas dos solos, através da expulsão do ar, redução do índice de vazios e consequente alteração das características mecânicas dos solos (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, 2010a).

Para Senço (2001), compactação de solos consiste no uso de força mecânica com o objetivo de reduzir o índice de vazios do solo. A estabilização mecânica em solos para utilização em rodovias se iniciou desde quando os velhos caminhos começaram a ser substituídos por estradas de automóvel.

A estabilização granulométrica de solos origina-se da adequada distribuição dos diversos tamanhos de grãos que compõem o solo, de modo que os vazios existentes sejam preenchidos por grãos menores. Neste caso, em se tratando de um solo natural, a estabilização decorre da própria distribuição granulométrica dos grãos, podendo ser utilizada simultaneamente a estabilização mecânica, promovendo ao solo a resistência mecânica e baixa permeabilidade (SENÇO, 2001).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (2010b), em sua Especificação de Serviço 139/2010 - Base estabilizada granulometricamente define a estabilização granulométrica como sendo:

*“Processo de melhoria da capacidade resistente de materiais “in natura” ou mistura de materiais, mediante emprego de energia de compactação adequada, de forma a*

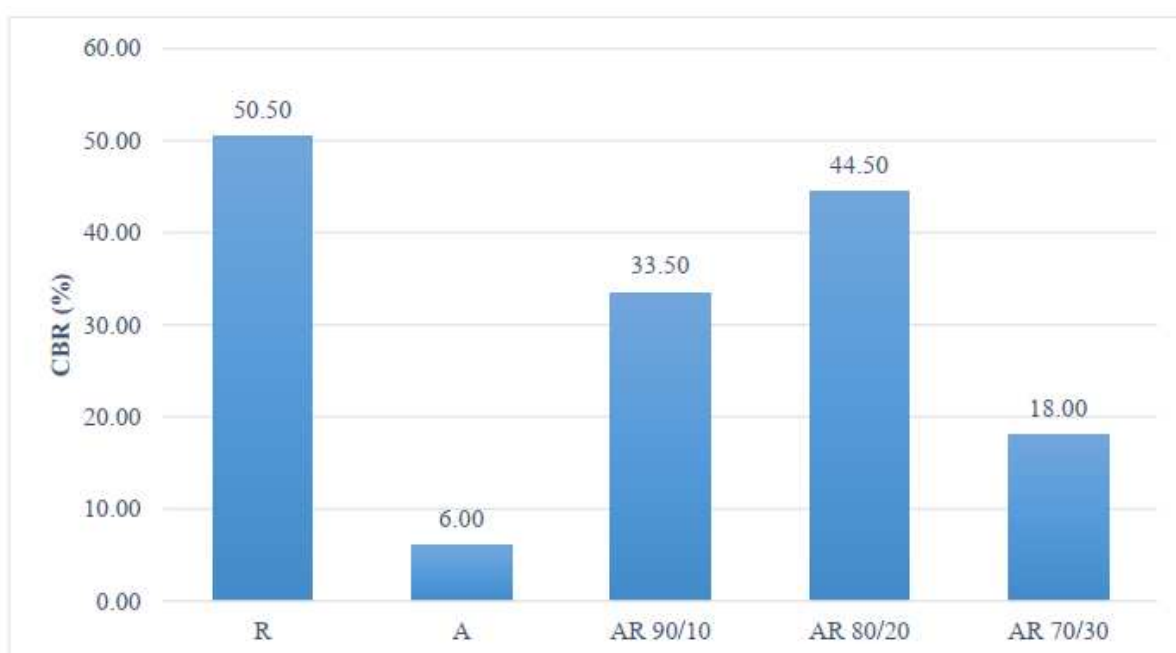
*se obter um produto final com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade”.*

A luz do exposto acima, a estabilização granulométrica pode ser realizada nos materiais naturais, ou através de misturas de materiais, de forma a se obter uma curva granulométrica que empregue ao solo a resistência necessária para a sua utilização.

Ainda segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (2006), em seu Manual de Pavimentação, as camadas de pavimentos destinadas a bases e sub-base estabilizadas granulometricamente podem ser constituídas por solos, britas de rocha, coprodutos siderúrgicos ou ainda, a mistura desses materiais.

A estabilização dos solos é demonstrada por Rodrigues (2018), que estudou o resultado da estabilização de solo utilizando rejeitos de espirais de mineração em diferentes proporções. Foram estudadas misturas de solo com o rejeito de mineração na proporção de 10%, 20% e 30%, e realizado ensaios para verificação dos ganhos de resistência obtidos pela amostra. Os resultados dos ensaios dos índices de resistência CBR foram aumentados pela mistura de materiais. Os resultados podem ser visualizados na Figura 2.

**Figura 2 – Resultado de CBR do Rejeito (R), Solo (A), Mistura 90% solo e 10 Rejeito, Mistura 80% solo e 20 Rejeito e Mistura 70% Solo e 30% rejeito**



Fonte: RODRIGUES (2018)

A partir dos dados obtidos o pesquisador afirma que a substituição de solo por rejeito de mineração aumenta a resistência a penetração da mistura (CBR), demonstrando aumentos de 458,33%, 641,67% e 200% para as misturas com 10%, 20% e 30% de rejeito, respectivamente. Nesta pesquisa não foi verificada interação química que contribuísse para o aumento de resistência, sendo o ganho de resistência atribuído a estabilização da mistura, a partir da adição de grãos de rejeito, que possui maior resistência que o solo natural.

A utilização de estabilização granulométrica é amplamente utilizada no Brasil e frequentemente tem suas especificações atualizadas pelo DNIT. Na especificação de Serviço Para Execução de Bases Estabilizadas granulometricamente (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, 2010c), o órgão disciplina a construção de Bases estabilizadas granulometricamente, definindo a sua composição, que pode ser formada por solos, misturas de solos ou ainda a mistura de solos com materiais britados.

A especificação define ainda, dentre outros parâmetros, as faixas granulométrias que o material deve atender, seja originado de solos ou de misturas. As faixas são definidas a partir da solicitação prevista a vida útil de pavimento e são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Granulometria para base granula**

Tipos peneiras	Para N > 5 x 10 <sup>6</sup>			Para N < 5 x 10 <sup>6</sup>			Tolerância da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
<b>% em peso passando</b>							
<b>2"</b>	100	100	-	-	-	-	+7
<b>1"</b>	-	75-90	100	100	100	100	+7
<b>3/8"</b>	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	+7
<b>Nº 4</b>	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	+5
<b>Nº 10</b>	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	+5
<b>Nº 40</b>	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	+2
<b>Nº 200</b>	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	+2

Fonte: DNIT (2010)

### 3.1.2 Estabilização Química

A estabilização química é realizada por meio da introdução de aditivos que promovem reações físico-químicas entre os grãos e o solo original, promovendo a melhoria das propriedades mecânicas e físicas dos solos (FRANÇA, 2003).

A viabilidade da utilização de aditivos como estabilizantes químicos está ligada ao bom resultado em vários tipos de solos e com efeito de estabilidade e características físicas duradouras. Os aspectos econômicos como baixo custo, alta disponibilidade, facilidade de estocagem e transportes também são características dos estabilizantes de solos (SHERWOOD, 1993) (FIROOZI et al., 2017).

A adição de agentes estabilizantes em solos produz novos materiais, quais sejam, solo cal, solo cimento e o solo betume, de modo a resistir aos efeitos do tráfego e intemperismos climáticos. Cada tipo de agente estabilizante reage de forma particular com o solo, através da cimentação, modificação da mineralogia, trocas de ions, precipitação, trocas catiônicas, etc. O sucesso da estabilização está ligado as características do material estabilizado e do conhecimento dos efeitos causados pela agente estabilizante selecionado (NÓBREGA, 1995).

Os agentes estabilizantes mais comuns são os cimentos Portland e a cal hidratada. Para solos arenosos, a estabilização utilizando o cimento Portland se mostra mais adequada, devido a reação do agente estabilizante com o solo. Já para solos argilosos, o uso da cal tem se mostrado mais indicado (Picoli, 2020). Pires et al. (2019) cita os coprodutos siderúrgicos, dentre eles o CP-KR, como aptos a atuar como agente estabilizantes de solos.

Nos itens a seguir serão tratados os mecanismos e normas de estabilização de solos com cimento e com cal hidratada.

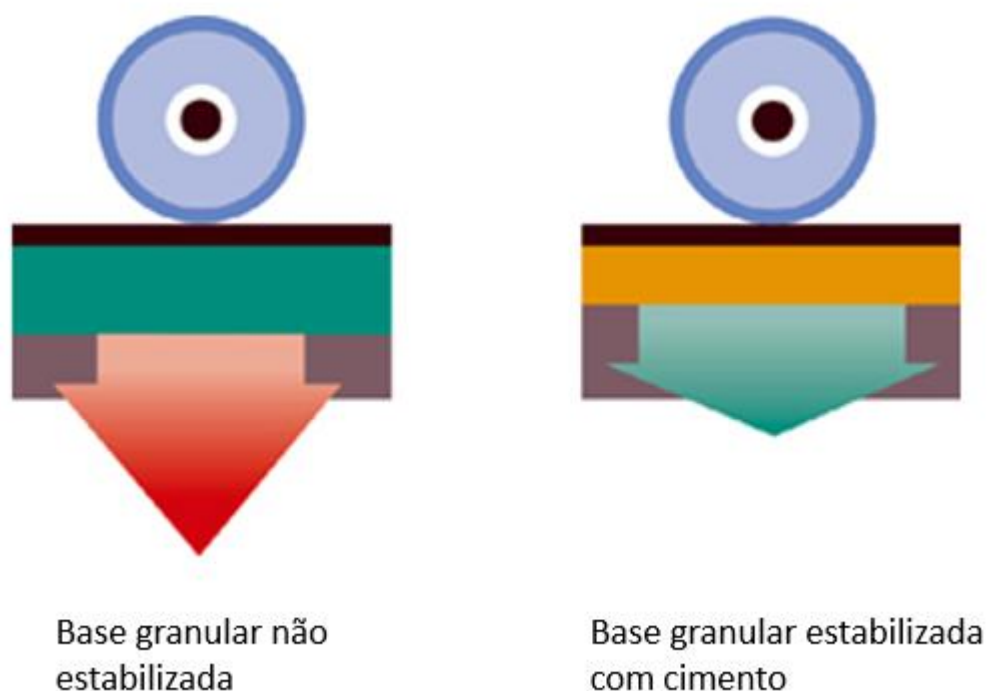
### 3.1.2.1 Estabilização com Cimento

A estabilização de solos com utilização de cimento, destinados a base e sub-bases rodoviárias, é dividida pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (2006), em Solo-cimentos e solos melhorados com cimentos.

O solo-cimento é definido pela mistura de solo, cimento *Portland* e água, que deve ser compactado para atingir os requisitos físicos e mecânicos determinados para a sua destinação. O teor de cimento para estas misturas de solo-cimento pode variar entre 6% e 10%. resultando em um material duro, e com elevada rigidez à flexão (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, 2006)

O solo-cimento pode ser misturado a solos naturais e materiais britados, ou uma mistura de materiais. Após a compactação e cura o material apresenta elevada resistência mecânica, durabilidade, baixa permeabilidade e resistência ao congelamento. As bases utilizadas em pavimentos rodoviários, quando estabilizadas com cimento, possuem uma espessura menor que as bases flexíveis estabilizadas granulometricamente, considerando a mesma solicitação de tráfego. A rigidez obtida pelo solo cimento faz com que as tensões geradas pelo tráfego sejam melhor distribuídas, gerando menores solicitações e deformações no subleito (Portland Cement Association, 2019). A Figura 3 exemplifica a diferença de atuação de cargas entre uma base granular não estabilizada e uma base de solo-cimento.

**Figura 3 – Distribuição de carga no subleito para bases não estabilizadas e bases estabilizadas com cimento.**



Fonte: Portland Cement Association (2019)

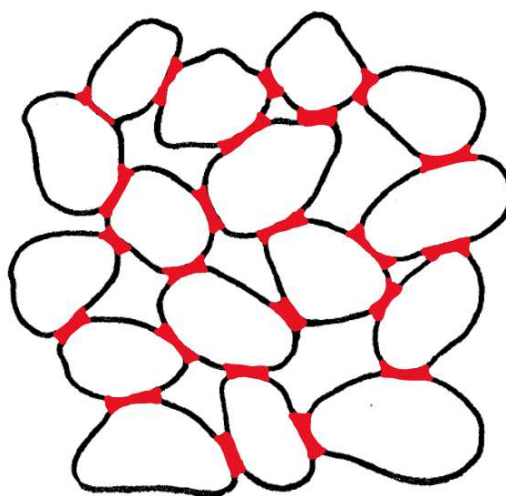
Já no solo melhorado com cimento os teores de estabilizante são menores que no solo-cimento, podendo variar entre 2% e 4%. Além do aumento de resistência, a principal alteração nas características do solo melhorado com cimento são a alteração da plasticidade e da sensibilidade a umidade, mantendo as características de camadas flexíveis (Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes, 2010).

Nobrega (1995), diferencia a atuação do cimento quando utilizado em argamassas ou concretos e quando é utilizado para estabilização de solos. Em relação ao concreto, o cimento envolve os agregados, preenchendo os vazios existentes, cimentando o material, resultando em alta resistência mecânica. Já a estabilização de solos, devido ao percentual de adição concreto e aos tipos de materiais empregados, o cimento é envolvido pelos grãos de solos, com ligações mais fracas, gerando um material estabilizado de menor resistência.

Nobrega (1995) ainda diferencia o comportamento do cimento na estabilização de solos granulares e nos solos argilosos. Nos solos arenosos, que possuem

granulometria mais grossa, o cimento atua de maneira similar ao concreto, sendo que, neste caso, a ligação entre os grãos devido a cimentação ocorre apenas em alguns pontos de contato, de maneira descontínua (Figura 4). A granulometria do solo a ser estabilizado, quando arenoso, influencia no grau de cimentação, visto que quanto menor o número de vazios e maior a superfície de contato entre as partículas, maior será a atuação do agente estabilizador.

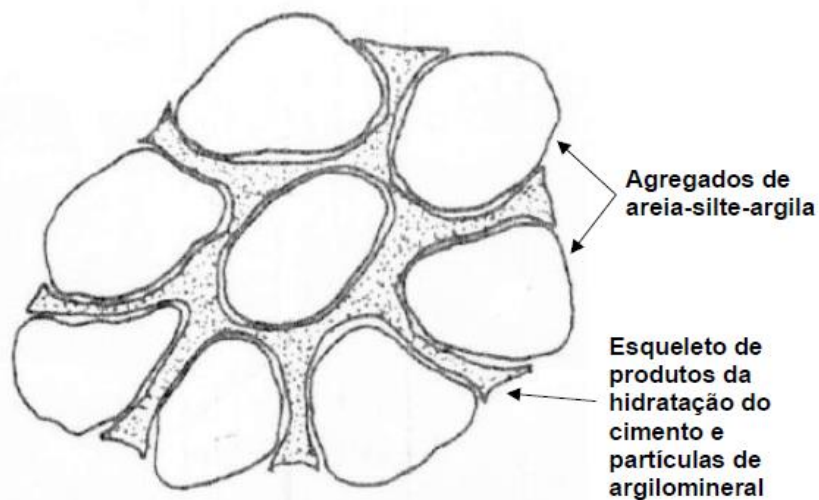
**Figura 4 – Exemplo da cimentação em solos grossos (arenosos).**



Fonte: Adaptado de KÉZDI (1979)

Para solos siltosos ou argilosos, a reação do cimento com a água cria ligações fortes entre as substâncias minerais interligadas entre si, envolvendo partículas de solos não cimentadas. A estrutura gerada promove o aumento de resistência da mistura, mesmo que existam dentro das células cimentadas, bolsões de solos não estabilizados com baixa resistência. A adição de cimento em solos coesivos aumenta a plasticidade do solo e a capacidade de retenção de água. A Figura 5 ilustra a estrutura de solo-cimento em grãos finos.

**Figura 5 – Estrutura de solos finos (argilosos/siltosos) tratados com cimento.**



Fonte: Adaptado de Bezerra (1796)

Kézdi (1979), divide a interação entre o cimento e a argila em processos primários e secundários. No processo primário ocorre a hidrólise e a hidratação do cimento, gerando aumento do pH da água e produção de hidróxido de cálcio, promovendo estabilização e aumento da resistência (NÓBREGA, 1995). No processo secundário ocorre a reação da argila com os íons de cálcio produzidos pela hidratação do cimento, transformando-a em argila cálcica e aumentando a intensidade da flocculação. O hidróxido de cálcio, gerado na fase primária, reage com as partículas de argila e compostos amorfos. O ganho de resistência e durabilidade do solo-cimento é completo na fase secundária, quando ocorre a produção de substância cimentante adicional e fortalecimento das ligações entre partículas.

A estabilização de solos com cimento produz a elevação da resistência mecânica do solo com poucas alterações das propriedades, entretanto, a estabilização dos solos argilosos muito plásticos tem se mostrado inviáveis devido ao alto teor de cimento necessário para estabilização (FIROOZI ET AL., 2017).

### **3.1.2.2 Estabilização com Cal**

Os mecanismos de estabilização de solo-cal ocorrem através de reações químicas imediatas que ocorrem a partir da mistura da cal com o solo. Primeiramente ocorrem

as reações de trocas catiônicas, seguidas de reações de neutralização de ácido-base e posterior adsorção pelas superfícies dos argilominerais. O processo químico gera a neutralização da acidez do solo, proporcionando um novo equilíbrio químico e termodinâmico. A alteração do pH da solução possibilita o início da reação química da argila com a solução. Quando o pH se estabiliza, as reações pozolânicas entre o solo e a cal, são concluídas, resultando na obtenção de misturas cimentantes (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, 2019b).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2019), por meio da Especificação de Serviço 421/2019 - Adição de cal para Estabilização de camada de Sub-base, defini o material como:

*“Material estabilizado proveniente de mistura de solo, cal e água em proporções previamente determinadas por processo de dosagem em laboratório, de forma a apresentar determinadas características de resistência, deformabilidade e durabilidade”.*

A adição da cal como agente estabilizante, de acordo com Nóbrega (1995), gera dois tipos de modificações no solo:

- Fase imediata: as alterações nas propriedades físicas causam reduções nos limites de Plasticidade e de Liquidez, modificação dos teores de umidade ótima e aumento da resistência mecânica. As alterações proporcionam uma melhor trabalhabilidade do material estabilizado, que se comporta de modo mais “granular” que o solo *in natura* (FIROOZI ET AL., 2017);
- A longo prazo: verifica-se um aumento crescente na resistência mecânica do solo estabilizado.

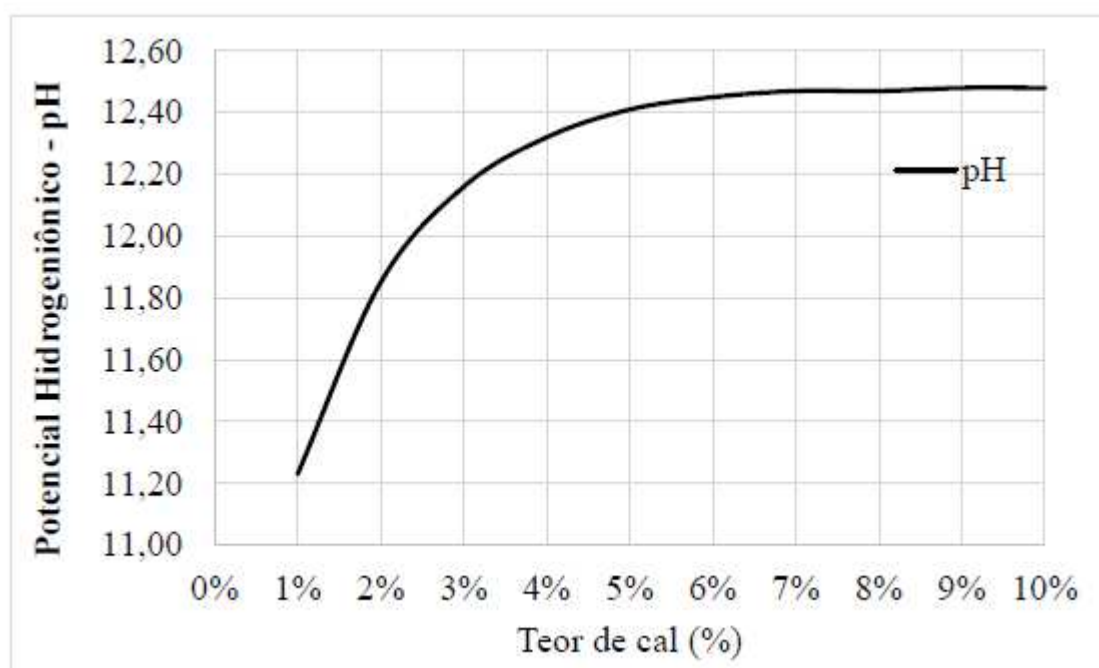
Ainda segundo Nóbrega (1995), os solos tropicais possuem pH que pode variar entre 5 e 6,5. A adição de cal cálcica, de aproximadamente 5%, eleva os valores de pH para 12. Ou seja, a adição de cal no solo leva a acidez do solo para condição alcalina, favorecendo as reações pozolânicas que modificam a estrutura dos solos.

A especificação 419/2019 – ME (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, 2019b), para estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo, estabelece, como critério para definição do teor mínimo de cal, que a mistura alcance um pH mínimo de 12,4. Essa condição alcalina garantirá as reações

pozolônicas e cimentantes previstas, atendo assim aos requisitos mecânicos, de Índice de Suporte Califórnia, Resistência a compressão ou módulo de resiliência que atenda as especificações de projeto.

A especificação demonstra a título de exemplificação o gráfico da Figura 6, que indica a variação do pH do solo até sua estabilização, à medida que o teor de cal adicionada aumenta. No caso específico, o teor de cal estimado para atingir o pH de 12,4 é de 5%.

**Figura 6 – Variação do pH em relação ao teor de cal.**



Fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (2019b).

A aptidão da cal como estabilizante químico para solos argilosos foi demonstrada por (Yilmaz; Demir, 2021). Diferentes proporções de pó de mármore (5%, 10%, 15% e 20%) foram estudadas com e sem a adição de cal (6%). Os resultados apresentados na Tabela 2 demonstram o efeito da adição do pó de mármore e cal na redução dos índices de plasticidade do solo. A adição somente do pó de mármore gerou pequenas diferenças no índice de plasticidade, já a cal possibilitou a redução de 30,8% para

17,1% no índice, alterando as propriedades físicas e melhorando a trabalhabilidade do material.

O aumento da resistência mecânica também foi evidenciado nos ensaios de cisalhamento direto demonstrados Tabela 2. As amostras apresentadas referem-se a: Solo sem mistura – S; solo com pó de mármore – SM; solo com cal – SL; e solo com pó de mármore e cal – SML. O teor de cal foi mantido constante em 6%.

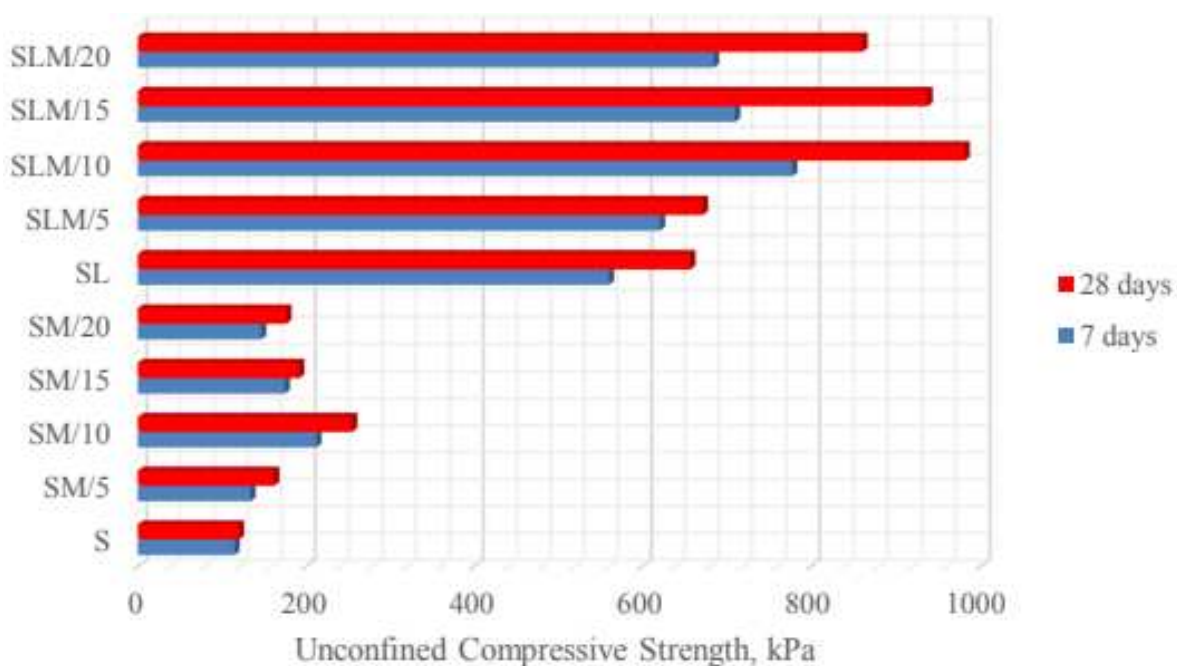
A resistência do solo com adição de 10% de pó de mármore e 6% de cal passou de 120,3 kPa para 981,2 kPa, aos 28 dias, gerando um aumento de resistência de aproximadamente 8 vezes.

**Tabela 2 – Resultados físicos e mecânicos de misturas de solos estabilizados com Pó de Mármore e Cal**

Amostra	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)	Resistencia (kPa)	
				7 dias	28 dias
S	60,8	30	30,8	115,2	120,3
SM/5	57,4	32,1	25,3	134,0	162,1
SM/10	58,6	32,8	25,8	212,2	254,8
SM/15	58,1	31,6	26,5	174,8	192,0
SM/20	57,8	30,9	26,9	146,5	176,5
SL	54,9	34,5	20,4	560,2	567,0
SLM/5	54,1	34,9	19,2	621,0	672,0
SLM/10	53,9	35,7	18,2	778,3	981,2
SLM/15	53,0	34,8	18,2	710,4	937,5
SLM/20	51,6	34,5	17,1	685,3	861,2

Fonte: Adaptado de YILMAZ; DEMİR (2021)

**Figura 7 - Resultados de Resistência a compressão simples para misturas de solos estabilizados com Pó de Mármore e Cal**



Fonte: YILMAZ; DEMİR (2021)

O estudo demonstra que o uso combinado de cal com pó de mármore aumenta a resistência mecânica do solo, melhora a trabalhabilidade e a durabilidade do solo.

A estabilização de solos com cal não é indicada para locais susceptíveis a variações de umidade, visto que a variação pode gerar perda de coesão entre o solo o agente cal, gerando expansão. Desta forma, não é indicado a estabilização de solos com cal em locais expostos a inundação ou variação de umidade (FIROOZI ET AL., 2017)

### 3.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM COPRODUTOS SIDERÚRGICOS

A utilização de coprodutos siderúrgicos para estabilização de materiais de pavimentação tem sua viabilidade técnica e ambiental demonstrada em diversos estudos científicos realizados no mundo (MAGALHÃES ET AL., 2020; GU ET AL., 2018; FERREIRA ET AL., 2016).

Especificações técnicas já publicadas pelo DNIT estabelecem critérios de aceitação do coproduto siderúrgico, especificando características físicas e mecânicas dos

materiais. A Especificação de Serviço 406/2017 (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, 2017), define o procedimento para execução e aceitação de camadas de base estabilizadas granulometricamente com Açobrita®.

O coproduto Açobrita® é especificado como:

*“Material proveniente da produção e refino do aço, composto de óxidos e silicatos, com alta resistência ao desgaste, tratado ao tempo com molhagem e aeração para redução do seu potencial de expansão, estabilizado granulometricamente, utilizado em obras de pavimentação, entre outras aplicações”*

Destaca-se que a norma prevê o tratamento do coproduto proveniente da produção do aço, com molhagem e aeração, com o objetivo de reduzir o potencial de expansão. As ações recomendadas, geram impactos ao meio ambiente, indo de encontro a sustentabilidade proveniente da reutilização de coprodutos siderúrgicos.

Por se tratar de uma base estabilizada granulometricamente, as especificações para execução dos serviços são semelhantes ao de uma base estabilizada granulometricamente com materiais convencionais. A Tabela 3 demonstra que a especificação de serviço com coproduto siderúrgico é semelhante a com materiais convencionais. A principal diferença notada é a restrição em relação a expansão do coproduto, que exige o tratamento preliminar do material anteriormente a sua aplicação. Estas diferenças demonstram que a especificação prevê que a utilização do coproduto como estabilizante mecânico, sem considerar as potencialidades do material como estabilizante químico.

**Tabela 3 – Comparação entre as especificações de bases estabilizadas granulometricamente com materiais naturais e com coprodutos siderúrgicos.**

Características da Mistura Estabilizada		ES 141/10	ES 406/2017
Faixa Granulométrica	$N \leq 5 \times 10^6$	E, F	E, F
	$N > 5 \times 10^6$	A, B, C, D	A, B, C, D
Equivalente de Areia (%)		$\geq 30,0$	-
LL (%)		$\leq 25$	$\leq 25$ (para solos não lateríticos)
IP (%)		$\leq 6$	$\leq 6$ (para solos não lateríticos)
ISC (%)	$N \leq 5 \times 10^6$	$\geq 60,0$	$\geq 60,0$
	$N > 5 \times 10^6$	$\geq 80,0$	$\geq 80,0$
Expansão (%)		$\leq 0,50$	$\leq 0,50$
Abrasão Los Angeles da Fração Retida 2 mm (nº 10) (%)		$\leq 55$	$\leq 55$
Potencial de expansão da mistura	$N \leq 5 \times 10^6$	-	$\leq 1,50$
	$N > 5 \times 10^6$	-	$\leq 1,00$

Fonte: Adaptado de DNIT (2017) e DNIT (2010)

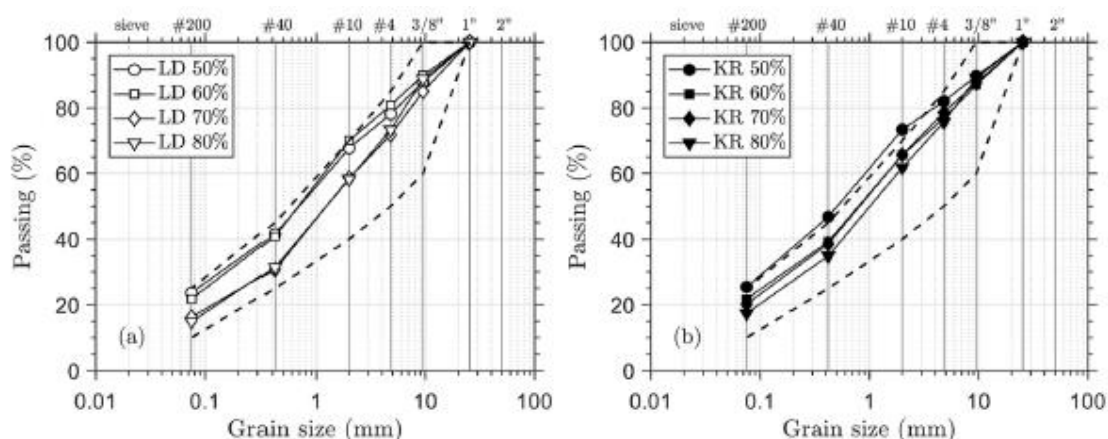
Os coprodutos siderúrgicos podem atuar como agentes estabilizantes mecânicos ou químicos. Magalhães et al. (2020) e Gomes et al. (2021) estudaram o desempenho de coprodutos siderúrgicos como estabilizantes de solos. No estudo foram selecionados coprodutos siderúrgicos de indústrias locais do Espírito Santo, sendo um tipo KR e outra tipo LD, e um solo argiloso de um trecho experimental no oeste do Estado. Foram realizados ensaios de laboratório de misturas de solos com coprodutos, variando de 50% a 80% do coproduto. Os parâmetros analisados das amostras foram o CBR, Índices de Plasticidade, variação do CBR em relação a presença de água, umidade ótima peso específico máximo.

O solo do subleito utilizado para mistura é composto basicamente por silte e argila, classificado com A-6, com Limite de liquidez de 28,4% e índice de plasticidade de 14,0%. A média do CBR obtido foi de 12,9%. Os coprodutos LD e KR foram classificados como não plásticos, os valores do peso específico seco máximo foi de 2,25 e 2,28 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Os valores de CBR encontrados foram de 100% para LD e 96% para KR.

Os resultados para as misturas de solo com o coproduto siderúrgico também foram apresentados. A granulometria das misturas variou de acordo com a proporção de

coproduto utilizado, sendo que as faixas de 50 e 60% ficaram próximas, e as faixas de 70% e 80% também apresentaram similaridade. No caso da escoria LD, todas as misturas ficaram dentro da faixa granulométrica “D” especificada na norma de base estabilizada granulometricamente do DNIT. A mistura com 50% de KR ficou fora da faixa “D”, as demais encaixaram na faixa normativa Figura 8.

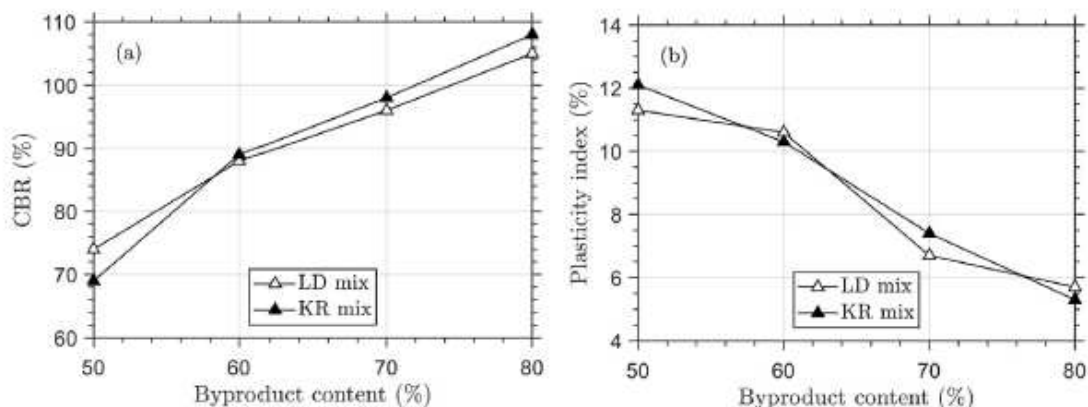
Figura 8 – Granulometria das misturas solo-coproduto estudadas.



Fonte: MAGALHÃES ET AL. (2020)

Os resultados de CBR e índices de plasticidade obtidos pelo autor são apresentados na Figura 9. Os gráficos mostram que quanto maior a proporção de coproduto, maior o valor do CBR. O índice de plasticidade se mostrou menor quanto maior o percentual de coproduto na mistura.

Figura 9 – Valores de CBR e Índice de Plasticidade das misturas solo-coproduto



Fonte: MAGALHÃES ET AL. (2020)

As características técnicas obtidas pelos ensaios realizados foram comparadas as normas brasileiras de execução de camadas de bases estabilizadas granulometricamente, definidas na Instrução de Serviço (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, 2010c). Os resultados demonstram que misturas de coprodutos com o solo estudado com proporções acima de 60% atendem a especificação de CBR para rodovias de médio a alto volume de tráfego. As faixas granulométricas exigidas também são atendidas para o coproduto tipo LD, sendo as proporções de 70% e 80% as mais adequadas.

No estudo realizado não foi possível identificar se o aumento de resistência foi atribuído à estabilização granulométrica ou química, entretanto, as proporções de material incorporado ao solo, acima de 50%, não são comuns para a estabilização química de solos. Os percentuais normalmente utilizados para solos estabilizados ou solos melhorados com cal ou cimento são de até 10%. Alguns estudos com coprodutos siderúrgicos indicam a utilização de proporções de até 30% de coproduto, atuando como estabilizante químico de solos (OLIVEIRA ET AL., 2021; PIRES ET AL., 2019; PICOLI, 2020).

Os coprodutos siderúrgicos podem contribuir como estabilizantes químicos para materiais de pavimentação. Oliveira et al. (2021) em um estudo utilizando CP-KR verificaram que, o ganho de resistência da mistura de solo com o coproduto, foi originado principalmente da interação química a argila e o coproduto.

### **3.2.1 Estabilização com Coproduto KR (CP-KR)**

Durante o processo de fabricação do aço, após a etapa realizada no alto forno, é realizada a um pré-tratamento antes do refino do aço. Neste pré-tratamento, o ferro-gusa passa por um processo de retirada do excesso de enxofre, chamado de dessulfuração. Esse processo é realizado no Kambara Reactor (KR), de onde é obtido a escória tipo KR (PIRES ET AL., 2019; BRIDI, 2020; OLIVEIRA, 2018), objeto deste estudo.

O CP-KR foi estudado por Tong et al. (2016) para caracterização do material a fim de promover sua valorização e estudar as possibilidades de reutilização, por Sheng et al.

(2014) para aplicação do CP-KR como neutralizador de rejeitos de mineração e por Kuo (2015) para utilização como agregado em concretos utilizado para pavimentação.

De acordo com Cho & Choi (2016), areias e material britado para fabricação de concretos podem ser substituídos por coproduto tipo KR devido a elevada resistência mecânica e dureza do material.

A utilização do CP-KR como estabilizante de solos tem sido estudada de maneira pioneira no Brasil. Estudos técnicos-científicos realizados por pesquisadores brasileiros têm avaliado o desempenho do CP-KR como substituição de agregados naturais para pavimentação ou como estabilizante de solos para misturas aptas a construção de camadas de Base, sub-base ou reforço do subleito (Bridi, 2020).

Os coprodutos provenientes do processo de refino (escória de aciaria) apresentam propriedades expansivas. Já o CP-KR não apresenta estas características, o que favorece a utilização do material em pavimentação sem a necessidade de tratamento prévio. O material pode ser útil para estabilização de solos argilosos, uma vez que possui elevado teor de CaO (>40%), que pode participar das trocas catiônicas com as partículas de argila, mesmos mecanismos de estabilização verificados quando utilizado a cal hidratada. O coproduto possui ainda elementos químicos semelhantes aos encontrados no cimento Portland, como o SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>3</sub>O<sub>3</sub>, resultando na cimentação semelhante a observada na estabilização de solos argilosos com cimento (Oliveira; Pires; Teixeira, 2021).

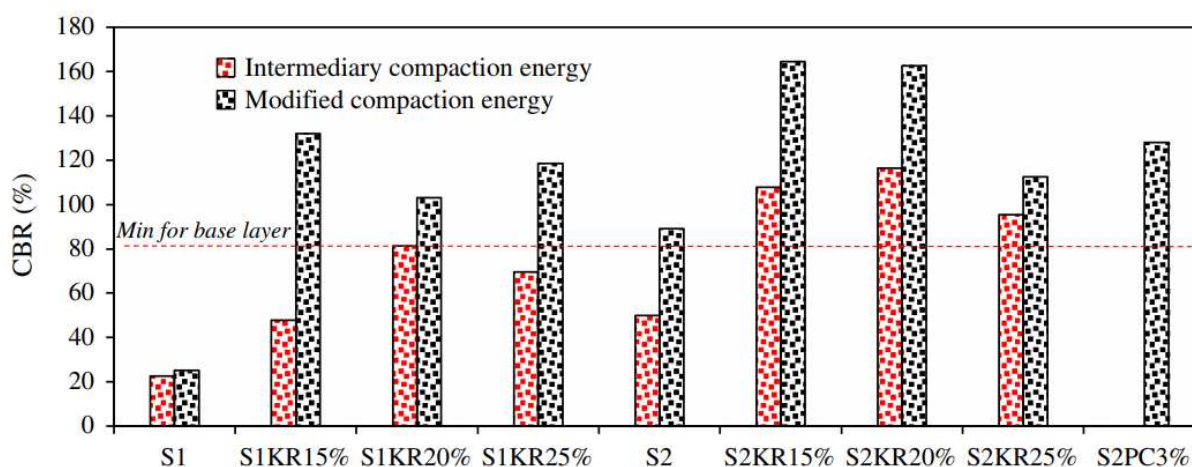
Os mesmos autores desenvolveram um estudo em que foi avaliado o desempenho do CP-KR como estabilizador de solos para pavimentação. Foram realizados testes de laboratório e construída uma pista experimental para um simulador de tráfego. O desempenho do coproduto como estabilizante de um solo argiloso muito plástico (S1) foi comparado a utilização de um solo arenoso (S2) estabilizado com Cimento Portland (Tabela 4). Os ensaios de resistência a penetração (ISC) realizados com o CP-KR misturado a um solo argiloso, de alta plasticidade, são apresentados na Figura 10. Os dados demonstram que o desempenho do agente estabilizador é diferente a depender do tipo de solo, que apresentou um aumento no valor de CBR maior para a argila do que para o solo arenoso. Também é demonstrando na Figura 10 que os valores obtidos de CRB no solo S2 com 15% ou 20% de coproduto KR (S2KR15% e S2KR20%) foi superior ao valor obtido no solo S2 com 3% de Cimento Portland (S2PC3%).

Tabela 4 – Caracterização física dos solos S1 e S2.

Propriedade	Referencial Normativo	Resultados	
		S1	S2
Massa específica aparente seca (g/cm <sup>3</sup> )	ABNT NBR 6458	2.65	2.65
Limite de Liquidez (%)	ABNT NBR 6459	49.00	26.00
Limite de Plasticidade (%)	ABNT NBR 6459	24.80	15.10
Índice de Plasticidade (%)	ABNT NBR 7180	24.2	11.00
Classificação	AASHTO M 145	Argila A-7-6	Areia Argilosa A-2-6

Fonte: Oliveira; Pires; Teixeira (2021)

Figura 10 – Resultados dos ensaios de ISC para os solos estabilizados com CP-KR.



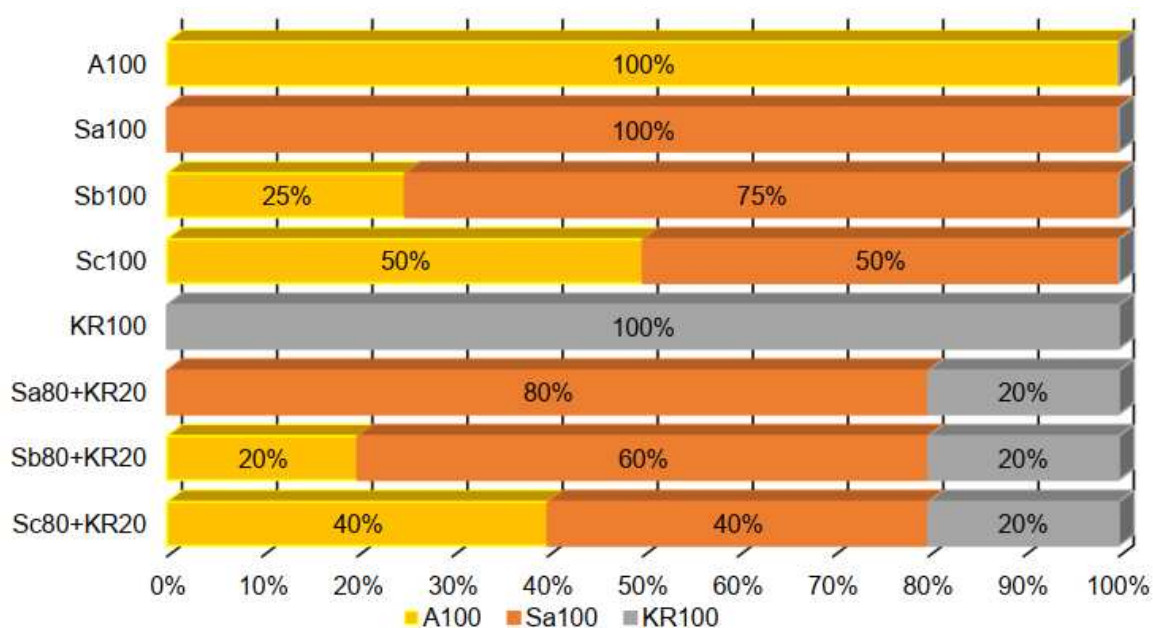
Fonte: Oliveira; Pires; Teixeira (2021)

Os pesquisadores concluem ainda que o solo argiloso estudado não foi estabilizado, mesmo com a adição de 10% de Cimento Portland. Entretanto, a utilização do CP-KR em porcentagem de 20% elevou os valores de resistência a penetração (CBR) para níveis aceitáveis para utilização em bases ou sub-bases.

Bridi (2020), também avaliou o comportamento do CP-KR como estabilizante de solos para pavimentação. O pesquisador caracterizou fisicamente e mecanicamente

misturas de coproduto tipo KR com um solo modificado, com diferentes teores de finos. Um solo argiloso – Sa100 foi modificado através da inclusão de areia em sua composição (A100), alterando o valor total de finos do solo. Enquanto o solo natural possui cerca de 60% de finos, os solos Sb100 e Sc100 possuem, o teor de finos de 45% e 30% respectivamente. Os solos foram misturados com o CP-KR na proporção de 20% de coproduto e 80% de solo. A Figura 11 demonstra os materiais e as proporções formadas.

**Figura 11 – Composição e misturas utilizadas.**

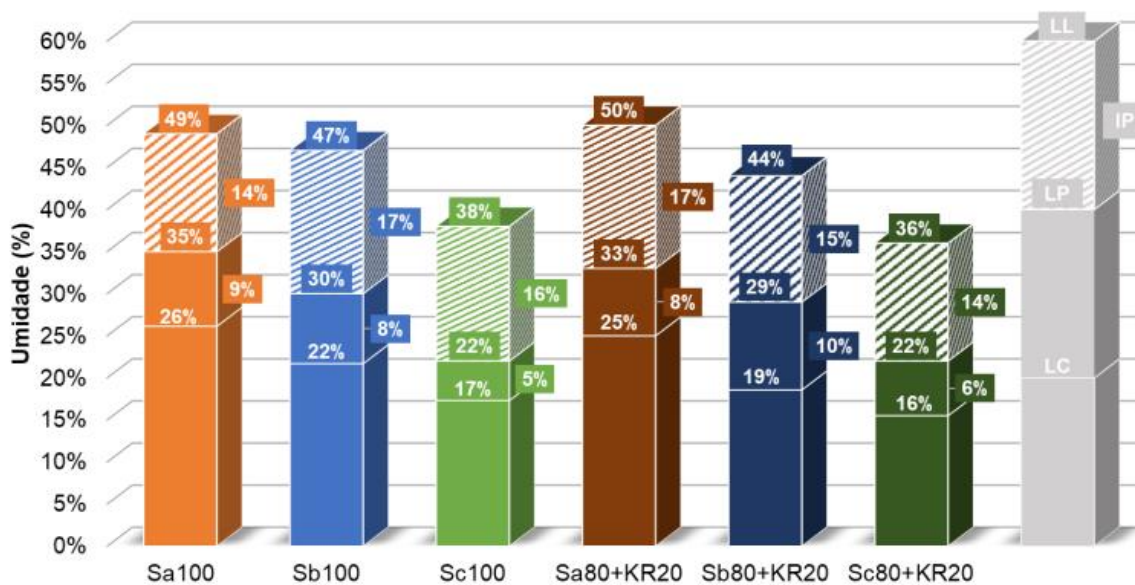


Fonte: Bridi (2020)

A caracterização física dos materiais ensaiados, em relação aos limites de consistência, demonstra que o coproduto não promoveu alteração significativa dos valores, fato que diverge de outros estudos realizados (Figura 12). O autor atribui a manutenção dos valores a granulometria do coproduto e a realização dos ensaios imediatamente após a mistura dos materiais, não permitindo que as interações necessárias para alteração da plasticidade ocorressem. Em relação ao índice de suporte califonia (ISC), o resultado se mostrou diferente do ocorrido com os índices. Os solos que mostraram maior incremento de resistência são aqueles com maior percentual de finos, fato que relaciona o teor de finos do solo com a eficiência na estabilização com CP-KR. O autor demonstrou ainda que a estabilização com CP-KR não ocorre de maneira imediata, podendo ser verificado ganhos de resistência

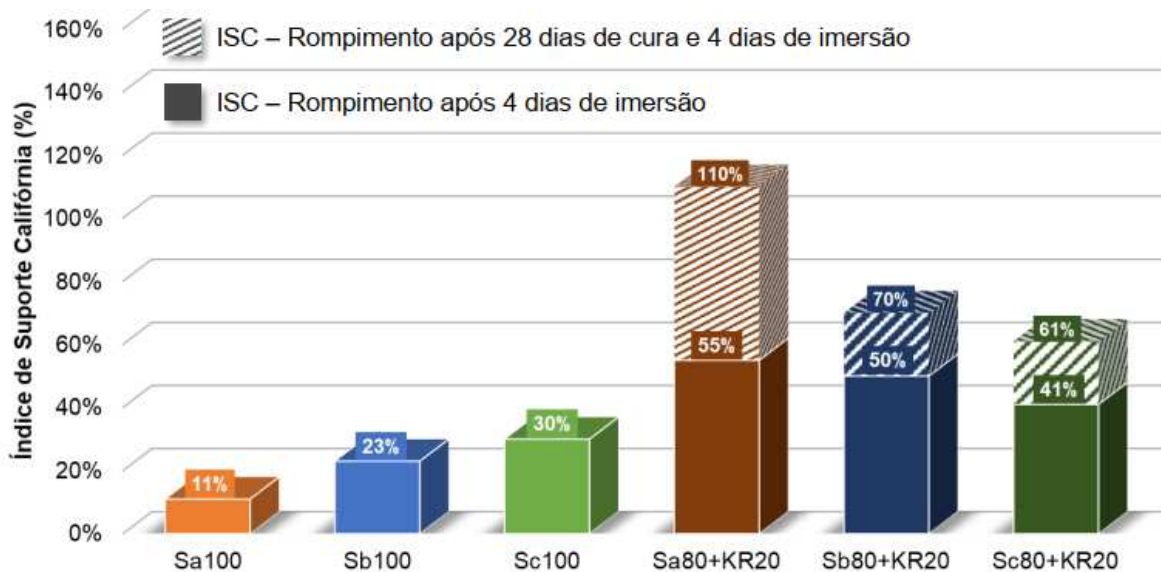
significativos no solos estabilizados quando o tempo de cura passa de 4 para 28 dias (Figura 13).

**Figura 12 – Limites de consistencia.**



Fonte: Bridi (2020)

**Figura 13 – ISC das amostras na umidade ótima após 4 dias de imersão e após 28 dias de cura e 4.**



Fonte: Bridi (2020)

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 MATERIAIS**

#### **4.1.1 Solo**

Os solos objeto da investigação geotécnica foram selecionados a partir de uma única jazida de material de pavimentação, de solo residual jovem, localizada no município de Itarana-ES. A seleção desta jazida objetivou a obtenção de solos nos três horizontes de exploração existentes, resultando em solos com diferenças de granulometrias compatíveis com o estudo pretendido.

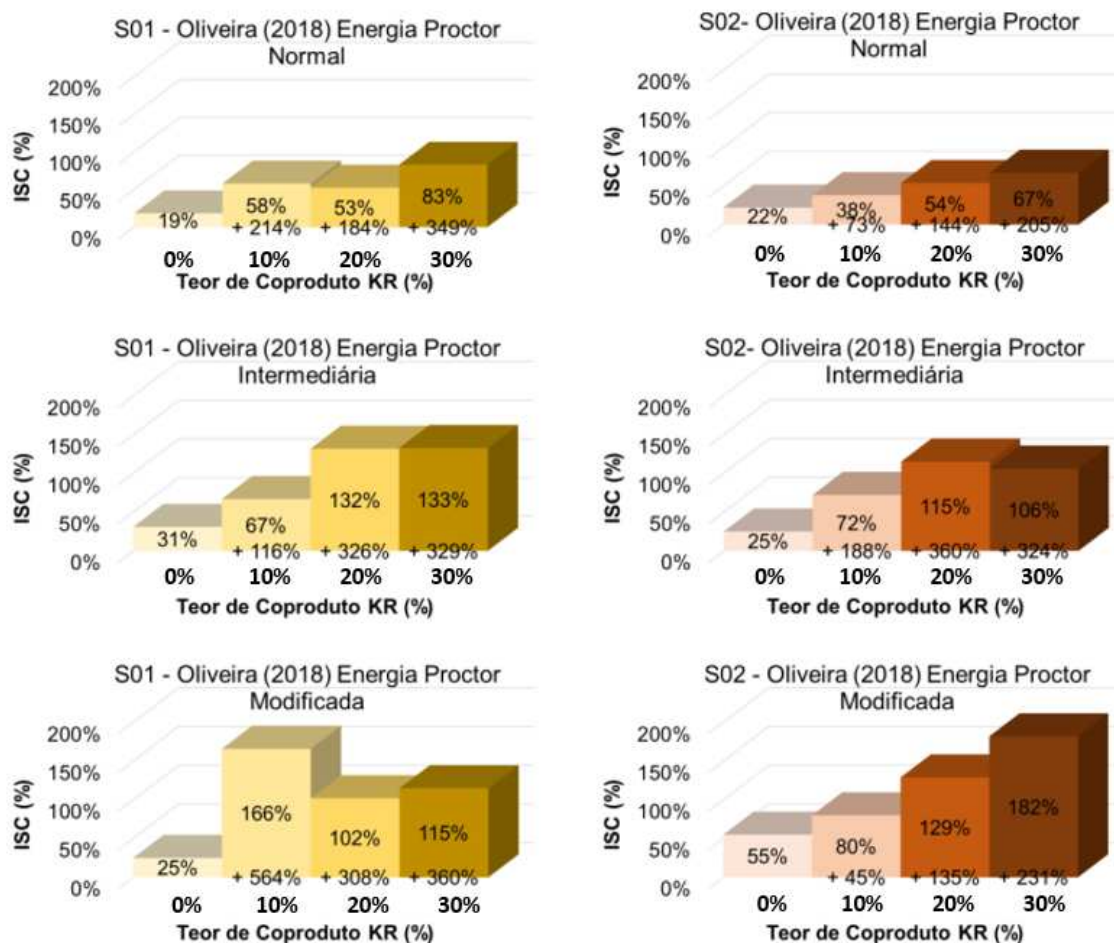
Desta forma foram selecionados 3 tipos de solos naturais, de granulometria distintas, oriundo da mesma jazida, sendo: S1 – argila amarela, S2 – argila Arenosa vermelha e S3 – Areia Argilosa.

#### **4.1.2 Teor de coproduto**

O teor ótimo para melhoramento de solos com CP-KR já foi estudado por pesquisadores do Laboratório de Geotécnica e Pavimentação da UFES. Oliveira (2018) realizou ensaios para avaliar os efeitos da incorporação do CP-KR como estabilizante de solos. Foi realizada a caracterização dos materiais e ensaios mecânicos para verificação do potencial do KR para utilização em camadas de pavimentos rodoviários. O programa experimental da pesquisadora inclui diversos ensaios, sendo os mais relevantes para esta pesquisa os seguintes: Granulometria, Limite de liquidez, Limite de plasticidade, Massa Específica Real dos Grãos, Compactação, Expansão, Índice de Suporte Califórnia e Módulo De Resiliência.

Os solos selecionados apresentaram características físicas e mecânicas distintas. O solo S1 foi classificado como A-7-6, argiloso de alta plasticidade, com Índice de plasticidade de 28% e fração passante na peneira #200 de 52,7%. O solo S2 foi classificado como A-2-7, Areia Argilosa, com Índice de plasticidade de 22,6% e fração passante na peneira #200 de 52,7%. Os solos foram misturados com diferentes proporções de CP-KR (10%, 20% e 30%) e os resultados podem ser na Figura 14.

**Figura 14 – Resultados do ISC obtidos para diferentes teores de CP-KR.**



Fonte: (Oliveira, 2018) organizado por Bridi (2020)

Os dados obtidos por Oliveira (2018) demonstram que o teor de 20% de CP-KR apresenta incremento significativo de resistência para diferentes tipos de solos. O teor de 20% é suficiente para atender as normas brasileira para camadas de pavimentação, sendo adequado para utilização.

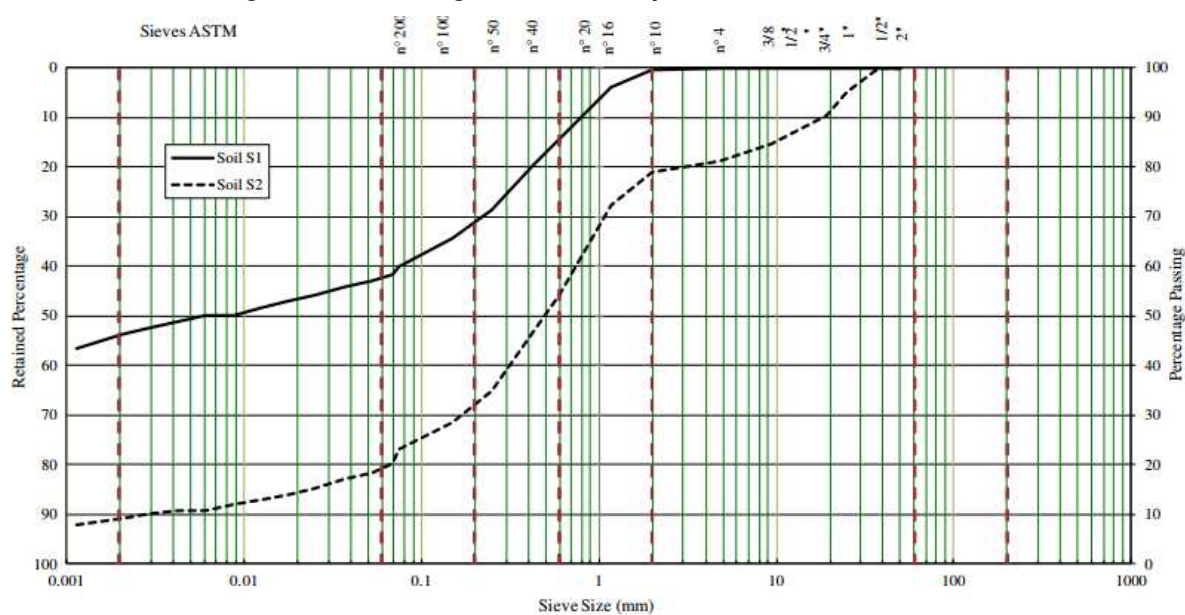
Pires et al. (2019), realizaram uma extensa pesquisa laboratorial com diferentes teores de coproduto com estabilizador de solos. Foram estudados percentuais de 15%, 20% e 25% de coproduto em misturas de solos. Os dados obtidos indicaram que o valor de 20% apresentou significativo incremento na capacidade de suporte do solo argiloso atendendo as recomendações normativas para camadas de sub-base, sendo selecionado o teor de 20% para continuidade dos testes em pistas experimentais.

Diante dos estudos já realizados, optou-se por utilizar o teor de coproduto como fator constante do planejamento experimental. As misturas com CP-KR que serão apresentados no programa experimental foram fabricadas mantendo o percentual fixo de 20% de CP-KR, em peso.

#### **4.1.3 Influência do teor de Finos**

Os estudos já realizados indicam que o incremento de resistência mecânica gerado pelo CP-KR varia de acordo com o tipo de solo que está sendo melhorado. Nepomuceno (2019) e Oliveira (2018) estudaram a estabilização de CP-KR para dois solos distintos, denominados solos AE (Solo 1), localizado no Km 368 da BR 101, e o JP06 (Solo 2), localizado no Km 373 da BR 101. O solo AE foi caracterizado como solo A-7-6, segundo a classificação AASHTO HBR, composto por argila, muito plásticas e com grande variação de volume. O solo JP06 foi classificado como A-2-6, sendo arenoso com presença de pedregulhos e argila, bem graduado e com média plasticidade. Os dois solos foram estabilizados com diferentes proporções de coproduto. As curvas granulométricas dos solos AE e JP06 podem ser verificadas na Figura 15. A diferença entre o percentual de argila+silte (passante na peneira #200) para os solos é significativa. No solo JP06 (arenoso) o percentual passante na peneira #200 é de aproximadamente 23%, já no solo AE (argiloso) esse percentual é de aproximadamente 60%.

**Figura 15 – Curva granulométrica para os solos AE e JP06.**



Fonte: (Pires *et al.*, 2019)

A caracterização mecânica realizada pelos autores permite avaliar o desempenho de cada mistura estudada em relação ao solo em seu estado natural. O incremento de resistência calculado se mostrou mais significativo para o solo S1 (AE). Um dos fatores que apresentam diferenças significativas entre os solos estudados é a granulometria, indicando uma possível diferença relacionada a essa variável. Na Tabela 5 é possível verificar que a média de incremento de resistência foi de 379% para o solo S1 que possui um percentual de material passante na peneira #200 de aproximadamente 60%. Já a média no incremento de resistência no solo S2, que possui percentual de material passante na peneira #200 de 23%, foi de 190%.

**Tabela 5 – Caracterização Mecânica dos solos em estado natural e modificado.**

Solo	Misturas	Energia Compac.	Umidade ótima (%)	Peso Esp. (g/cm³)	CBR (%)	Incremento de Resistência
S1	S1	Inter.	17.0	1.752	22.7	-
		Modificada	16.3	1.808	25.3	-
	S1KR15%	Inter.	18.0	1.772	47.8	211%
		Modificada	16.1	1.849	132.0	522%

	S1KR20%	Inter.	17.4	1.804	81.2	358%
		Modificada	15.5	1.853	103.2	408%
	S1KR25%	Inter.	18.0	1.877	69.5	306%
		Modificada	15.5	1.886	118.6	469%
<b>S2</b>	S2	Inter.	10.6	1.920	49.6	-
		Modificada	10.3	2.009	89.1	-
	S2KR15%	Inter.	12.2	1.922	107.8	217%
		Modificada	11.2	2.025	164.5	185%
	S2KR20%	Inter.	12.5	1.952	116.4	235%
		Modificada	12.2	1.975	162.6	182%
	S2KR25%	Inter.	12.8	1.944	95.4	192%
		Modificada	11.5	1.996	112.5	126%

**Fonte:** Adaptado de Pires et al. (2019)

Bridi (2020), realizou estudos de um solo argiloso, denominado Sa100, e dois outros solos obtidos artificialmente, denominados Sb100 e Sc100. O solo Sa100 foi modificado com a inclusão de areia em sua composição, com o objetivo de variar os teores de finos. Os ensaios realizados pelo pesquisador permitem avaliar o desempenho e o incremento de resistência da mistura com base nas características do solo. O autor já concluiu em seu trabalho que, no caso dos materiais estudados, a quantidade de finos presente nos solos interferiu diretamente no incremento de resistência das amostras.

Com base nos dados da pesquisa foi elaborada a Tabela 6, que demonstra o incremento de resistência de solos estudados por Bridi (2020). Os resultados serão avaliados a partir de dados granulométricos detalhados, objetivando obter uma correlação do comportamento mecânico de acordo com a granulometria do solo a ser estabilizado.

**Tabela 6 – Avaliação do incremento de resistência obtido por Bridi (2020)**

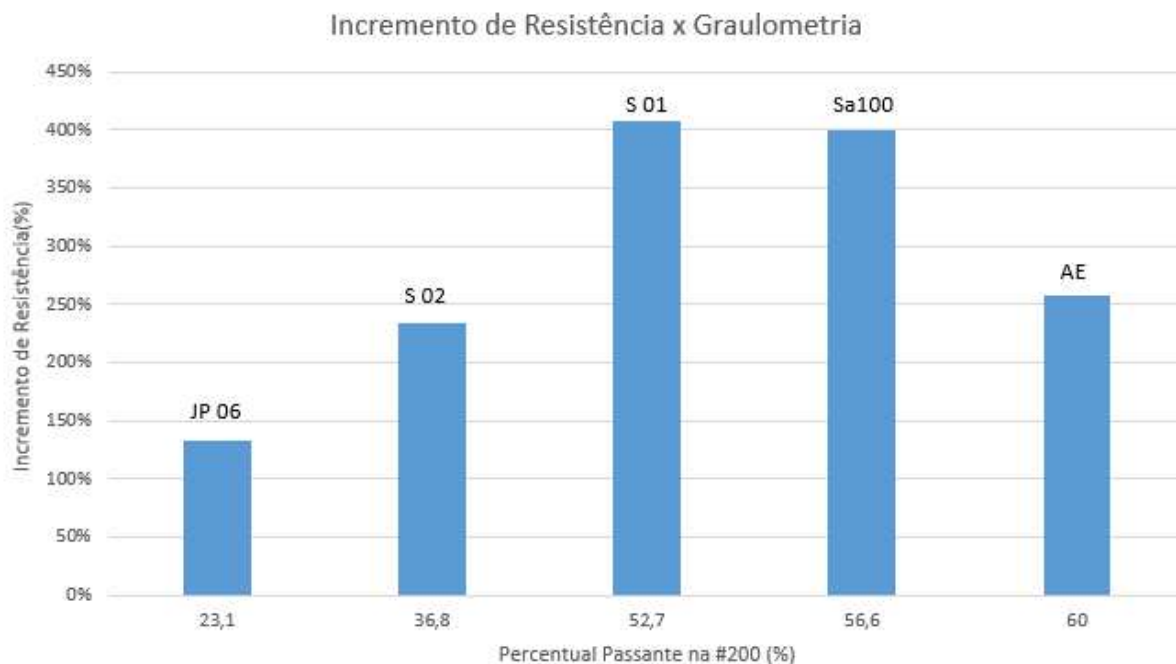
Solo			Solo Estabilizado (20% KR)		Incremento de Resistência (%)
Identificação	Classificação	ISC (%)	Identificação	ISC (%)	
<b>Sa100</b>	Argila - A-7-5	11,0	Sa80+KR20	55,0	400%
<b>Sb100</b>	Argila - A-7-5	23,0	Sb80+KR20	50,0	117%
<b>Sc100</b>	Areia, Areia Argilosa ou Areia Siltosa - A-2-6	30,0	Sc80+KR20	41,0	37%

Fonte: Adaptado de Bridi (2020).

Com base nos resultados obtidos pelos demais autores foi possível a elaboração de um gráfico para verificar o comportamento das misturas já ensaiadas em relação ao teor de finos do solo. O Figura 16 demonstra que o comportamento do incremento de resistência de solos melhorados com coproduto tipo KR apresenta uma variação em relação a granulometria. É possível observar no gráfico que os ganhos de resistência variaram de acordo com a granulometria, apresentando incrementos superiores a 200% para os solos com percentual de finos (passante na peneira #200) entre 36,8% e 60%.

Verifica-se que os maiores ganhos de resistência estão localizados entre os percentuais de finos entre de 35% e 60% de finos (passante na peneira #200).

**Figura 16 – Comportamento do incremento de resistência em função da granulometria do solo.**



Fonte: O Autor, 2024.

Desta forma, objetivando a avaliação o comportamento de diferentes tipos de solos, foram selecionados solos três tipo de solos naturais, ainda não estudados com o CP-KR. A seleção dos solos baseou-se na variação do percentual de finos, objetivando obter mais informações acerca do comportamento dos solos estabilizados com CP-KR na faixa granulométrica onde são obtidos os maiores incrementos de resistência, ou seja, entre 35% e 60% de finos, aproximadamente.

## 4.2 MÉTODOS

### 4.2.1 Delineamento Experimental

Com base nos critérios indicados na seção anterior foram selecionados três tipos de solos, denominados S1, S2 e S3 e misturados ao agente estabilizador KR, conforme proporções indicadas na Tabela 7.

**Tabela 7 – Materiais Selecionados**  
**MATERIAIS**

	AMOSTRA	SOLO	CP-KR (FATOR CONSTANTE)	TEOR DE FINOS (VARIÁVEL CONTROLÁVEL)
<b>SOLOS NATURAIS</b>	S1	100%	-	36,0%
	S2	100%	-	48,8%
	S3	100%	-	54,7%
<b>MISTURAS</b>	S1KR20	80%	20%	35,0%
	S2KR20	80%	20%	39,3%
	S3KR20	80%	20%	47,3%

Fonte: O Autor, 2024.

A denominação utilizada para cada mistura produzida está referenciada ao tipo de solo base das misturas e ao teor de CP-KR adicionado, sendo: S1KR20 - mistura composta por 80% do solo S1 e 20% de KR; S2KR20 - mistura composta por 80% do solo S2 e 20% de KR; e S3KR20 - mistura composta por 80% do solo S3 e 20% de KR.

Foram realizados os ensaios de caracterização física, mecânica e mecanística no solo natural e nas misturas produzidas em laboratório, conforme indicado nas Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 8 – Ensaio de caracterização física

ENSAIO	REFERENCIAL NORMATIVO	SOLOS/MISTURAS ESTUDADOS
Granulometria por Peneiramento e Sedimentação	NBR 7181/16, ABNT (2016)	
Limite de Liquidez Limite de Plasticidade Índice de Plasticidade	NBR 6459/16, ABNT (2016) NBR 7180/16, ABNT (2016) NBR 7183/82, ABNT (1982)	S1; S2; S3; S1KR20; S2KR20; S3KR20
Equivalente de Areia	Me 054/97	
Massa Específica Real dos Grãos	NBR 13600/96, ABNT (1996)	
Classificação AASHTO/TRB	-	

Fonte: O Autor, 2024.

Tabela 9 – Ensaio de caracterização mecânica

ENSAIO	REFERENCIAL NORMATIVO	SOLOS/MISTURAS ESTUDADOS
Curva de Compactação Umidade Ótima Massa Específica Aparente Seca Máxima	NBR 7182/16, NBR (2016)	
Índice de Suporte Califórnia (ISC)	NBR 9895/16, ABNT (2016)	S1; S2; S3; S1KR20; S2KR20; S3KR20
Expansão	NBR 9895/16, ABNT (2016)	

Fonte: O Autor, 2024.

Tabela 10 – Ensaio de caracterização mecânica

ENSAIO	REFERENCIAL NORMATIVO	SOLOS/MISTURAS ESTUDADOS
Módulo de Resiliência MR	DNIT 134/2018	S1; S2; S3; S1KR20; S2KR20; S3KR20

Fonte: O Autor, 2024.

## 4.2.2 Caracterização Físicas dos Materiais

### 4.2.2.1 Granulometria

Os ensaios de granulometria foram realizados em conformidade com a NBR 7181/16 da ABNT (2016c). O procedimento para determinação da granulometria do solo é realizado por peneiramento e sedimentação. Os dois procedimentos se mostram necessários uma vez que somente com a sedimentação é possível determinar a granulometria de partículas com dimensões inferiores a 0,075 milímetros, onde são encontradas as parcelas referentes as argilas e sites contidos na amostra. Na Figura 17 verifica-se visualmente os solos ensaiados e a diferença granulométrica entre eles.

**Figura 17 – Solos e CP-KR selecionados para programa experimental.**



Fonte: O Autor, 2024.

### 4.2.2.2 Massa Específica Real dos Grãos

Os ensaios de Massa Específica Real dos Grãos foram realizados conforme Norma específica NBR 6508 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019), que estabelece procedimentos para realização do ensaio. Com um total de aproximadamente 250 g de material é possível a realização de procedimento e

cálculos por meio de equações definidas na norma para determinação da massa específica real dos grãos do solo ou mistura ensaiada.

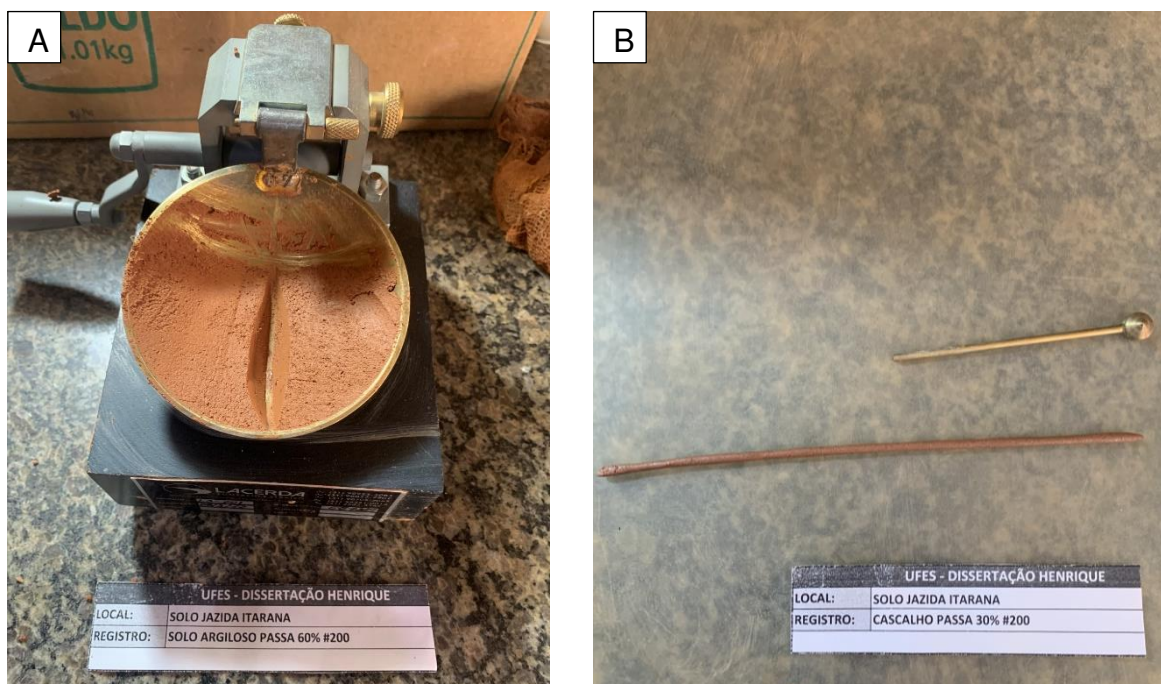
#### 4.2.2.3 Limite de Plasticidade

A determinação do Limite de Plasticidade (LP) do solo foi realizada por meio dos procedimentos e formulação previstas na NBR 7180 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016b). A amostra de solo, contendo apenas a fração que passa na peneira nº 40, é moldada e manipulada a fragmentação da amostra, conforme ilustrado na Figura 18B. Uma quantidade 100 g de solo é suficiente para realização do ensaio.

#### 4.2.2.4 Limite de Liquidez

O ensaio para determinação do Limite de Liquidez (LL) foi realizado conforme a norma NBR 6459 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016a). A norma estabelece a utilização do aparelho de Casagrande (Figura 18A), onde é possível a aplicação de golpes para verificação do comportamento dos solos para diferentes teores de umidade. O resultado é obtido a partir do gráfico gerado com as informações e determinado na projeção correspondente a 25 golpes na reta ajustada.

**Figura 18 – Ensaio de limite de liquidez e limite de plasticidade.**



Fonte: O Autor, 2024.

### 4.2.3 Caracterização Mecânica dos Materiais

#### 4.2.3.1 Curva de Compactação

O ensaio para determinação da curva de compactação foi realizado conforme a norma NBR 7182 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020), sem reuso de material, sobre amostras preparadas com secagem prévia até a umidade higroscópica. O ensaio é realizado por meio da aplicação de golpes, simulando a compactação que ocorre em campo. Os níveis de energia de compactação são definidos pela norma que podem ser o Proctor normal, Proctor intermediário e Proctor modificado. Neste programa experimental foi utilizado o Proctor intermediário para realização dos ensaios de compactação, energia esta compatível com uma camada de sub-base.

A partir dos dados obtidos por cinco corpos de prova é possível a determinação da curva de compactação, plotando no eixo das abscissas a umidade e no eixo das ordenadas o peso específico seco do material.

A norma estabelece e padroniza os equipamentos, procedimentos e cálculos que devem ser realizados para obtenção da curva de compactação.

#### 4.2.3.2 Índice de Suporte Califórnia

Para determinação do Índice de Suporte Califórnia será realizado o ensaio conforme determina a norma NBR 9895 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017). A partir do ensaio de compactação o material é imerso em água por no mínimo 4 dias.

Os dados coletados são tratados pelas equações definidas na norma sendo possível a obtenção do valor do ISC, que é expresso em porcentagem (%). O ensaio sendo realizado pode ser verificado na Figura 19A e B.

**Figura 19 - Ensaio de Compactação (A) e ISC (B)**



Fonte: O Autor, 2024.

#### 4.2.4 Caracterização Mecânica dos Materiais

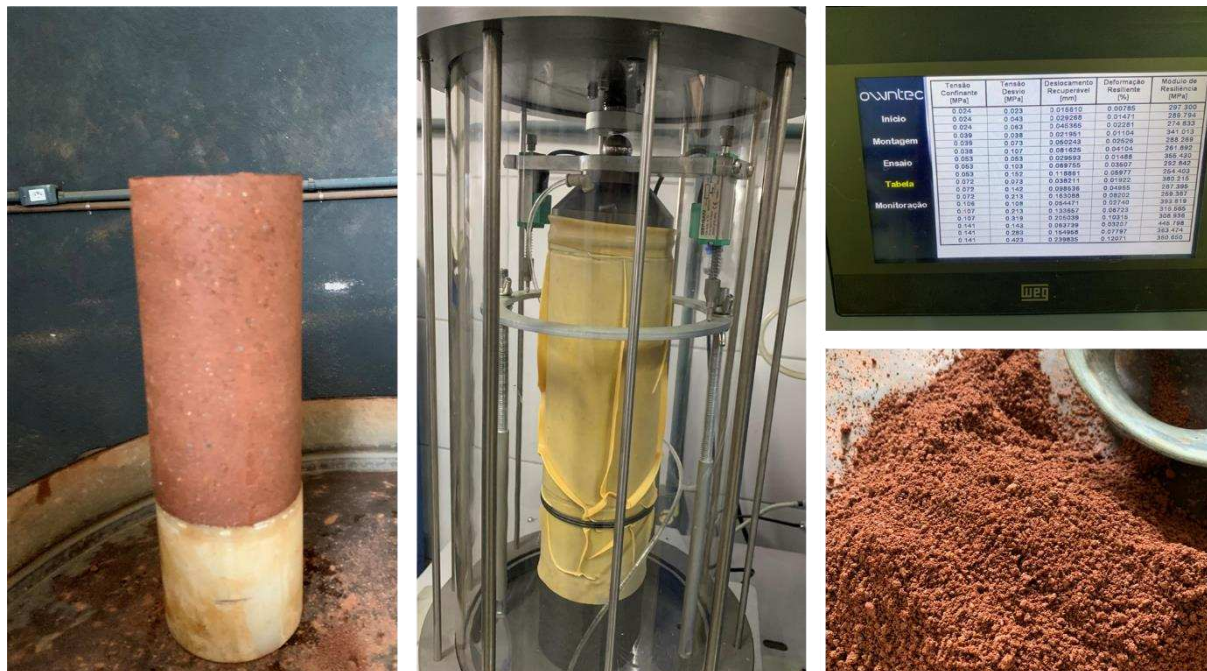
##### 4.2.4.1 Módulo de Resiliência

A determinação do Módulo de Resiliência será realizada de acordo com o Método de Ensaio DNIT 134 (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018).

O ensaio determina o comportamento resiliente, ou seja, a resposta elástica da aplicação de uma carga em pulsos de curta duração, para solos e materiais não

estabilizados quimicamente. Na Figura 20 verifica-se as imagens do ensaio sendo realizado.

**Figura 20 - Ensaio de Módulo de Resiliência sendo realizado**



Fonte: O Autor, 2024.

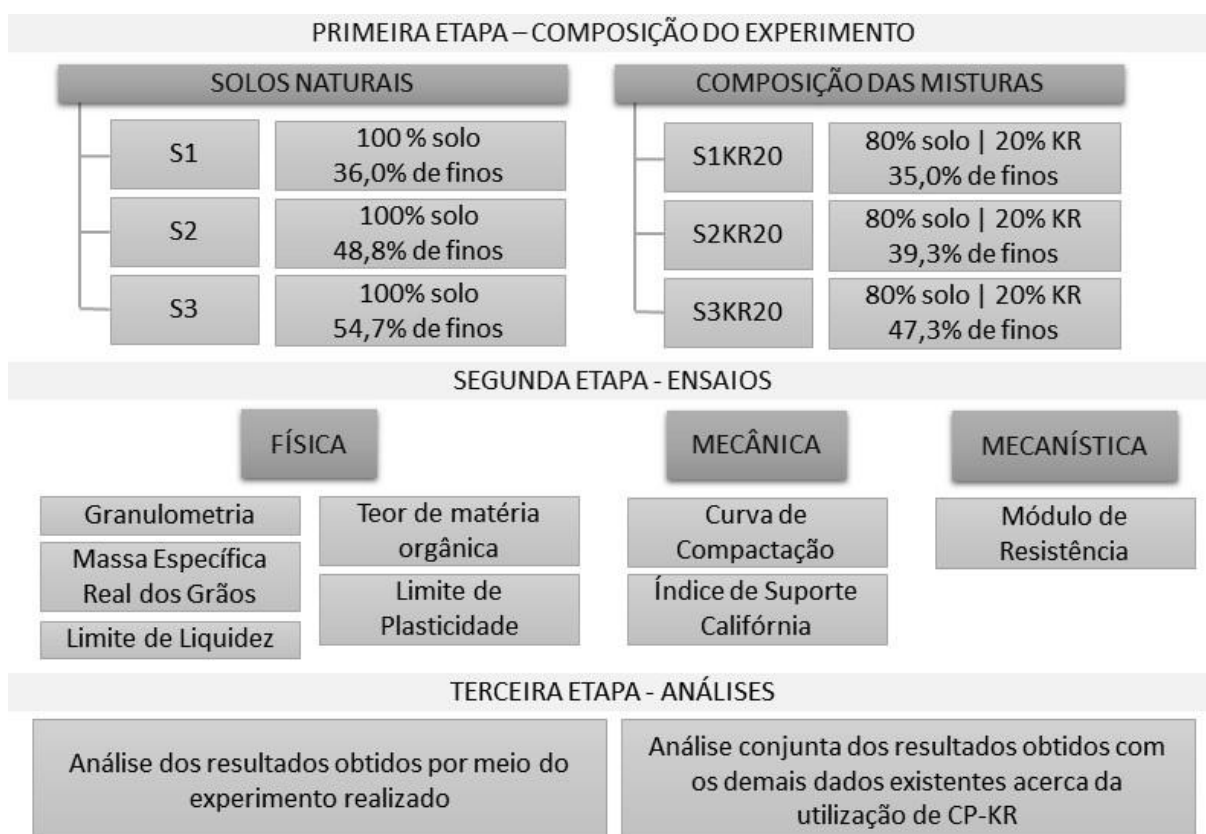
#### 4.2.5 Análise Conjunta de dados

Em função da existência de poucos estudos relacionados a utilização do CP-KR em pavimentos, a última etapa deste trabalho se dedica a análise conjunta dos resultados obtidos nos ensaios realizados pelos autores.

Os resultados de granulometria, índices físicos, classificações AASHTO e SUCS e ISC dos autores que já pesquisam essa temática foram relacionados com os dados obtido no programa experimental. Assim, os resultados de Bridi (2020), Pires et al. (2019), Oliveira et al. (2021) e Mendoza (2023) integram os resultados e análises do presente estudo.

O quadro resumo do programa experimental pode ser visualidade na Figura 21.

**Figura 21 - Quadro resumo de programa experimental**



Fonte: O Autor, 2024.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

#### 5.1.1 Granulometria por peneiramento e sedimentação

Os resultados de granulometria por peneiramento e sedimentação dos solos naturais ensaiados são apresentados na Tabela 11, resumidos por faixas granulométricas mais usuais na engenharia geotécnica.

**Tabela 11 – Distribuição granulométrica dos solos e amostras.**

SOLO		GRANULOMETRIA (% fração passante acumulada)			
DESCRIÇÃO	DENOMINAÇÃO	4,800 mm (Nº 4)	2,000 mm (Nº 10)	0,425 mm (Nº 40)	0,075 mm (Nº 200)
<b>AREIA ARGILOSA</b>	S1	94,5	78	54,3	36,0
<b>ARGILA ARENOSA VERMELHA</b>	S2	99,5	90,8	66,7	48,4
<b>ARGILA AMARELA</b>	S3	99,8	89,8	68,9	54,7
<b>COPRODUTO SIDERÚRGICO</b>	KR	82,5	69,3	38,4	17,6
<b>MISTURA S1+KR</b>	S1KR20	86,2	72,3	51,8	35,0
<b>MISTURA S2+KR</b>	S2KR20	97,6	86,4	58,9	39,3
<b>MISTURA S3+KR</b>	S3KR20	97,8	87,2	64,8	47,3

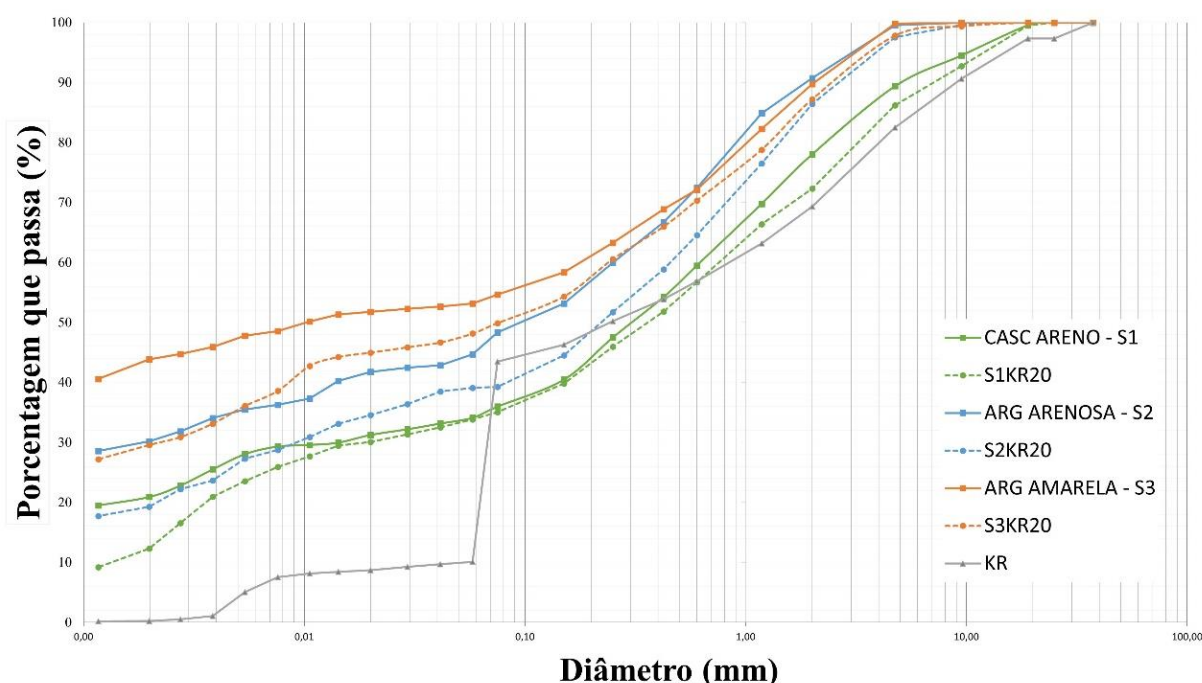
Fonte: O Autor, 2024.

O Manual de Pavimentação (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, 2006), classifica os solos que passam na peneira 0,075 mm (Nº 200) como siltes e argilas, e como areia fina os solos retidos entre a peneira 0,420 mm (Nº 40) e 0,075 mm (Nº 200). Na Tabela 11 verifica-se que os solos selecionados para os ensaios demonstraram a variação esperada na quantidade de finos (siltes+argilas), sendo o

Solo S1 com 36,0, o solo S2 com 48,4% e o solo S3 com 54,7%. A quantidade de areia fina identificada foi de 18,3% para os solos S1 e S2, e de 14,2% para o solo S3.

O Gráfico 1 demonstra a variação granulométrica dos solos estudados. Verifica-se que a inclusão do CP-KR modificou os solos estudados, alterando a granulometria das amostras. Devido a incorporação do coproduto, que apresenta menor quantidade de material fino que os solos escolhidos, verifica-se um deslocamento das curvas granulométricas, deixando as misturas com menor percentual de material fino.

**Gráfico 1 – Porcentagem passante e diâmetro dos materiais avaliados.**



Fonte: O Autor, 2024.

Os solos selecionados apresentaram granulometrias distintas, tanto quando avaliados “*in natura*”, quanto quando misturados com o CP-KR. A variação na granulometria da peneira #200 e na peneira #40 foram significativas, possibilitando a comparação dos resultados mecânicos e mecanísticos em função da granulometria solo. Oliveira et al. (2021), Bridi (2020) e Pires et al. (2019) também pesquisaram a mistura de solos com diferentes granulometrias modificados com coproduto tipo KR. Na Tabela 12 verifica-se o resumo da granulometria dos diferentes solos estudados pelos autores.

Tabela 12 – Distribuição granulométrica dos solos melhorados com CP-KR.

Material	GRANULOMETRIA (% fração passante acumulada)			
	4,800 mm (N <sup>o</sup> 4)	2,000 mm (N <sup>o</sup> 10)	0,420 mm (N <sup>o</sup> 40)	0,075mm (N <sup>o</sup> 200)
Sa100 (Pires <i>et al.</i> , 2019)	99,9	95,6	71,3	56,6
Solo AE (Pires <i>et al.</i> , 2019)	100	99,7	80,6	60,4
Solo JP6 (Pires <i>et al.</i> , 2019)	81,2	78,7	46,5	23,5
Solo S01 (Oliveira, 2018)	100	100	70,5	52,7
Solo S02 (Oliveira, 2018)	73,3	69,4	49,8	36,8

Fonte: O Autor, 2024.

A análise granulométrica dos solos já estudados pelos autores citados (Tabela 12) em conjunto com os solos do programa experimental (Tabela 11) demonstram variações expressivas no percentual de finos passante na peneira #200 (variando de 23,5% a 60,4%), sendo em parâmetro importante a ser utilizado na análise do comportamento mecânico dos solos quando combinados com CP-KR.

Outra variável a ser observada em conjunto com os resultados mecânicos e mecanísticos é a quantidade de finos (#200) presente no CP-KR. Na Tabela 13 verifica-se a quantidade de material fino (#200) presente no CP-KR utilizado neste programa experimental, assim como nos demais autores citados.

Tabela 13 – Granulometria do CP-KR.

Material	GRANULOMETRIA (% fração passante acumulada)			
	4,800 mm (N <sup>o</sup> 4)	2,000 mm (N <sup>o</sup> 10)	0,420 mm (N <sup>o</sup> 40)	0,075mm (N <sup>o</sup> 200)
Coproduto Siderúrgico - KR	82,5	69,3	38,4	17,6

<b>KR</b> (Bridi, 2020)	57,6	44,9	24,2	11,0
<b>KR (Pires <i>et al.</i>, 2019)</b>	74,1	53,5	22,5	5,9
<b>KR</b> (Oliveira; Pires; Teixeira, 2021)	74,1	53,5	22,5	5,9
<b>KR</b> (Mendoza, Luís Eduardo Causado, 2023)	100,0	100,0	99,4	96,7

Fonte: O Autor, 2024.

Na Tabela 13 verifica-se a variação granulométrica presente no coproduto utilizado pelos diversos pesquisadores. Segundo (Bridi, 2020), o potencial estabilizador e de ganho de resistência mecânica se dá por mecanismos de troca catiônicas e de reações de hidratação, nas faixas mais finas do solo. A partir da variação de finos também no agente estabilizador, se mostra necessária avaliar a existência de relação entre estas variáveis e ganhos mecânicos do solo estabilizado.

Para tanto, é apresentado na Tabela 14 o percentual de CP-KR passante na peneira #40 e na #200 considerando a diferença granulométrica apresentada pelos diversos pesquisadores e neste programa experimental. O percentual de CP-KR passante na peneira #200 que compõem os solos estabilizados variou entre 1,18% e 4,84%, sendo possível avaliar, em conjunto com os resultados mecânicos, o comportamento das misturas também em relação a quantidade de finos no agente estabilizador.

**Tabela 14 – Granulometria da fração passante dos materiais analisados.**

<b>Material</b>		<b>GRANULOMETRIA (% fração passante acumulada)</b>	
<b>Descrição</b>	<b>Denominação</b>	<b>% KR #40</b>	<b>% KR #200</b>
<b>MISTURA S1+KR</b>	S1KR20	7,68	3,52
<b>MISTURA S2+KR</b>	S2KR20	7,68	3,52

<b>MISTURA S3+KR</b>	S3KR20	7,68	3,52
<b>Sa100 (Bridi,2020)</b>	Sa100	4,84	2,20
<b>Solo AE (Furieri)</b>	AE	4,50	1,18
<b>Solo JP6 (Furieri)</b>	JP06	4,50	1,18
<b>Solo S01 (Oliveira)</b>	SO1	4,50	1,18
<b>Solo S02 (Oliveira)</b>	SO2	4,50	1,18
<b>Solo (Mendoza)</b>	SKRSP3	3,00	2,90
<b>Solo (Mendoza)</b>	SKRSP5	5,00	4,84

Fonte: O Autor, 2024.

### 5.1.2 Massa Específica Real dos Grãos

A massa específica real dos grãos no material estudado é apresentada na Tabela 15. Os resultados apresentados demonstram que o valor obtido para o CP-KR foi superior aos dos solos. A diferença pode ser atribuída a presença de ferro em sua composição química. Os resultados vão de encontro aos dados de Bridi (2020) e Pires et al. (2019), que obtiveram valores de 3,18 g/cm<sup>3</sup> e 3,31 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

**Tabela 15 - Massa Específica Real do Grãos**

SOLO		Massa Específica Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> )
Descrição	Denominação	
AREIA ARGILOSA	S1	2,64
ARGILA ARENOSA VERMELHA	S2	2,67
ARGILA AMARELA	S3	2,69

<b>COPRODUTO SIDERÚRGICO</b>	KR	3,24
----------------------------------	----	------

Fonte: O Autor, 2024.

### 5.1.3 Limites de Consistência

Foram realizados os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade para os solos selecionados. Os resultados dos limites de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) determinados no programa experimental estão apresentados na Tabela 16.

**Tabela 16 – Resultados dos ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade**

SOLO		LIMITES DE CONSISTÊNCIA		
Descrição	Denominação	LL (%)	LP (%)	IP (%)
<b>AREIA ARGILOSA</b>	S1	40,9	24,1	16,8
<b>ARGILA ARENOSA VERMELHA</b>	S2	40,9	23,7	17,2
<b>ARGILA AMARELA</b>	S3	45,0	24,8	20,3
<b>COPRODUTO SIDERÚRGICO - KR</b>	KR	NL	NP	-
<b>MISTURA S1+KR</b>	S1KR20	NL	NP	-
<b>MISTURA S2+KR</b>	S2KR20	40,4	27,9	12,5
<b>MISTURA S3+KR</b>	S3KR20	41,2	27,4	13,8

Legenda: NL – Não Líquido. NP – Não Plástico. Fonte: O Autor, 2024.

Os resultados obtidos demonstram que os solos naturais apresentam elevados limites de liquidez e plasticidade, variando de 40,9% a 45,0% e de 23,7% a 24,8%, respectivamente. Percebe-se que a inclusão do CP- KR no solo S1 resultou em uma alteração das características físicas da mistura, tornando-os não plásticos. Os demais

solos apresentaram comportamento semelhante, com uma diminuição do índice de plasticidade. A diferença no comportamento físico (plasticidade) entre os solos pode ser atribuída a diferença na distribuição granulométrica do material passante na peneira #40 no solo, já que a quantidade de CP-KR se manteve constante nas misturas. No solo S1, que obteve maior redução dos índices, a fração de material passante foi de 54,3%, já nos solos S2 e S3 esse percentual corresponde a 66,7% e 68,9%, respectivamente.

Resultados divergentes foram encontrados por (Bridi, 2020), que não observou redução dos LL, LP e IP quando incorporado CP-KR. Neste caso, outros fatores experimentais podem ter afetado os resultados apresentados, uma vez que o solo estabilizado apresentou índice de plasticidade maior que o solo natural.

Por outro lado, Mendoza (2023) identificou em seu estudo com pó de escória KR que a diminuição dos índices está relacionada a relação de solos e de coproduto em diâmetro inferior a 0,425mm (passante na #40). Os resultados demonstram a transformação do solo e redução dos índices a zero, tornando o material não plástico, em um solo com granulometria semelhante ao solo S2. A variação nos resultados pode ser atribuída a diferença de percentual de coproduto, o pó de escória KR possui 99% de material com diâmetro inferior a 0,425 mm.

Na Tabela 17 é possível avaliar o comportamento dos solos estabilizados em função da granulometria de coproduto passante na peneira #200 e na #40, e em relação a classificação dos solos.

**Tabela 17 – Variação do IP dos solos estabilizados com CP-KR**

Material		VARIACÃO IP	GRANULOMETRIA KR		CLASSIFICAÇÃO	
			(% fração passante acumulada)		AASHTO	SUCS
Descrição	Denominação		% KR #40	% KR #200		
<b>MISTURA S1+KR</b>	S1KR20	16,8	7,68	3,52	A7 - 6	CL

<b>Solo (Mendoza)</b>	SKRSP3	15,5	3,00	2,90	A-6	CL
<b>Solo (Mendoza)</b>	SKRSP5	15,5	5,00	4,84	A-6	CL
<b>Solo AE (Furieri)</b>	AE	12,1	4,50	1,18	A-7-6	CL
<b>MISTURA S3+KR</b>	S3KR20	6,5	7,68	3,52	A7 - 6	SC
<b>Solo S01 (Oliveira)</b>	S01	6,1	4,50	1,18	A-7-6	CH
<b>Solo S02 (Oliveira)</b>	S02	5,4	4,50	1,18	A-2-7	SC
<b>MISTURA S2+KR</b>	S2KR20	4,7	7,68	3,52	A7 - 6	SC
<b>Solo JP6 (Furieri)</b>	JP06	3,8	4,50	1,18	A-2-6	SC
<b>Sa100 (Bridi,2020)</b>	Sa100	-3	4,84	2,20	A-7-5	ML

Fonte: O Autor, 2024.

Os resultados de plasticidade obtidos por Oliveira et al. 2021, Bridi (2020), Pires et al. (2019) e Mendoza (2023) podem ser avaliados conjuntamente na Tabela 17. Com exceção dos resultados obtidos por Bridi (2020), os demais autores apresentaram redução nos valores de IP para solos estabilizados com KR. Não foi possível verificar uma relação direta entre o percentual de KR na peneira #40 e a variação no índice de plasticidade dos solos estabilizados. Entretanto, os resultados sugerem que o potencial de estabilização do coproduto possa estar relacionado a quantidade de coproduto e ao tipo de solo estabilizado, isso porque, os resultados de plasticidade, quando analisados conjuntamente com a classificação SUCS, demonstram que as maiores reduções do IP foram alcançadas em solos argilosos, classificados como argilas de baixa plasticidade (CL).

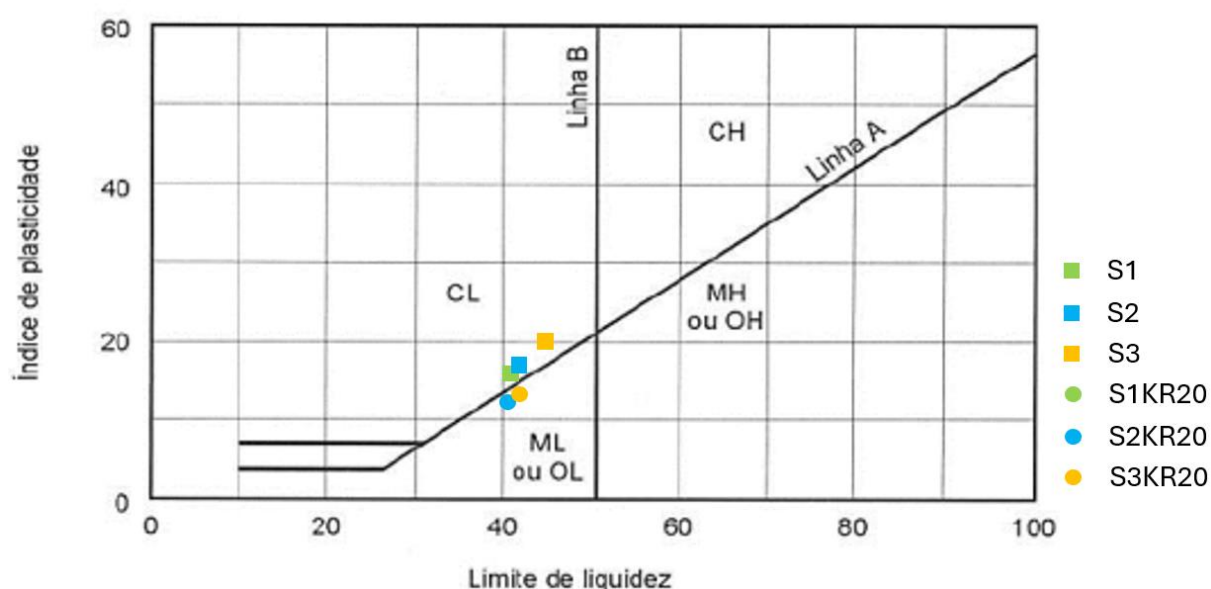
Os resultados encontrados sugerem que o potencial de utilização do CP-KR para alteração de índices físicos dos solos para pavimentação está relacionado ao tipo de solo estabilizado e a granulometria do agente estabilizador (KR).

### 5.1.4 Classificações

#### 5.1.4.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)

A classificação SUCS é amplamente utilizada na engenharia geotécnica auxiliando a tomada de decisões para utilização dos solos. O sistema baseia-se nas informações de granulometria, textura e características de plasticidade. Os resultados obtidos são apresentados no Gráfico 2 e Tabela 18.

Gráfico 2 – Carta de Casagrande



Fonte: O Autor, 2024.

Tabela 18 – Classificação SUCS.

SOLO		SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS - SUCS	
Descrição	Denominação	Classificação	Descrição
<b>AREIA ARGILOSA</b>	S1	SC	Areia argilosa
<b>ARGILA ARENOSA VERMELHA</b>	S2	SC	Areia argilosa

<b>ARGILA AMARELA</b>	S3	CL	Argila de Baixa Compressibilidade
<b>COPRODUTO SIDERÚRGICO - KR</b>	KR	SM	Areia Siltosa
<b>MISTURA S1+KR</b>	S1KR20	SM	Areia Siltosa
<b>MISTURA S2+KR</b>	S2KR20	SM	Areia Siltosa
<b>MISTURA S3+KR</b>	S3KR20	SM	Areia Siltosa

Fonte: O Autor, 2024.

Verifica-se nos resultados encontrados que a classificação dos solos foi alterada devido a incorporação do CP-KR, modificando de comportamento argiloso para siltoso. A transformação é verificada quando observada a Linha A da Carta De Casagrande (Gráfico 2). Os solos naturais estavam acima da linha A, apresentando características argilosas. Após a incorporação do coproduto, com a diminuição do índice de plasticidade, o comportamento passou a ser de solo Siltoso. Além disso, com a alteração granulométrica do Solo S3, que passou de 54,7% para 47,3% na peneira #200, a classificação passou de solo fino (argila) para solo granular (areia).

5.1.4.2 American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

Na Tabela 19 são apresentados os valores do índice de grupo e classificação dos solos naturais e solos modificados com CP-KR.

**Tabela 19 – Classificação AASHTO.**

<b>SOLO</b>		<b>AASHTO</b>	
<b>Descrição</b>	<b>Denominação</b>	<b>I.G.</b>	<b>Grupo</b>

<b>AREIA ARGILOSA</b>	S1	2	A7-6
<b>ARGILA ARENOSA VERMELHA</b>	S2	5	A7-6
<b>ARGILA AMARELA</b>	S3	11	A7-6
<b>COPRODUTO SIDERÚRGICO - KR</b>	KR	0	A1-b
<b>MISTURA S1+KR</b>	S1KR20	0	A4
<b>MISTURA S2+KR</b>	S2KR20	1	A6
<b>MISTURA S3+KR</b>	S3KR20	4	A7-6

Fonte: O Autor, 2024.

Os dados obtidos da classificação AASHTO e cálculo do índice de Grupo demonstram a alteração nas propriedades dos solos estabilizados com CP-KR. Os solos naturais foram classificados com A7-6, sendo que os solos S1 e S2 passaram para classificação A4 e A6, respectivamente. Já em relação ao índice de grupo, verificou-se que em todos os solos houve redução do valor, sendo a mais significativa a do solo S3 que variou de 11 para 4 pontos.

O Manual de Pavimentação (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, 2006), indica comportamento de resistência mecânica dos solos com base na classificação AASHTO/TRB. O ISC esperado para os solos estabilizados com CP-KR não apresentaram alterações significativas, considerando as definições do manual. Os resultados obtidos serão discutidos em relação a expectativa de resistência serão discutidos na seção 5.2.2 - Índice de Suporte Califórnia (ISC).

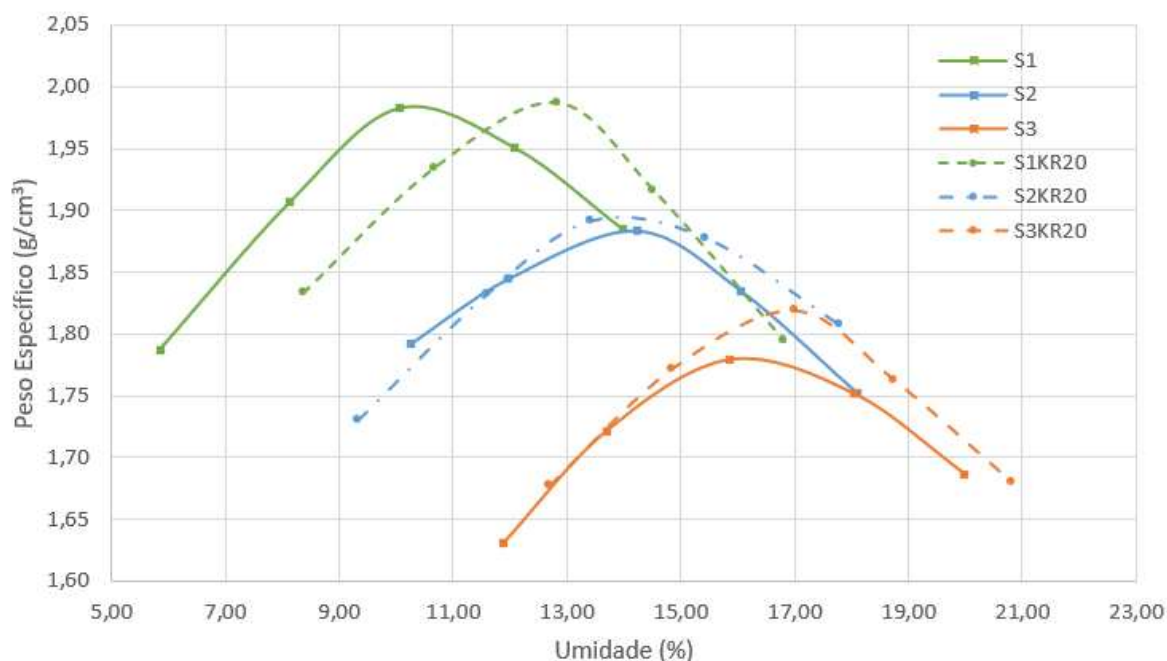
## 5.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Para caracterização mecânica dos solos e misturas com CP-KR foram realizados ensaios de compactação, expansão e CBR. Os resultados obtidos são apresentados nos subitens a seguir.

### 5.2.1 Curva de Compactação

Os resultados ensaios de compactação são apresentados no Gráfico 3 e na Tabela 20. A curva de compactação foi determinada na energia Proctor Intermediária, sendo realizada nas amostras de solos naturais (S1, S2 e S3) e nos solos melhorados com coproduto (S1KR20, S2KR20 e S3KR20).

**Gráfico 3 – Curvas de Compactação.**



Fonte: O Autor, 2024.

**Tabela 20 – Ensaio de compactação.**

SOLO	COMPACTAÇÃO
------	-------------

<b>Descrição</b>	<b>Denominação</b>	<b>Peso Esp. (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Umidade (%)</b>
<b>AREIA ARGILOSA</b>	S1	1,986	10,50
<b>ARGILA ARENOSA VERMELHA</b>	S2	1,885	13,88
<b>ARGILA AMARELA</b>	S3	1,780	16,23
<b>MISTURA S1+KR</b>	S1KR20	1,989	12,47
<b>MISTURA S2+KR</b>	S2KR20	1,896	14,09
<b>MISTURA S3+KR</b>	S3KR20	1,820	16,73

Fonte: O Autor, 2024.

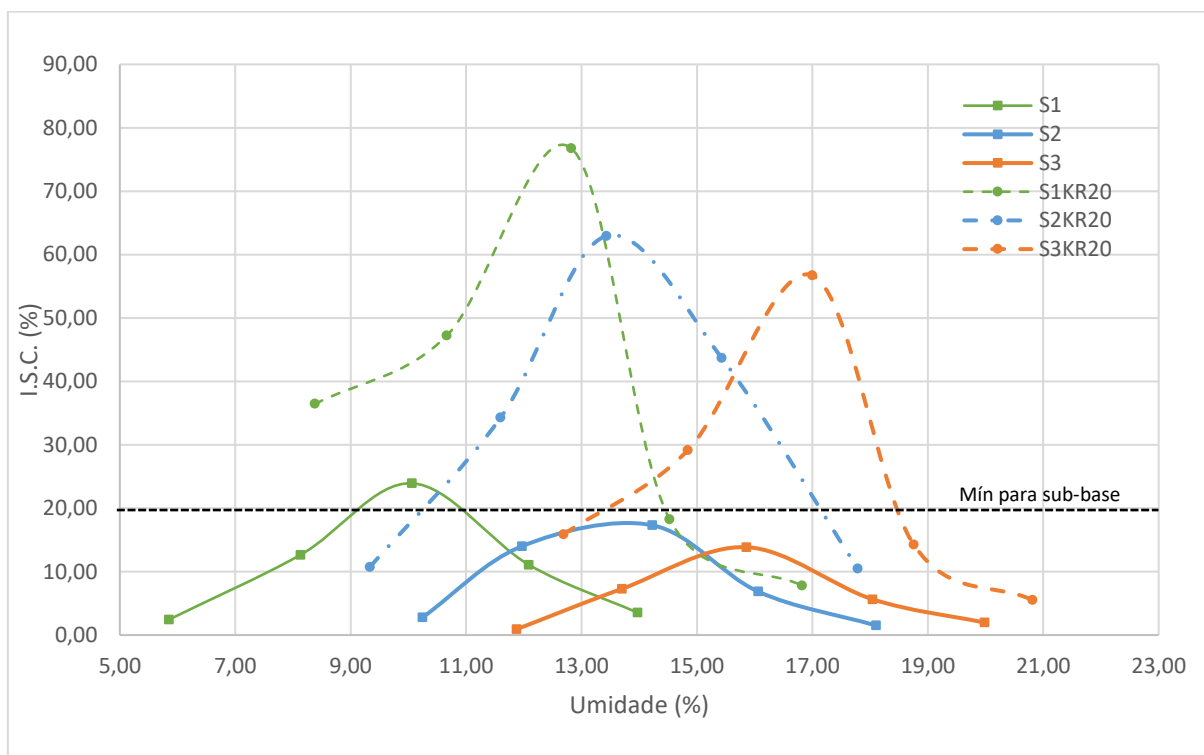
Ao se analisar os resultados das curvas de compactação, verifica-se uma variação na massa específica aparente seca. Os resultados foram mais significativos para o Solo S3, que possui maior percentual de finos. Já o solo S1 apresentou menor alteração que os demais. A variação está relacionada a modificação da distribuição granulométrica das misturas em relação ao solo natural, e ainda, devido a massa específica real dos grãos do coproduto ser maior que a do solo.

Verifica-se também um aumento na umidade ótima das misturas em relação ao solo natural. O aumento de umidade pode ser atribuído a inclusão do CP-KR, que tem a alta capacidade de absorção de água já reconhecidas (Kuo; Hou, 2014).

### **5.2.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC)**

Os resultados obtidos para determinação da curva de Índice de Suporte Califórnia (ISC) estão apresentados no Gráfico 4. Em atendimento a norma, os corpos de prova foram moldados e mantidos em imersão em água por 4 dias.

Gráfico 4 – Índice de Suporte Califórnia.



Fonte: O Autor, 2024.

Conforme apresentado graficamente, a incorporação do CP-KR nos solos selecionados resultou em aumentos significativas nos valores de ISC, demonstrando o potencial de estabilização do coproduto tipo KR.

Os resultados para os solos estabilizados com coproduto apresentaram valores de ISC acima do esperado, de acordo com o Manual de Pavimentação (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, 2006). Na Tabela 21 é possível verificar os valores de obtidos nos ensaios e os valores esperados, com base na classificação AASHTO/TRB. Os valores de ISC obtidos foram consideravelmente maiores que os resultados prováveis estabelecidos pelo DNIT. A diferença pode ser atribuída a capacidade do CP-KR na estabilização de solos, que apresentou novos valores de resistência muito superiores daqueles esperados para solos com as mesmas características granulométricas. Oliveira et al (2021), relacionaram a capacidade de estabilização do CP-KR as reações químicas entre o solo e o agente estabilizador, gerando maior resistência e coesão a mistura.

No Gráfico 4 os resultados são comparados ao ISC mínimo requerido para a execução de Sub-base definidos na Especificação de Serviço 139 (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010). Anteriormente a mistura, somente o Solo S1 apresentou ISC superior ao estabelecido para execução de sub-base, ainda que muito próximo ao valor mínimo de referência. Após a incorporação do CP-KR, os valores de ISC obtidos para todos os solos foram significativamente maiores que o mínimo estabelecido pela referida Norma, indicando aptidão para utilização em sub-bases para este parâmetro.

**Tabela 21 – Expectativa de resistência mecânica e resultados obtidos (ISC).**

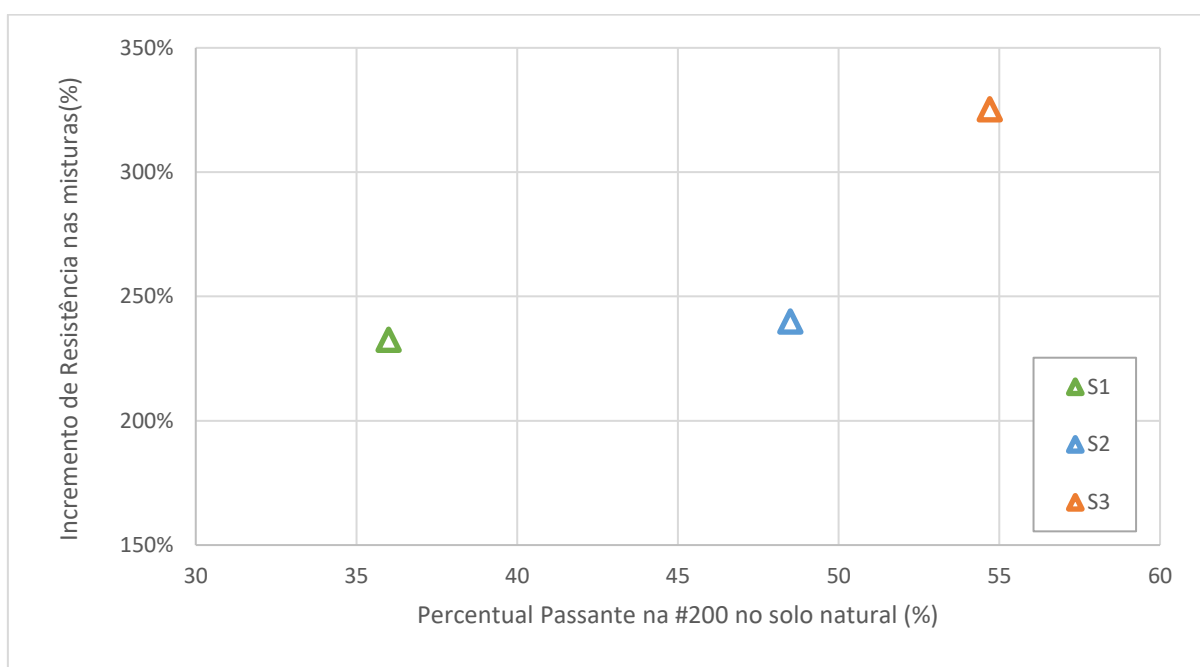
SOLO		AASHTO		ISC (%)	
Descrição	Denominação	I.G	Grupo	Provável (DNIT)	Resultado Obtido
<b>AREIA ARGILOSA</b>	S1	2	A7-6	Menos de 2 a 15	23,0
<b>ARGILA ARENOSA VERMELHA</b>	S2	5	A7-6	Menos de 2 a 15	17,8
<b>ARGILA AMARELA</b>	S3	11	A7-6	Menos de 2 a 15	13,4
<b>MISTURA S1+KR</b>	S1KR20	0	A4	4 a 25	76,5
<b>MISTURA S2+KR</b>	S2KR20	1	A6	Menos de 2 a 15	60,5
<b>MISTURA S3+KR</b>	S3KR20	4	A7-6	Menos de 2 a 15	57,0

Fonte: O Autor, 2024.

O comportamento dos solos estabilizados em relação ao ganho de resistência foi apresentado na Tabela 22. É possível observar na Tabela 22 que o incremento de resistência obtido pela incorporação do coproduto foi distinto em cada solo. O solo S1, quando estabilizado, teve um aumento no ISC de 23% para 76,50% gerando um incremento de 233%. O solo S2 apresentou um acréscimo de resistência de 17,80% para 60,50%, um incremento de 240%. Já o Solo S3 apresentou um incremento de

resistência de 325%, sendo o CBR inicial de 13,40% e o final de 57,0%. O comportamento da variação do incremento de resistência dos solos pode ser verificado também na Gráfico 5. Verifica-se que o incremento de resistência foi maior para o solo S3, que possui maior percentual de finos (54,7% de finos). Resultados apresentados na Tabela 21, evidencia que além do possível melhoramento pela alteração da granulometria, é muito provável a interferência na interação química entre partículas, provocada pela adição de coproduto KR.

**Gráfico 5 – Incremento de Resistência em relação ao percentual passante #200.**



Fonte: O Autor, 2024.

**Tabela 22 – Resultados dos ensaios de I.S.C.**

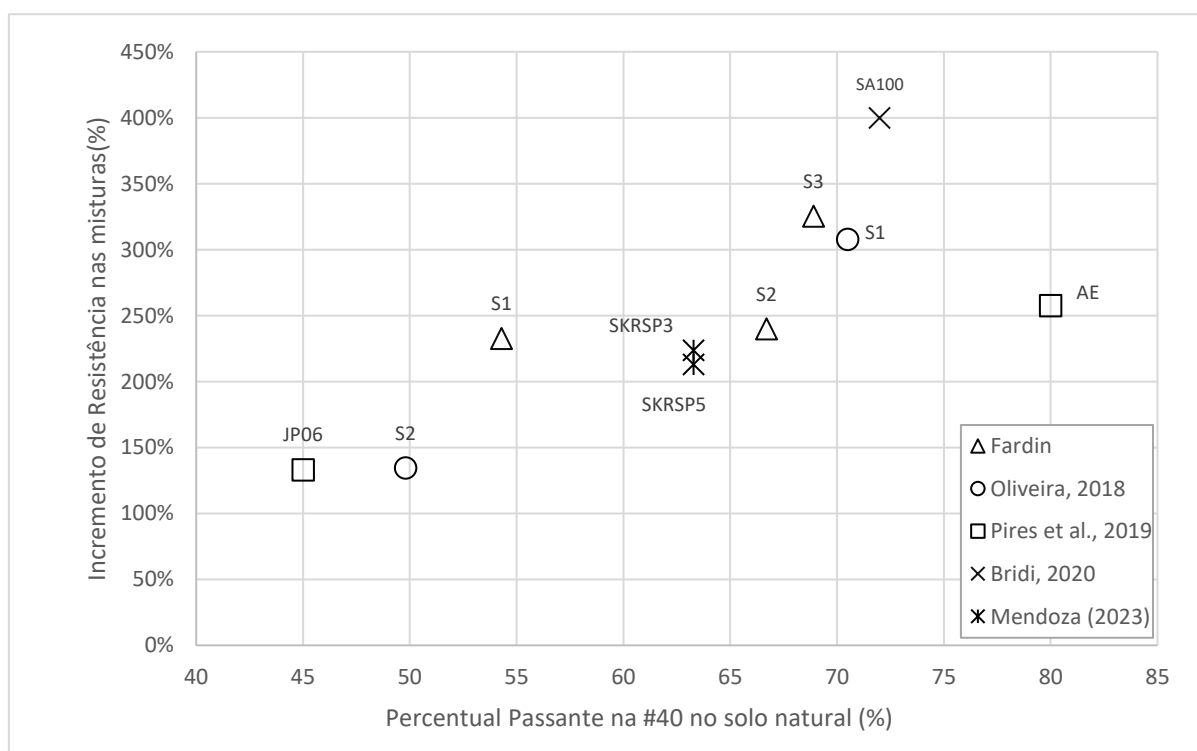
SOLO		COMPACTAÇÃO		
Descrição	Denominação	I.S.C (%)	Umidade (%)	Incremento de Resistência (%)
<b>AREIA ARGILOSA</b>	S1	23,00	10,50	-

<b>ARGILA ARENOSA VERMELHA</b>	S2	17,80	13,88	-
<b>ARGILA AMARELA</b>	S3	13,40	16,23	-
<b>MISTURA S1+KR</b>	S1KR20	76,50	12,47	233
<b>MISTURA S2+KR</b>	S2KR20	60,50	14,09	240
<b>MISTURA S3+KR</b>	S3KR20	57,00	16,73	325

Fonte: O Autor, 2024.

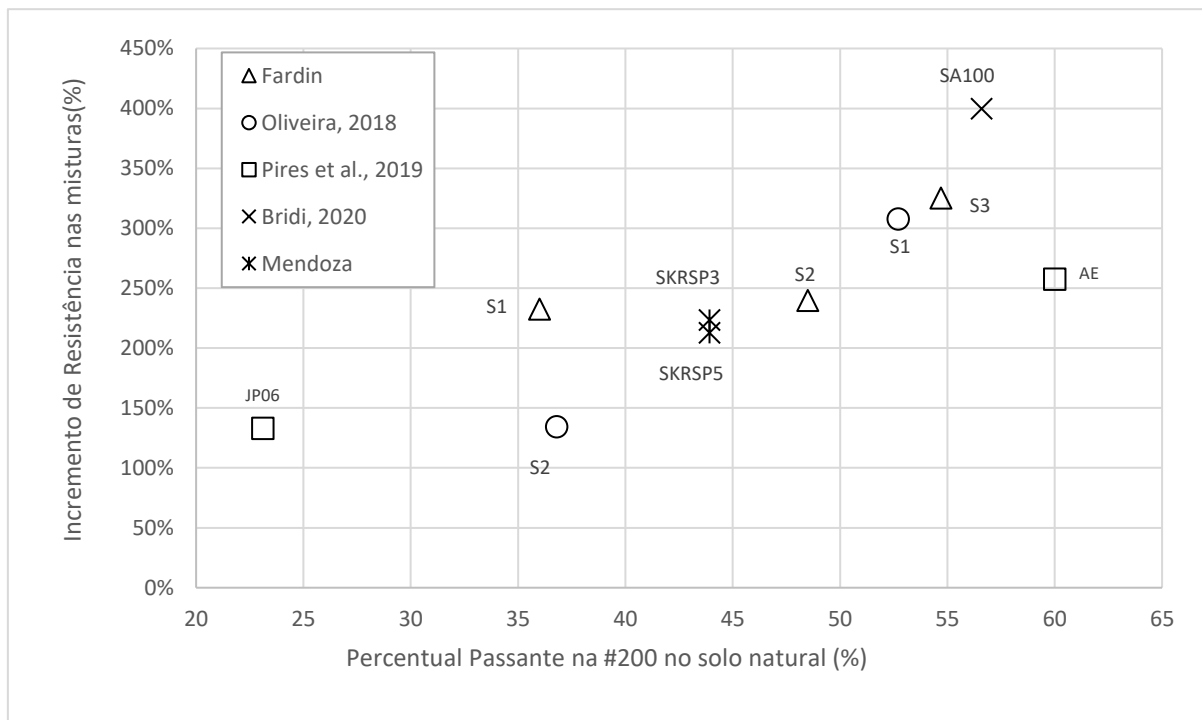
O incremento de resistência do coproduto tipo KR também foi estudado por Oliveira, (2018), Bridi (2020) e Pires et al. (2019). Os autores estudaram solos de diferentes granulometrias conforme demonstrado na Tabela 13. Com os dados obtidos na pesquisa foi possível analisar o efeito da granulometria do solo em função do incremento de resistência obtido com a utilização do CP-KR. Os Gráfico 6 e Gráfico 7 demonstram os resultados obtidos.

**Gráfico 6 – Incremento de Resistência x Granulometria Solo Natural (#40).**



Fonte: O Autor, 2024.

**Gráfico 7 – Incremento de Resistência x Granulometria Solo Natural (#200).**



Fonte: O Autor, 2024.

O Gráfico 7 apresenta o incremento de resistência em função da granulometria do solo passante na peneira #200, ou seja, a quantidade de finos presente no solo. Verifica-se que os maiores incrementos de resistência foram observados para os solos que tem percentual de finos (argila+silte) próximos de 55%. Já o Gráfico 6, que relaciona o ganho de resistência com a peneira #40, indica que os maiores incrementos estão próximos de 70% de material inferior a 0,420mm. O resultado encontrado corrobora com a conclusão de (Bridi, 2020) acerca do potencial de estabilização e de ganho de resistência mecânica dos solos estabilizados com KR, ocorrendo por mecanismos de troca catiônicas e de reações de hidratação, principalmente nas faixas mais finas do solo (Pires *et al.*, 2019).

Com os dados obtidos foi possível avaliar também o comportamento dos solos estabilizados com base na granulometria do agente estabilizador, o CP-KR. Na Tabela

14, apresentada no item 5.1.1, verifica-se que a variação na granulometria do coproduto utilizado por diferentes pesquisadores.

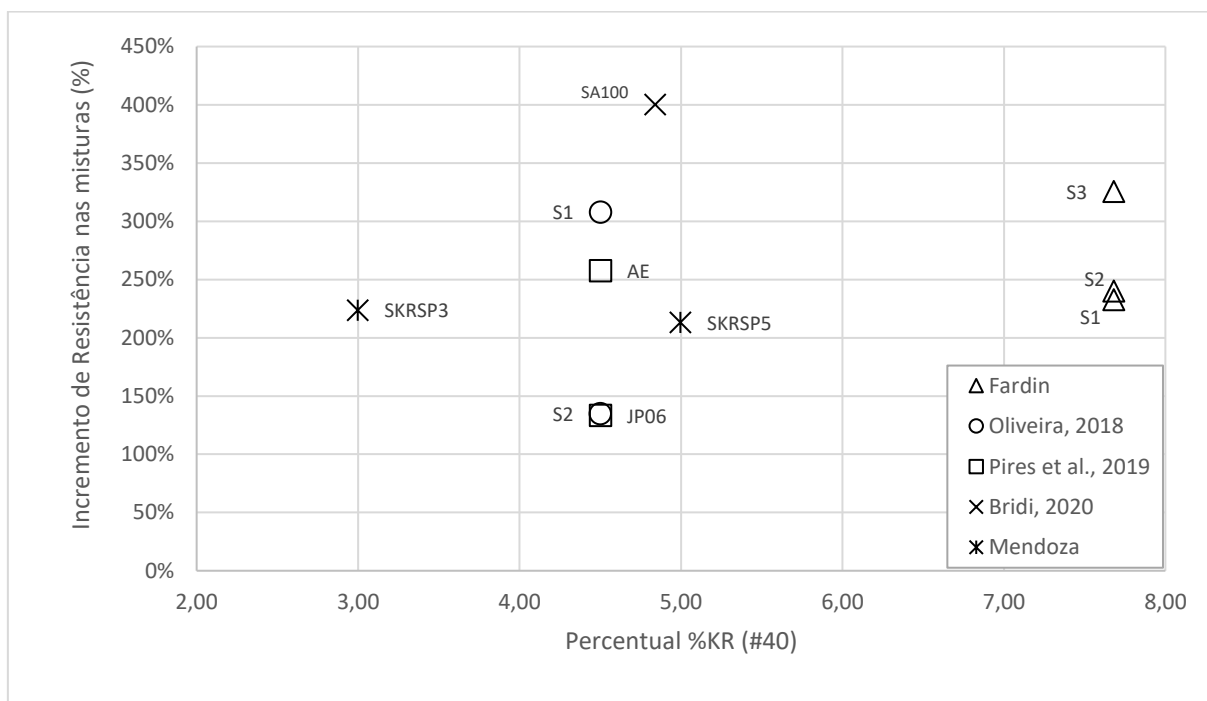
No Gráfico 8, verifica-se a relação do incremento de resistência com o percentual de CP-KR na #40 (inferior a 0,425mm) contido na mistura.

Na faixa granulométrica entre 4% e 5% de CP-KR (#40) estão posicionadas 6 das 10 misturas avaliadas. Pode-se constatar que mesmo mantendo o percentual de coproduto próximo, o comportamento das misturas variou. Essa variação está relacionada ao tipo de solo estabilizado já que os solos SA100 (Bridi, 2020), S2 (Oliveira, 2018), AE (Pires *et al.*, 2019) e SKRSP5 (Mendoza, 2023) são solos com elevada quantidade de finos (argila e silte). Já os solos S1 e JP06, que apresentam menor incremento de resistência, são areais argilosas.

Em relação as misturas SKRSP3 e SKRSP5 (Mendoza, Luis Eduardo Causado, 2023), que tratam do mesmo solo, estabilizados com percentuais de 3% e 5% de CP-KR, os resultados de incremento de resistência não apresentaram diferenças significativas. Fica demonstrado que, dentro dos percentuais estudados, a variação na quantidade de estabilizador não alterou os ganhos de resistência.

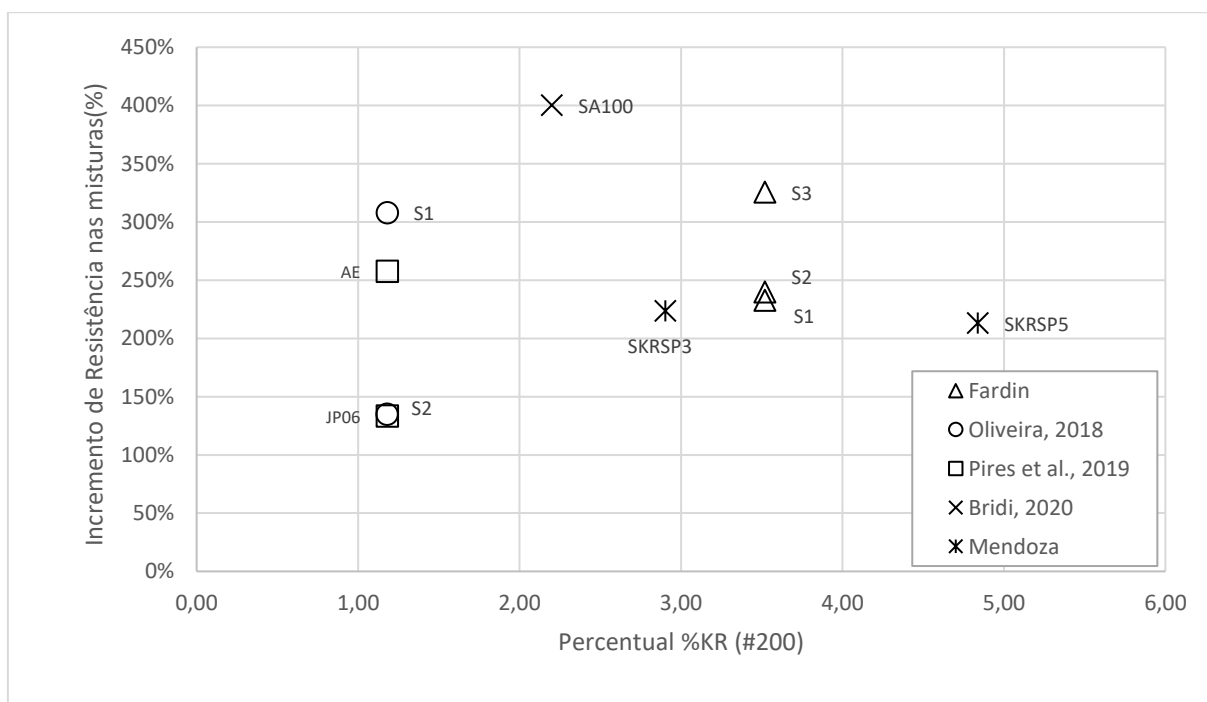
Nos solos S1, S2 e S3, que compõem este programa experimental, o comportamento foi semelhante ao verificado com os demais solos, mesmo com a quantidade de KR mantida constante, o comportamento variou de acordo com o tipo de solo, sendo que os maiores incrementos foram apresentados para os solos argilosos e siltosos com maior percentual de finos.

Gráfico 8 – Incremento de resistência x % KR (#40)



Fonte: O Autor, 2024.

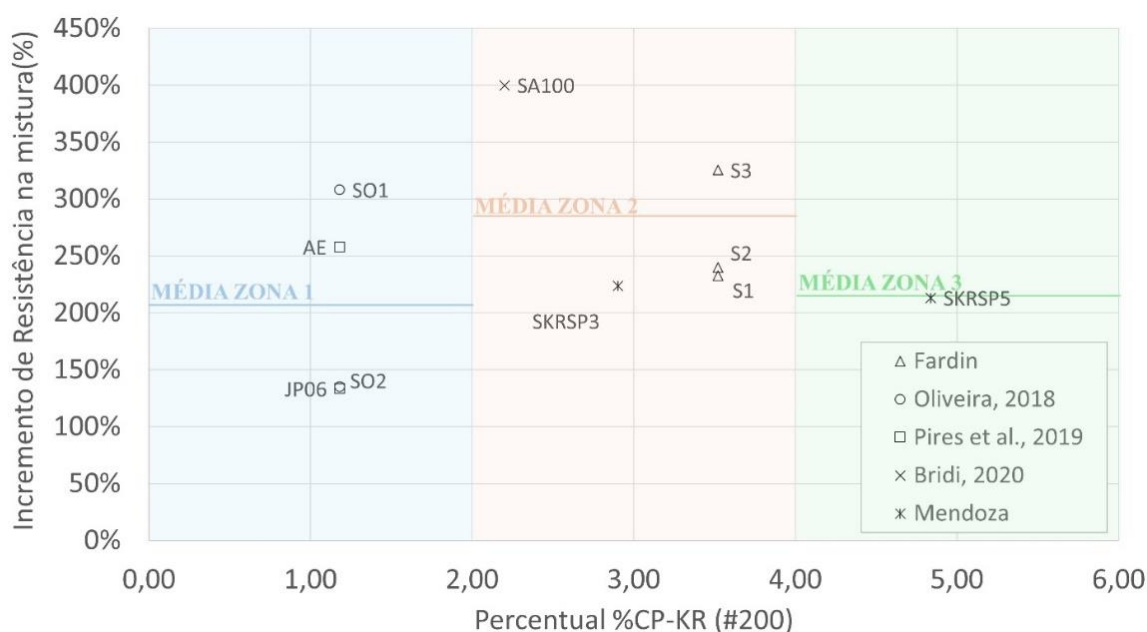
Gráfico 9 – Incremento de resistência x % KR (#200)



Fonte: O Autor, 2024.

Quando avaliado o comportamento do percentual de KR passante na peneira #200 em relação ao incremento de resistência, é possível analisar por zonas de variação de percentual, sendo: zona 01 – percentual de KR (#200) entre 0% e 2%; zona 02 percentual de KR (#200) entre 2% e 4% e zona 03 - percentual de KR (#200) entre 4% e 6% (Gráfico 10). O percentual de incremento quando avaliado por zona apresenta uma média de 208% para zona 01, 284% para zona 02 e 213% para zona 03. Esse comportamento sugere que os maiores incrementos de resistência são obtidos em misturas que contenham de 2% a 4% de KR com diâmetro inferior a 0,075mm (#200).

**Gráfico 10 – Incremento de resistência x % KR (peneira #200).**



Fonte: O Autor, 2024.

### 5.2.3 Expansão

Em ensaios de expansão foram realizados em conjunto com os ensaios de ISC e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados obtidos para o ensaio de expansão

SOLO		COMPACTAÇÃO	
Descrição	Denominação	Expansão (%)	Umidade (%)
<b>AREIA ARGILOSA</b>	S1	0,16	10,50
<b>ARGILA ARENOSA VERMELHA</b>	S2	0,32	13,88
<b>ARGILA AMARELA</b>	S3	0,11	16,23
<b>MISTURA S1+KR</b>	S1KR20	0,12	12,47
<b>MISTURA S2+KR</b>	S2KR20	0,23	14,09
<b>MISTURA S3+KR</b>	S3KR20	0,28	16,73

Fonte: O Autor, 2024.

Os resultados obtidos demonstram pequenas modificações nos resultados de expansão, sendo que o Solo S1 e S2 os valores diminuíram, já no solo S3 o valor aumentou. Os resultados vão de encontro ao identificado por Bridi (2020), Oliveira (2018) e Pires et al. (2019), que não verificaram variações na expansão que extrapolem normas para utilização do material em camadas de pavimentação.

### 5.3 CARACTERIZAÇÃO MECANÍSTICA

Para caracterização mecânica foram os realizados de Determinação do módulo de resiliência, conforme NORMA DNIT 134 (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018). Os ensaios foram realizados nos solos naturais e nas misturas com CP-KR, com um tempo de cura de 4 dias, conforme realizado no ensaio de ISC. Foram aplicados modelos matemáticos em função das tensões aplicadas para expressar os comportamentos dos solos e misturas estudadas (Equação 1 e 4).

$$MR = K_1 \times \sigma_3^{k_2}$$

Equação 1

$$MR = K_1 \times \sigma_d^{k_2} \quad \text{Equação 2}$$

$$MR = K_1 \times \theta^{k_2} \quad \text{Equação 3}$$

$$MR = K_1 \times \sigma_3^{k_2} \times \sigma_d^{k_2} \quad \text{Equação 4}$$

As tensões aplicadas na fase de condicionamento e na determinação do módulo de resiliência seguiram o método de ensaio NORMA DNIT 134 (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018), e são apresentadas nas Tabela 24 e Tabela 25.

**Tabela 24 – Sequência de tensões para fase de condicionamento**

<b>Tensão Confinante</b>	<b>Tensão de Desvio</b>	<b>Razão de Tensões</b>
$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)
<b>0,070</b>	0,070	2
<b>0,070</b>	0,210	4
<b>0,105</b>	0,315	4

Fonte: (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018)

**Tabela 25 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência.**

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	$\sigma_1/ \sigma_3$
<b>0,020</b>	0,020	2
	0,040	3
	0,060	4
<b>0,035</b>	0,035	2
	0,070	3
	0,105	4
<b>0,050</b>	0,050	2
	0,100	3
	0,150	4

<b>0,070</b>	0,070	2
	0,140	3
	0,210	4
<b>0,105</b>	0,105	2
	0,210	3
	0,315	4
<b>0.140</b>	0,140	2
	0,280	3
	0,420	4

Fonte: (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018)

- **Solo S1 – Areia Argilosa**

Os resultados obtidos para o Módulo de Resiliência para o solo S1 - Areia Argilosa e o S1KR20 são apresentados nas Tabela 26 e Tabela 27 e nos Gráfico 11 ao

Gráfico 14. Nos gráficos apresentados verifica-se que houve aumento significativo nos níveis de módulo de resiliência do solo estabilizado. Para comparação dos resultados obtidos foi utilizado a médias das tensões obtidas nos ensaios, uma vez que a proposta é avaliar o comportamento do solo, nas diferentes condições de trabalho.

**Tabela 26 – Resultados do Módulo de Resiliência para o Solo S1 - Areia Argilosa.**

<b>Tensões de referência</b>		<b>Tensões do Ensaio</b>					
<b><math>\sigma_3</math> (MPa)</b>	<b><math>\sigma_d</math> (MPa)</b>	<b><math>\sigma_3</math> (MPa)</b>	<b><math>\sigma_d</math> (MPa)</b>	<b>% diferença <math>\sigma_3</math></b>	<b>% desvio <math>\sigma_d</math></b>	<b><math>\epsilon_r</math></b>	<b>MR (MPa)</b>
<b>0,02</b>	0,020	0,024066	0,021061	20,33	5,31	3,00E-02	70,32
	0,040	0,024114	0,041272	20,57	3,18	6,31E-02	65,38
	0,060	0,24187	0,061263	20,94	2,11	1,00E-01	61,1
<b>0,035</b>	0,035	0,038452	0,036034	9,86	2,95	4,53E-02	79,6
	0,070	0,038379	0,071841	9,66	2,63	1,07E-01	67,21
	0,105	0,038307	0,107211	9,45	2,11	1,82E-01	59,06

<b>0,05</b>	0,050	0,053081	0,051264	6,16	2,53	6,18E-02	82,97
	0,100	0,052741	0,102301	5,48	2,3	1,50E-01	68,05
	0,150	0,052596	0,153159	5,19	2,11	2,39E-01	64,2
<b>0,07</b>	0,070	0,071979	0,071177	2,83	16,8	7,87E-02	90,39
	0,140	0,071979	0,142995	2,83	2,14	1,91E-01	74,88
	0,210	0,071543	0,213688	2,20	1,76	2,86E-01	74,67
<b>0,105</b>	0,105	0,10638	0,106618	1,31	1,54	9,89E-02	107,84
	0,210	0,106307	0,213048	1,31	1,45	2,28E-01	93,4
	0,315	0,106647	0,31912	1,25	1,31	3,11E-01	102,85
<b>0,14</b>	0,140	0,140781	0,141644	1,57	1,17	1,05E-01	135,27
	0,280	0,140781	0,282828	0,56	1,01	2,43E-01	116,37
	0,420	0,140368	0,421662	0,56	0,4	3,44E-01	123,05

Fonte: O Autor, 2024.

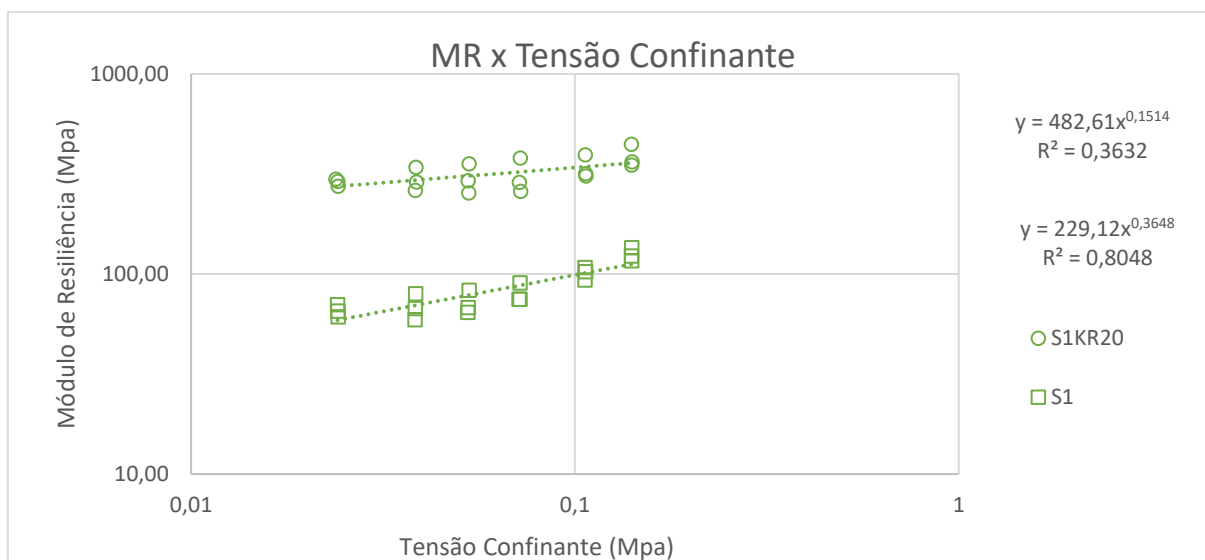
**Tabela 27 – Resultados do Módulo de Resiliência para o Solo S1 - Areia Argilosa modificado com KR**

Tensões de referência		Tensões do Ensaio					
$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	% diferença $\sigma_3$	% desvio $\sigma_d$	$\epsilon_r$	MR (MPa)
<b>0,02</b>	0,020	0,023848	0,023325	19,24	16,63	7,85E-03	297,30
	0,040	0,024114	0,042630	20,57	6,57	1,47E-02	289,79
	0,060	0,024163	0,062676	20,81	4,46	2,28E-02	274,83
<b>0,035</b>	0,035	0,038573	0,037634	10,21	7,53	1,10E-02	341,01
	0,070	0,038695	0,072817	10,56	4,02	2,53E-02	288,27
	0,105	0,038404	0,107469	9,72	2,35	4,10E-02	261,89
<b>0,05</b>	0,050	0,053032	0,052864	6,06	5,73	1,49E-02	355,43
	0,100	0,052765	0,102699	5,53	2,7	3,51E-02	292,84
	0,150	0,052935	0,152042	5,87	1,36	5,98E-02	254,40
<b>0,07</b>	0,070	0,072125	0,073059	3,04	4,37	1,92E-02	380,21
	0,140	0,071761	0,142409	2,52	1,72	4,96E-02	287,39

	0,210	0,072198	0,212728	3,14	1,3	8,20E-02	259,37
<b>0,105</b>	0,105	0,106453	0,107828	1,38	2,69	2,74E-02	393,62
	0,210	0,106744	0,212830	1,66	1,35	6,72E-02	316,56
	0,315	0,106841	0,318659	1,75	1,16	1,03E-01	308,94
<b>0,14</b>	0,140	0,140514	0,142964	0,37	2,12	3,21E-02	445,80
	0,280	0,140951	0,283367	0,68	1,2	7,80E-02	363,47
	0,420	0,140611	0,423231	0,44	0,77	1,21E-01	350,65

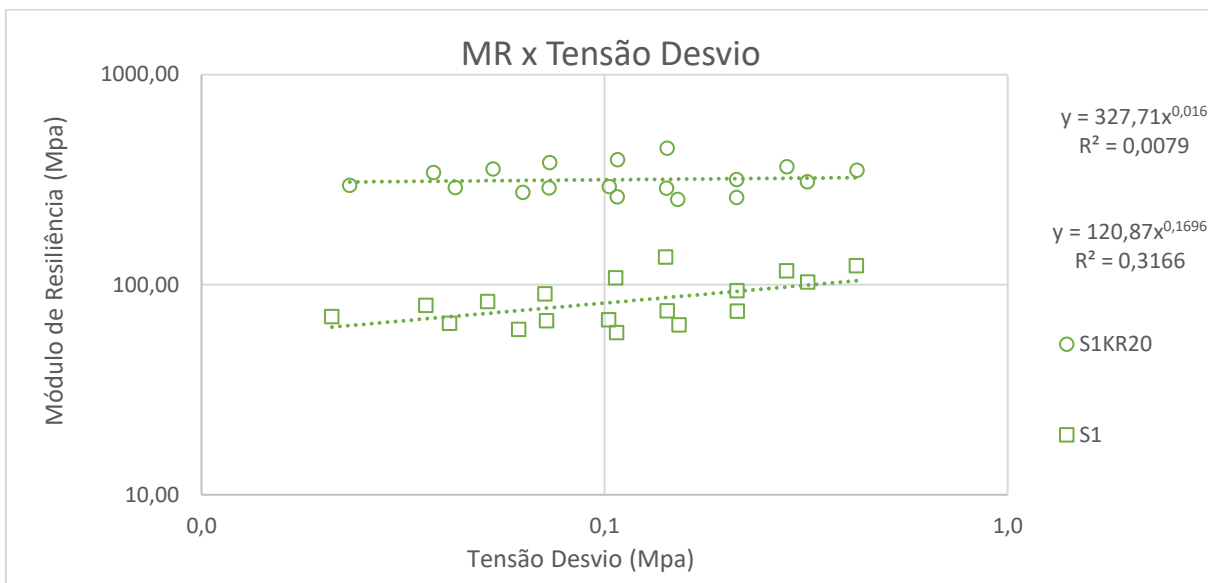
Fonte: O Autor, 2024.

**Gráfico 11 – Módulo de Resiliência x Tensão Confinante (SOLO S1)**



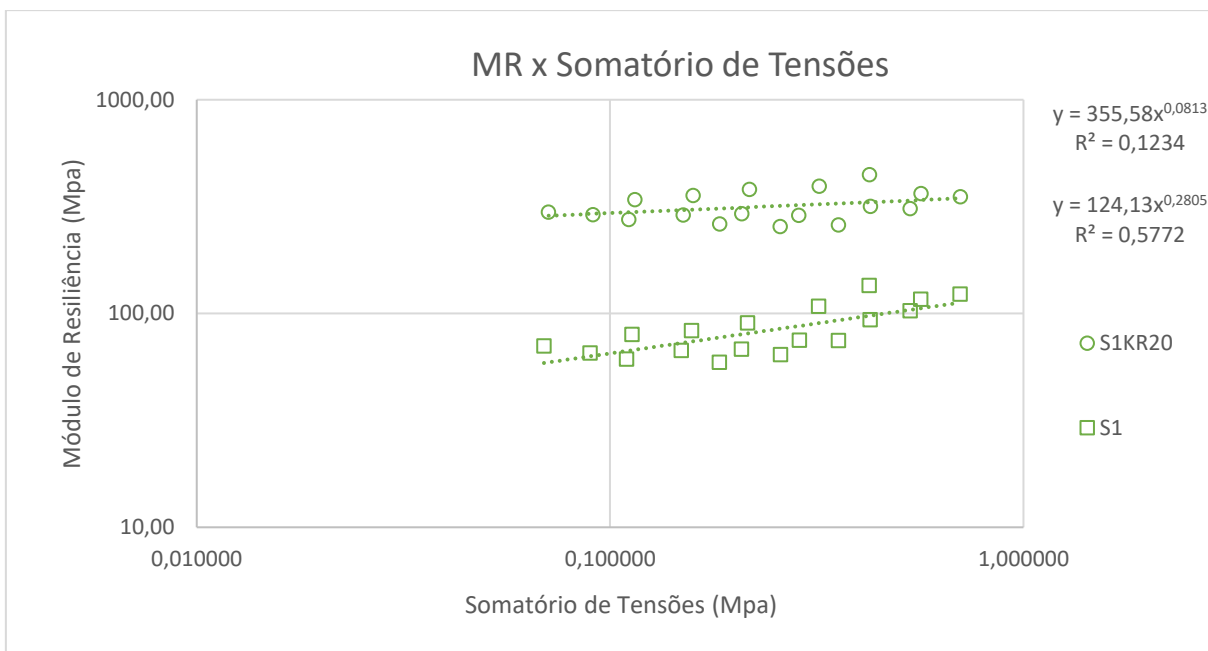
Fonte: O Autor, 2024.

Gráfico 12 – Módulo de Resiliência x Tensão Desvio (SOLO S1)



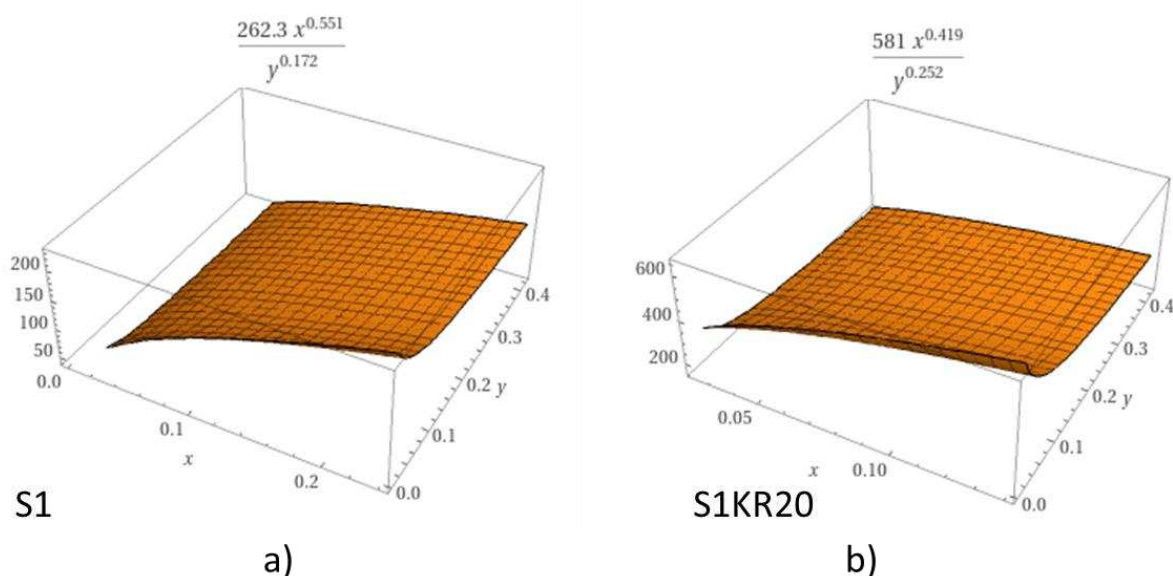
Fonte: O Autor, 2024.

Gráfico 13 – Módulo de Resiliência x Somatório de Tensões (SOLO S1)



Fonte: O Autor, 2024.

Gráfico 14 – Modelo Composto (SOLO S1)



Fonte: O Autor, 2024.

Na Tabela 28 está apresentado o resultado do aumento médio do módulo de resiliência e o deslocamento permanente máximo acumulado total. Os resultados do incremento de resistência foram significativos para o solo S1 estabilizado com CP-KR, passado de 85,37 MPa para 320,10 MPa. Já a redução nas deformações permanentes durante, na realização dos ensaios apresentou uma redução de 86%, passado de 9,259mm para 1,326mm. Os resultados estão associados ao potencial de ganho de resistência pela estabilização do coproduto, oriundos das trocas catiônicas e reações de hidratação entre o solo e o agente estabilizante. Destaca-se que o tempo de cura do solo estabilizado foi de apenas 4 dias e que os valores provavelmente seriam maiores caso adotado um tempo de cura maior, visto que a interação solo-KR tem desenvolvimento contínuo (Bridi, 2020).

Tabela 28 – Resultados do Módulo de Resiliência e Deslocamento Permanente.

SOLO		RESULTADOS			
Descrição		Desloc. Total. (mm)	Módulo de Resiliência - Média (MPa)	Incremento de Resistência (%)	Variacao Desloc. Acumulad o Total
AREIA ARGILOSA	S1	9,259	85,37		
MISTURA S1+KR	S1KR20	1,326	320,10	275%	86%

Fonte: O Autor, 2024.

- **Solo S2 – Argila Arenosa Vermelha**

Os resultados obtidos para o solo S2 - Argila Arenosa Vermelha e o S2KR20 são apresentados nas Tabela 29 e Tabela 30, respectivamente. A comparação entre os resultados de modulo de resiliência obtidos para o solo natural S2 e o solo estabilizado com CP-KR estão apresentados nos Gráfico 15 ao Gráfico 18. Verifica-se nos gráficos o aumento dos módulos de resiliência para as tensões estabelecidas no ensaio. Na Tabela 31 é possível verificar o aumento do valor médio do módulo de resiliência de 99,69 MPa para 201,18 MPa e uma redução significativa no deslocamento acumulado no ensaio, passando de 6,770mm no solo natural para 1,904mm no solo estabilizado. Os resultados encontrados estão coerentes com os verificados no solo S1.

Tabela 29 – Resultados do Módulo de Resiliência para o Solo S2.

Tensões de referência		Tensões do Ensaio					
$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	% diferença $\sigma_3$	% desvio $\sigma_d$	$\epsilon_r$	MR (MPa)
	0,020	0,02118	0,02134	5,88%	6,69%	1,87E-04	113,931
<b>0,02</b>	0,040	0,02120	0,04124	6,00%	3,09%	4,07E-04	101,266
	0,060	0,02158	0,06099	7,88%	1,65%	7,08E-04	86,114
<b>0,035</b>	0,035	0,03660	0,03628	4,57%	3,67%	3,03E-04	119,874

	0,070	0,03648	0,07085	4,21%	1,21%	7,78E-04	91,095
	0,105	0,03615	0,10584	3,29%	0,80%	1,44E-03	73,703
<b>0,05</b>	0,050	0,05153	0,05118	3,05%	2,36%	4,71E-04	108,703
	0,100	0,05128	0,10087	2,55%	0,87%	1,23E-03	82,193
	0,150	0,05120	0,15086	2,40%	0,58%	2,14E-03	70,497
<b>0,07</b>	0,070	0,07118	0,07115	1,68%	1,65%	6,35E-04	112,037
	0,140	0,07135	0,14095	1,93%	0,68%	1,74E-03	80,977
	0,210	0,07105	0,21103	1,50%	0,49%	2,83E-03	74,597
<b>0,105</b>	0,105	0,10728	0,10602	2,17%	0,97%	9,13E-04	116,082
	0,210	0,10690	0,21126	1,81%	0,60%	2,33E-03	90,589
	0,315	0,10698	0,31651	1,88%	0,48%	3,30E-03	95,946
<b>0,14</b>	0,140	0,14248	0,14110	1,77%	0,79%	1,11E-03	126,912
	0,280	0,14238	0,28153	1,70%	0,55%	2,61E-03	107,914
	0,420	0,14218	0,42084	1,55%	0,20%	2,98E-03	142,083

Fonte: O Autor, 2024.

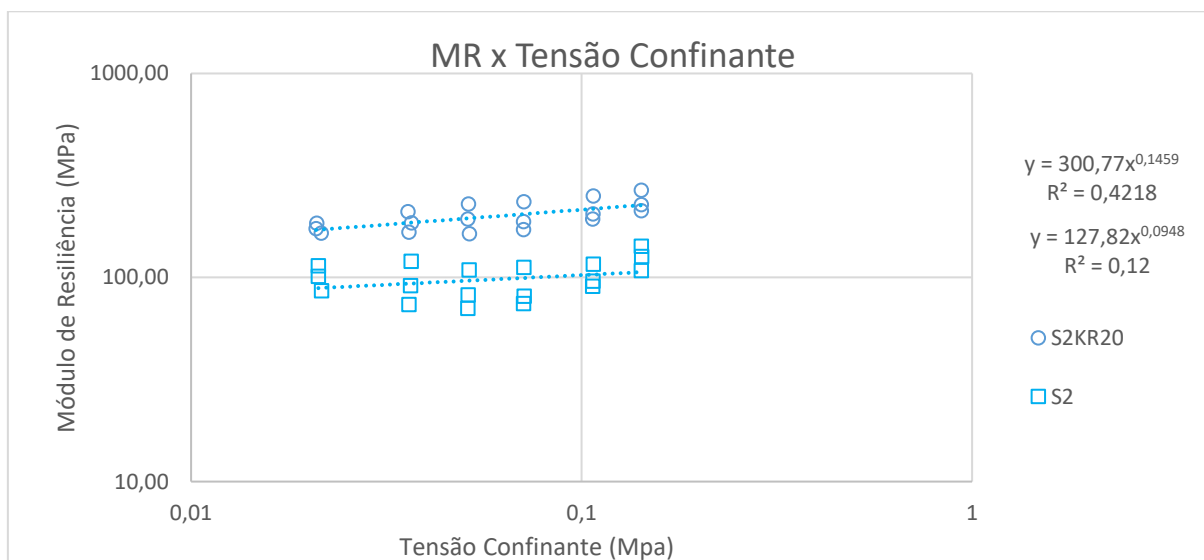
**Tabela 30 – Resultados do Módulo de Resiliência para o Solo S2 modificado com KR.**

Tensões de referência		Tensões do Ensaio					
$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	% diferença $\sigma_3$	% desvio $\sigma_d$	$\epsilon_r$	MR (MPa)
<b>0,02</b>	0,020	0,02100	0,02233	5,00%	11,63%	1,21E-04	184,130
	0,040	0,02090	0,04222	4,50%	5,55%	2,43E-04	173,549
	0,060	0,02155	0,06187	7,75%	3,11%	3,75E-04	164,908
<b>0,035</b>	0,035	0,03593	0,03769	2,64%	7,69%	1,79E-04	210,066
	0,070	0,03670	0,07216	4,86%	3,08%	3,89E-04	185,398
	0,105	0,03615	0,10684	3,29%	1,75%	6,40E-04	166,959
<b>0,05</b>	0,050	0,05138	0,05195	2,75%	3,90%	2,27E-04	228,926
	0,100	0,05118	0,10190	2,35%	1,90%	5,27E-04	193,397
	0,150	0,05163	0,15161	3,25%	1,07%	9,27E-04	163,562

	0,070	0,07118	0,07172	1,68%	2,46%	3,06E-04	234,609
<b>0,07</b>	0,140	0,07100	0,14219	1,43%	1,56%	7,56E-04	188,145
	0,210	0,07103	0,21163	1,46%	0,78%	1,24E-03	171,309
	0,105	0,10718	0,10670	2,07%	1,62%	4,26E-04	250,785
<b>0,105</b>	0,210	0,10710	0,21219	2,00%	1,04%	1,04E-03	204,879
	0,315	0,10685	0,31723	1,76%	0,71%	1,64E-03	193,316
	0,140	0,14238	0,14177	1,70%	1,27%	5,31E-04	267,217
<b>0,14</b>	0,280	0,14225	0,28263	1,61%	0,94%	1,24E-03	227,707
	0,420	0,14225	0,42180	1,61%	0,43%	1,98E-03	212,647

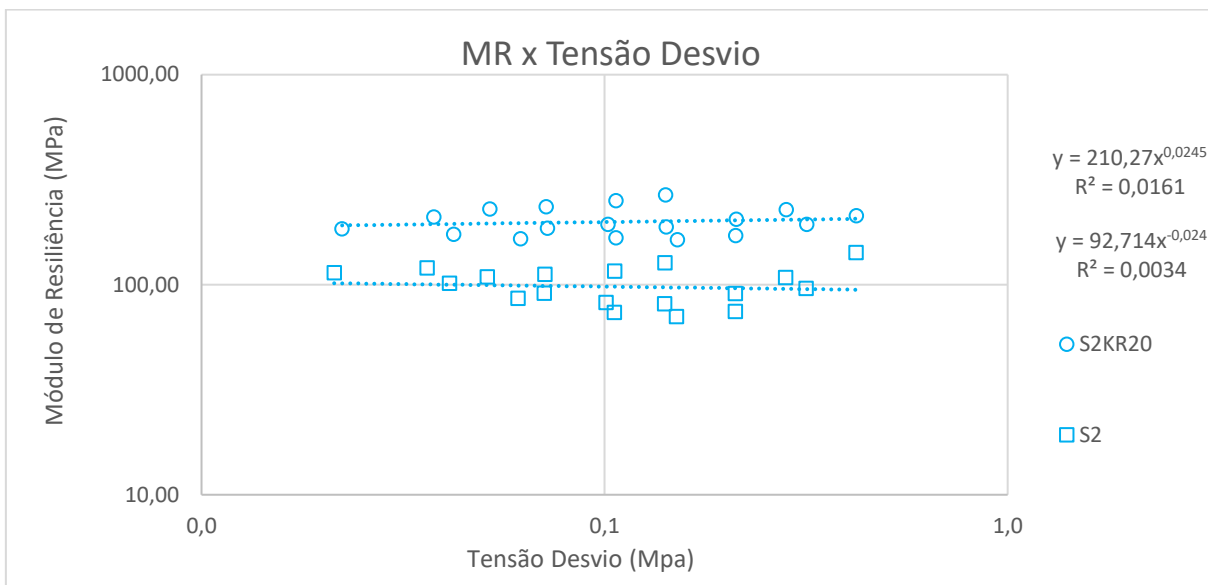
Fonte: O Autor, 2024.

**Gráfico 15 – Módulo de Resiliência x Tensão Confinante (SOLO S2)**



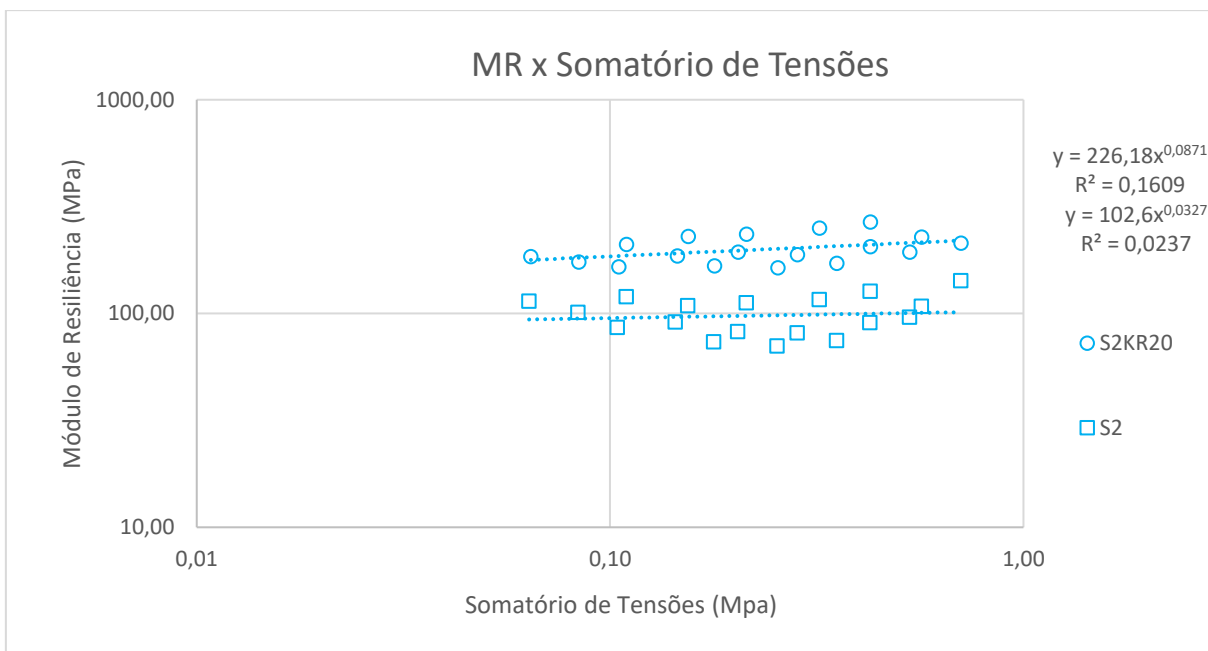
Fonte: O Autor, 2024.

Gráfico 16 – Módulo de Resiliência x Tensão Desvio (SOLO S2)



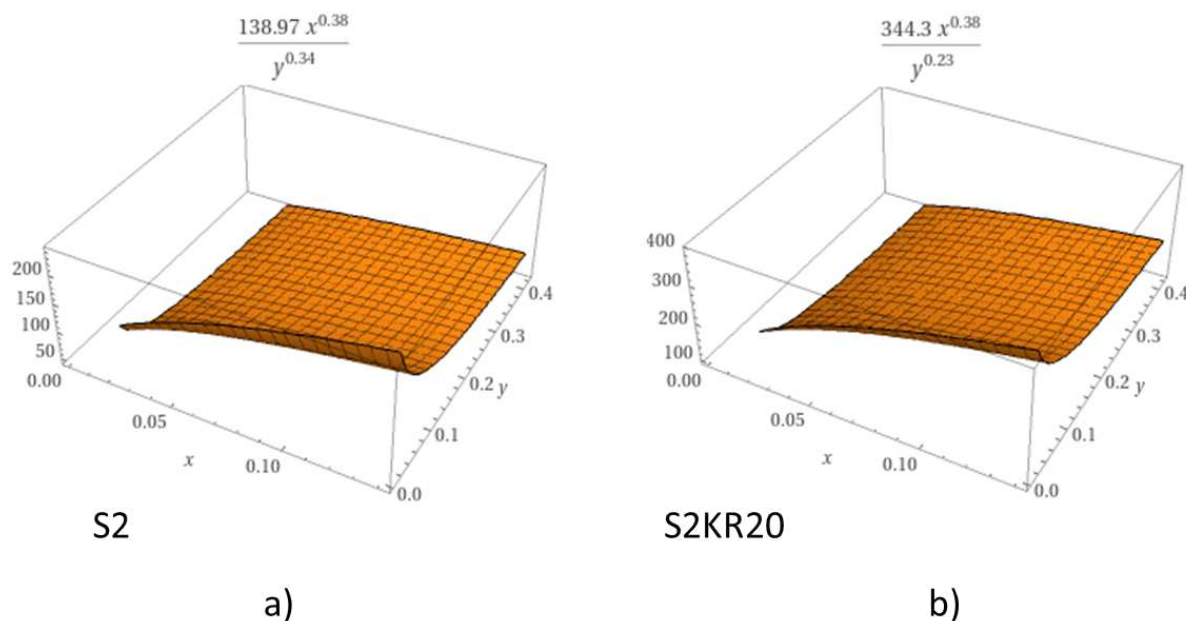
Fonte: O Autor, 2024.

Gráfico 17 – Módulo de Resiliência x Somatório de Tensões (SOLO S2)



Fonte: O Autor, 2024.

Gráfico 18 – Modelo Composto (SOLO S2)



Fonte: O Autor, 2024.

Tabela 31 – Resultados do Módulo de Resiliência e Deslocamento Permanente

SOLO		RESULTADOS			
Descrição		Desloc. Total. (mm)	Módulo de Resiliência - Média (MPa)	Incremento de Resistência (%)	Variacao Desloc. Acumulad o Total
ARGILA ARENOSA VERMELHA	S2	6,770	99,69		
MISTURA S2+KR	S2KR20	1,904	201,18	102%	72%

Fonte: O Autor, 2024.

- **Solo S3 – Argila Amarela**

Os resultados obtidos para o solo S3 - Argila Amarela e o S3KR20 são apresentados nas Tabela 32 e Tabela 33, respectivamente. A comparação entre os resultados de modulo de resiliência obtidos para o solo natural S3 e o solo estabilizado com CP-KR

estão apresentados nos Gráfico 15 ao Gráfico 18. Verifica-se nos gráficos e na Tabela 34 o aumento dos módulos de resiliência para as tensões estabelecidas no ensaio. Em relação aos demais solos estudados, apesar de ter sido verificado um aumento significativo nos valores do Módulo de Resiliência médio, os aumentos verificados foram menores que os verificados nos solos S1 e S2. A diferença de comportamento em relação ao aumento no MR pode ser atribuída as características do solo, uma vez que os solos finos apresentam comportamento mais coeso, uma das características responsáveis pelo aumento da resistência dos solos finos, não a fricção e o travamento de partículas, conforme indicado por (NGUYEN; MOHAJERANI, 2016).

**Tabela 32 – Resultados do Módulo de Resiliência para o Solo S3**

Tensões de referência		Tensões do Ensaio					
$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	% diferença $\sigma_3$	% desvio $\sigma_d$	$\epsilon_r$	MR (MPa)
<b>0,02</b>	0,020	0,02118	0,02165	5,88%	8,24%	1,34E-04	161,507
	0,040	0,0218	0,04169	9,00%	4,22%	2,66E-04	156,994
	0,060	0,02115	0,0615	5,75%	2,50%	4,28E-04	143,869
<b>0,035</b>	0,035	0,0367	0,0368	4,86%	5,13%	2,12E-04	173,76
	0,070	0,03663	0,07172	4,64%	2,46%	4,63E-04	155,102
	0,105	0,03665	0,10627	4,71%	1,21%	7,88E-04	134,925
<b>0,05</b>	0,050	0,0517	0,05178	3,40%	3,56%	2,67E-04	193,75
	0,100	0,05163	0,10112	3,25%	1,12%	6,64E-04	152,372
	0,150	0,05158	0,1511	3,15%	0,73%	1,33E-03	113,27
<b>0,07</b>	0,070	0,07158	0,07123	2,25%	1,76%	3,86E-04	184,704
	0,140	0,07143	0,14114	2,04%	0,81%	1,13E-03	124,474
	0,210	0,07138	0,21113	1,96%	0,54%	2,06E-03	102,565
<b>0,105</b>	0,105	0,10718	0,10607	2,07%	1,02%	6,23E-04	170,398
	0,210	0,10738	0,21108	2,26%	0,52%	1,77E-03	119,015
	0,315	0,107	0,31648	1,90%	0,47%	2,85E-03	110,987
<b>0,14</b>	0,140	0,14265	0,14137	1,89%	0,98%	8,42E-04	167,989

0,280	0,14198	0,28163	1,41%	0,58%	2,31E-03	121,733
0,420	0,14245	0,42091	1,75%	0,22%	3,28E-03	128,937

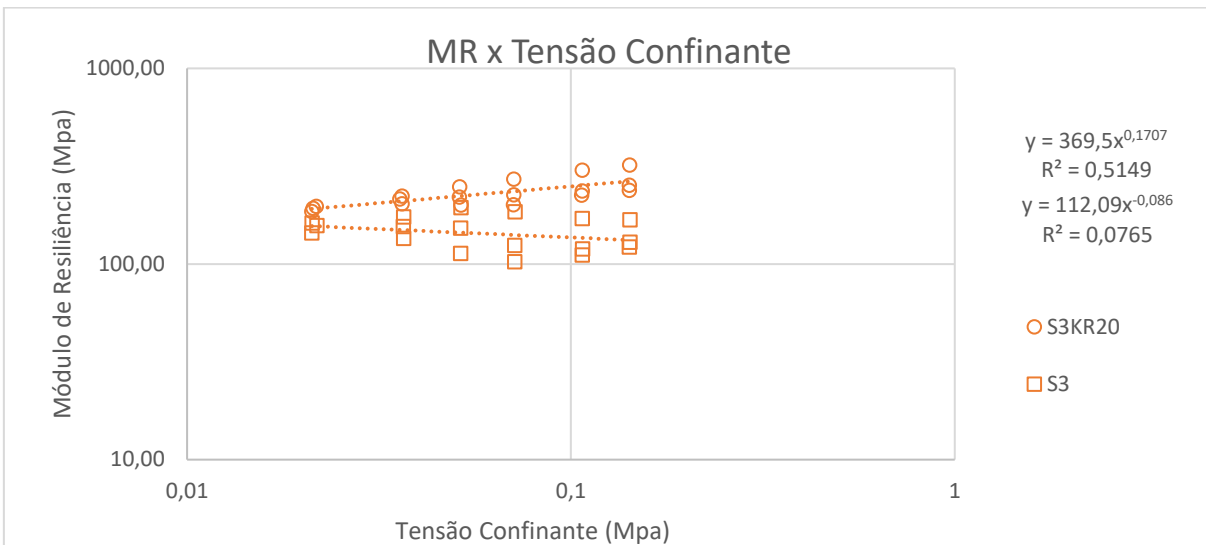
Fonte: O Autor, 2024.

**Tabela 33 – Resultados do Módulo de Resiliência para o Solo S3 modificado com KR**

Tensões de referência		Tensões do Ensaio					
$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	% diferença $\sigma_3$	% desvio $\sigma_d$	$\epsilon_r$	MR (MPa)
<b>0,02</b>	0,020	0,0213	0,02235	0,065	0,1174	0,000116	192,067
	0,040	0,0217	0,04253	8,5	6,32	0,000216	196,589
	0,060	0,02113	0,06213	5,63	3,55	0,000335	185,376
<b>0,035</b>	0,035	0,0363	0,03769	3,71	7,69	0,00017	222,214
	0,070	0,03585	0,07214	2,43	3,06	0,000337	214,193
	0,105	0,03635	0,1069	3,86	1,81	0,000526	203,178
<b>0,05</b>	0,050	0,0513	0,052	2,6	4	0,00021	247,883
	0,100	0,05125	0,10215	2,5	2,15	0,000465	219,827
	0,150	0,0517	0,15207	3,4	1,38	0,000761	199,718
<b>0,07</b>	0,070	0,071	0,07244	1,43	3,48	0,000267	271,081
	0,140	0,07098	0,14118	1,39	0,84	0,000626	225,43
	0,210	0,07088	0,21216	1,25	1,03	0,00106	200,781
<b>0,105</b>	0,105	0,10703	0,10721	1,93	2,1	0,000356	301,385
	0,210	0,107	0,21252	1,9	1,2	0,0009	236,058
	0,315	0,10675	0,31759	1,67	0,82	0,00141	224,914
<b>0,14</b>	0,140	0,1424	0,14255	1,71	1,82	0,000446	319,522
	0,280	0,14203	0,28285	1,45	1,02	0,00112	252,459
	0,420	0,14203	0,42198	1,45	0,47	0,00177	237,79

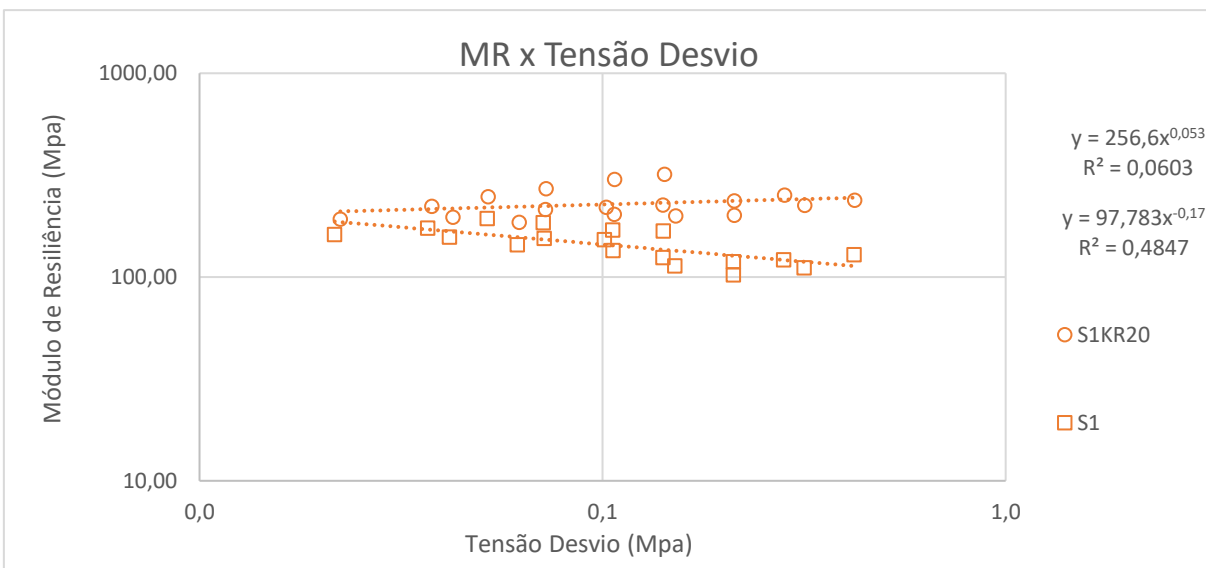
Fonte: O Autor, 2024.

**Gráfico 19 – Módulo de Resiliência x Tensão Confinante (SOLO S3)**



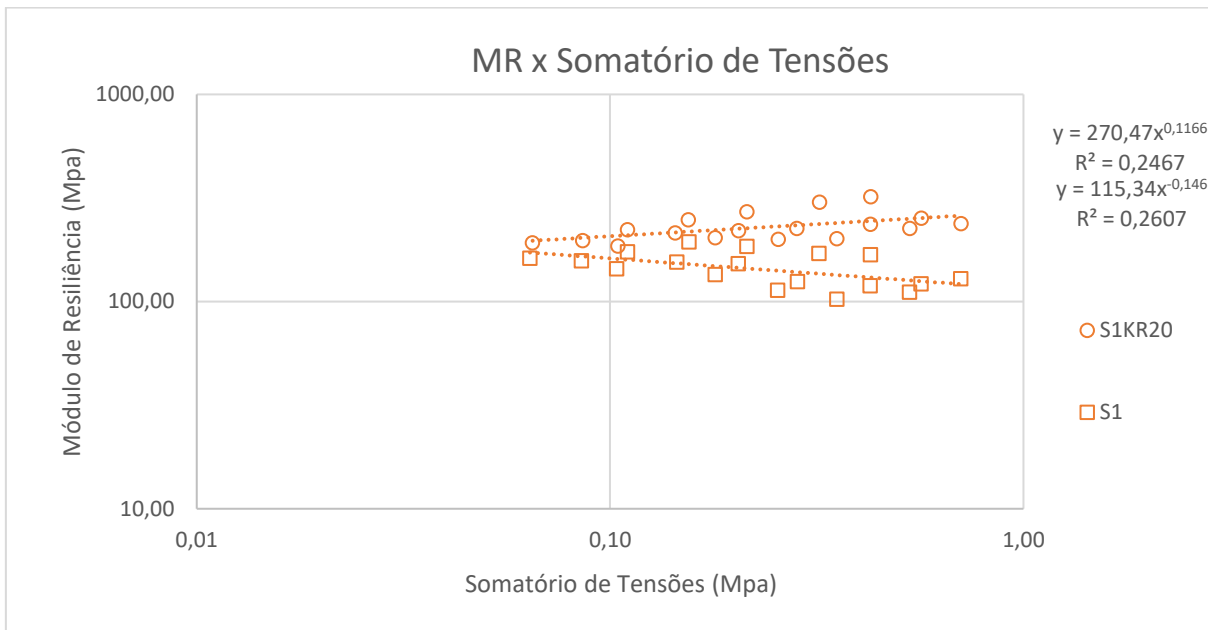
Fonte: O Autor, 2024.

**Gráfico 20 – Módulo de Resiliência x Tensão Desvio (SOLO S3)**



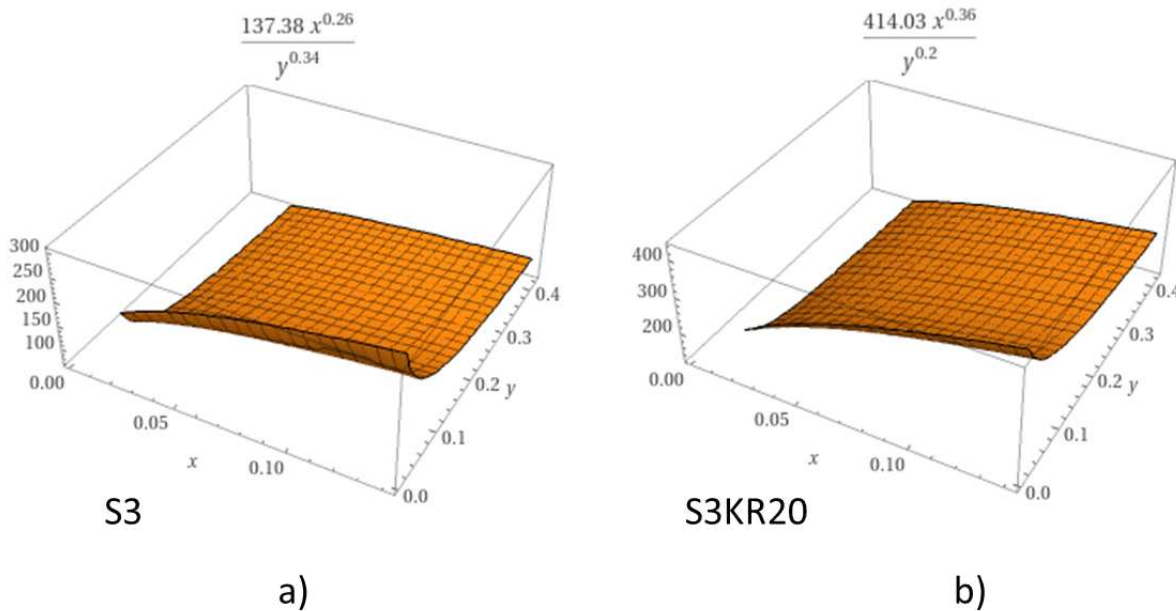
Fonte: O Autor, 2024.

**Gráfico 21 – Módulo de Resiliência x Somatório de Tensões (SOLO S3)**



Fonte: O Autor, 2024.

**Gráfico 22 – Modelo Composto (SOLO S3)**



Fonte: O Autor, 2024.

**Tabela 34 – Resultados do Módulo de Resiliência e Deslocamento Permanente**

SOLO		RESULTADOS			
Descrição		Desloc. Total. (mm)	Módulo de Resiliência - Média (MPa)	Incremento de Resistência (%)	Varição Desloc. Acumulada Total
ARGILA AMARELA	S3	3,765	145,35		
MISTURA S3+KR	S3KR20	1,732	230,58	59%	57%

Fonte: O Autor, 2024.

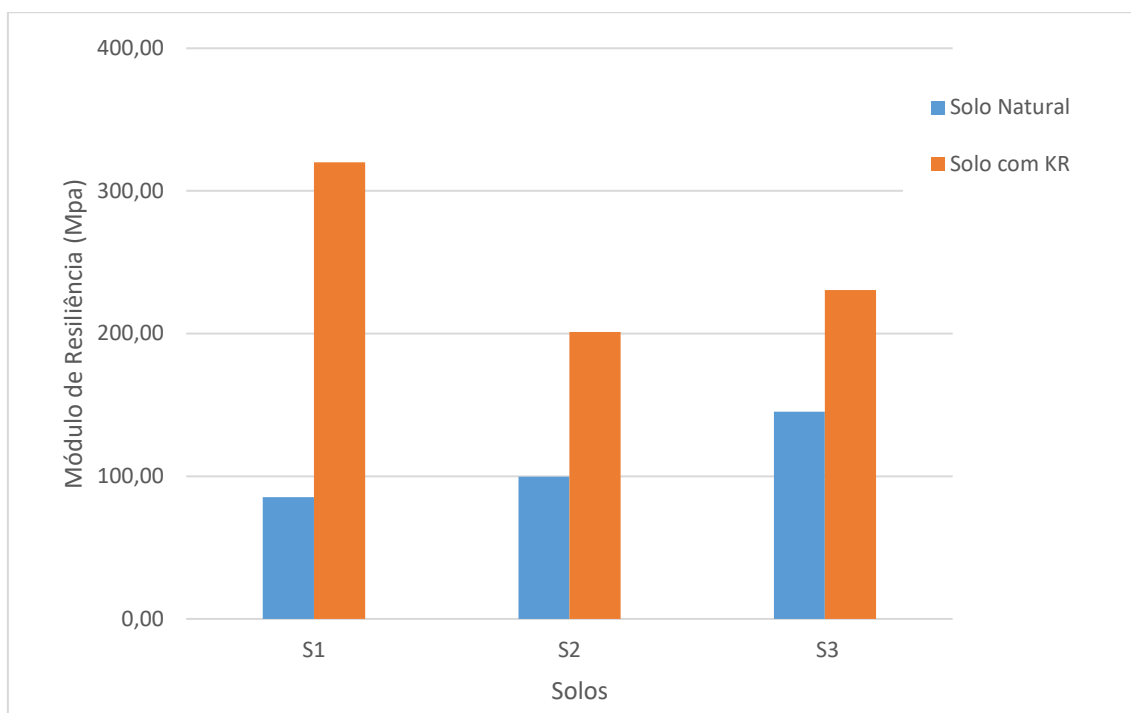
A avaliação do módulo de resiliência dos solos S1, S2 e S3 quando estabilizados com o CP-KR demonstra um aumento significativo nos valores das médias obtidas nas tensões aplicadas no ensaio. O Gráfico 23 demonstra que os três solos obtiveram ganhos de resistência, atingindo patamares similares de tensão. O aumento pode ser atribuído a capacidade de ganho de resistência do CP-KR através de reações pozolânicas e reações de troca catiônica e de hidratação entre o coproduto e solo.

O comportamento dos solos estabilizados em relação as tensões aplicadas nos ensaios foram distintas para cada tipo de solo, sendo o solo S1/S1KR20 aquele com maiores incrementos. Esse resultado pode ser atribuído principalmente a duas variáveis, a diferença granulométrica existente entre os solos e a coesão entre as partículas, expressa em termos do Módulo de Resiliência. A coesão gerada pelo CP-KR no solo S1 foi mais significativa que nos demais, maior do que aquela apresentada pelo solo S3. Essa diferença pode ser atribuída à coesão já existente no solo S3, representada por um maior percentual de argila em relação ao solo S1. O que se verifica é que a coesão gerada pelo coproduto foi expressa no aumento do MR mais intensamente para o Solo S1 que para o solo S3, elevando os dois solos ao mesmo nível de resistência.

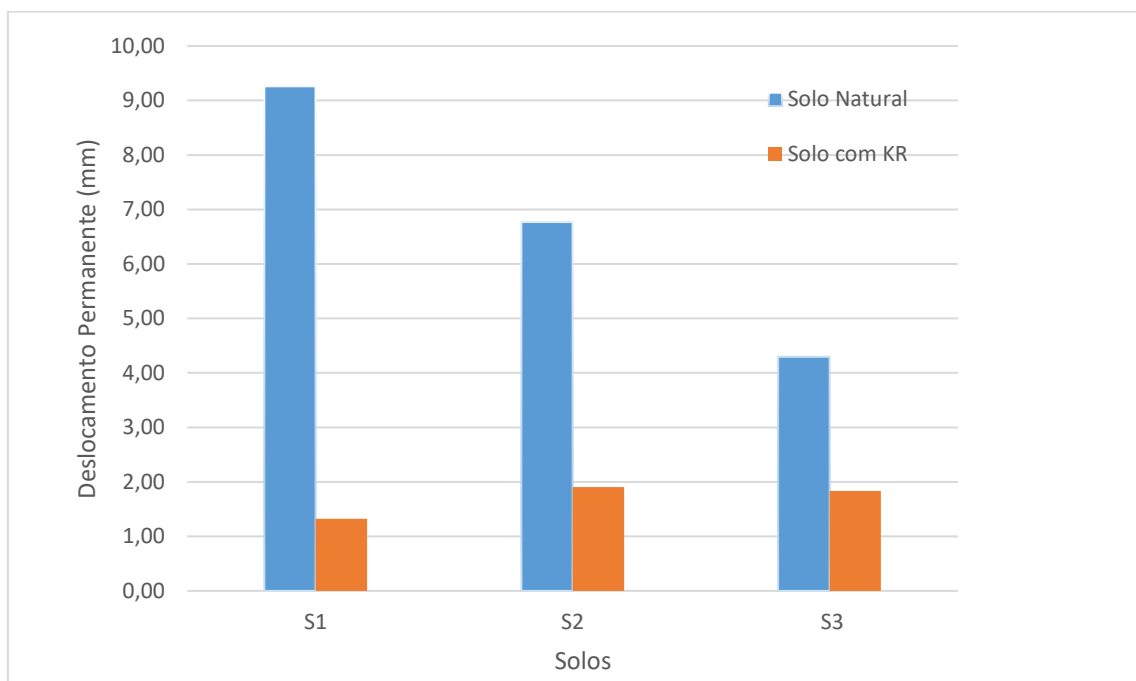
Uma consideração relevante que pode ser avaliada no Gráfico 24, é a elevada capacidade de diminuição das deformações quando aplicadas as tensões previstas no ensaio. Embora todos os solos tenham apresentado redução significativa da capacidade de deformação, com uma redução média de 72%, o solo S1/S1KR20, teve

o deslocamento permanente total reduzido em 86%. Esse resultado é extremamente importante, uma vez que a diminuição nas deformações plásticas dos solos que compõem as camadas do pavimento influencia positivamente a durabilidade e resistência a fadiga, características desejáveis tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental.

**Gráfico 23 – Módulo de Resiliência**



Fonte: O Autor, 2024.

**Gráfico 24 – Deslocamento Permanente**

Fonte: O Autor, 2024.

## 6 CONCLUSÕES

Os benefícios e limitações da utilização do coproduto siderúrgico tipo Kambara Reactor (CP-KR) como material alternativo para composição de pavimentos foram estudados, em conjunto com a análise de estudos já desenvolvidos sobre essa temática. Com base nesta análise, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- o CP-KR apresenta potencial de utilização para alteração de índices físicos dos solos utilizados para pavimentação, estando atrelado às características do solo a ser estabilizado e a granulometria do agente estabilizador (KR);
- os maiores incrementos de resistência foram observados para os solos com percentual de finos (argila + silte) próximos a 55% e em misturas que continham entre 2% e 4% de CP-KR com diâmetro inferior a 0,075 mm. Mesmo com a quantidade de CP-KR mantida constante, o comportamento variou de acordo com o tipo de solo, sendo que os maiores incrementos foram apresentados para os solos argilosos e siltosos, com maior percentual de finos;
- a variação no incremento de resistência obtida para misturas estabilizadas com a mesma quantidade de CP-KR pode ser atribuída as diferentes características iniciais dos solos a serem estabilizados. Em função dos diferentes tipos de solo, quantidades diferentes de CP-KR podem ser requeridas para alcançar a estabilização desejada;
- após a incorporação do CP-KR, os valores de ISC obtidos para todos os solos foram significativamente maiores que o mínimo estabelecido pelo referencial normativo, indicando aptidão para utilização em sub-bases;
- todos os solos apresentaram redução significativa da deformação plástica, com uma redução média de 72%. O solo S1/S1KR20, teve o deslocamento permanente total reduzido em 86%;
- a composição inicial dos solos em termos de percentual de argila foi considerada um fator importante em se tratando do resultado do Módulo de Resiliência dos solos estabilizados. Maiores incrementos de MR foram observados em solos com menores teores de argila, uma vez que solos

argilosos já apresentavam maior resiliência, indicando o potencial do CP-KR em aumentar a resiliência dos solos menos coesos.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A utilização do CP-KR com estabilizador de solos para pavimentação se mostrou promissora, com base no resultados obtidos neste trabalho. Para aprofundamento dos estudos com CP-KR sugere-se a continuidade, com base nos seguintes pontos:

- Avaliar o comportamento do solos estabilizados com CP-KR em função dos índices físicos, quando não atendidos os valores indicados nas normas nacionais para execução de sub-bases e bases estabilizadas granulometricamente;
- Avaliar o comportamento mecânico e mecanísticos das misturas estabilizadas com CP-KR ao longo de períodos superiores ao utilizados neste estudo (4 dias);
- Aprofundar os estudos acerca da Deformação Permanente em solos estabilizados com CP-KR e as consequências no dimensionamento dos pavimentos;
- Realizar estudos mecanísticos completos de solos estabilizados com CP-KR e avaliar o desempenho do pavimento com base no MeDiNa.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6.459**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6.508**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7.182**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9.895**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7.180**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2016b.

BALAGUERA, Alejandra *et al.* **Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review**. [S. l.]: Elsevier B.V., 2018.

BRIDI, Lucas Oliveira. **Estudo do efeito da estabilização com coproduto de dessulfuração KR sob as propriedades físicas, mecânicas e químicas de solos com diferentes teores de finos**. 2020. - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, 2020.

CHEN, Jian Shih; WEI, Shih Hsiu. Engineering properties and performance of asphalt mixtures incorporating steel slag. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 128, p. 148–153, 2016.

CHO, Bongsuk; CHOI, Hyeonggil. Physical and chemical properties of concrete using GGBFS-KR slag-gypsum binder. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 123, p. 436–443, 2016.

CNT, Conferência Nacional de Transportes. Pesquisa CNT de Rodovias. São Paulo, 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de implantação básica de rodovia**. Rio de Janeiro - RJ: [s. n.], 2010a. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea)

de-manuais/vigentes/742\_manual\_de\_implantacao\_basica.pdf. Acesso em: 12 fev. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro - RJ: [s. n.], 2006. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/719\\_manual\\_de\\_pavimentacao.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/719_manual_de_pavimentacao.pdf). Acesso em: 22 jan. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Pavimentação rodoviária-Base estabilizada granulometricamente com Açobrita®-Especificação de serviço - NORMA DNIT 406/2017-ES**. Rio de Janeiro - RJ: [s. n.], 2017. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit\\_406\\_2017\\_es-2.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_406_2017_es-2.pdf). Acesso em: 14 fev. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Pavimentação-Base de solo melhorado com cimento-Especificação de serviço - NORMA DNIT 142/2010 -ES**. Rio de Janeiro - RJ: [s. n.], 2010b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Pavimentação-Base estabilizada granulometricamente-Especificação de serviço**. Rio de Janeiro - RJ: [s. n.], 2010c. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit\\_141\\_2010\\_es-1.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_141_2010_es-1.pdf). Acesso em: 23 jan. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Pavimentação-Solo-Cal-Adição de cal para Estabilização de camada de Sub-base - NORMA DNIT 421/2019-ES**. Rio de Janeiro - RJ: [s. n.], 2019a. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit\\_421\\_2019\\_es-2.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_421_2019_es-2.pdf). Acesso em: 12 fev. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Pavimentação-Solo-Cal-Estimativa do teor mínimo de cal para estabilização química de solo-Método de ensaio - NORMA DNIT419/2019-ME**. [S. l.: s. n.], 2019b.

Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit419\\_2019\\_me.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit419_2019_me.pdf). Acesso em: 18 fev. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma 134/2018 - ME. Pavimentação-Solos-Determinação do módulo de resiliência-Método de ensaio**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma 139/2010 - ES. Pavimentação-Sub-base estabilizada granulometricamente-Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2010.

DÍAZ-PILONETA, Marina *et al.* Comprehensive analysis of steel slag as aggregate for road construction: Experimental testing and environmental impact assessment. **Materials**, [s. l.], v. 14, n. 13, 2021.

FERREIRA, Victor J. *et al.* Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: Technical requirements and environmental impact assessment. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 130, p. 175–186, 2016.

FIROOZI, Ali Akbar *et al.* Fundamentals of soil stabilization. **International Journal of Geo-Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 1, 2017a.

FIROOZI, Ali Akbar *et al.* Fundamentals of soil stabilization. **International Journal of Geo-Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 1, 2017b.

FRANÇA, Fabrício Carlos. **Estabilização química de solos para fins rodoviários: Estudo de caso com o produto RBI Grade 81**. 2003. - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2003.

GAUTAM, Pradeep Kumar *et al.* **Sustainable use of waste in flexible pavement: A review**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2018.

GOMES, Guilherme J.C. *et al.* A sustainability-oriented framework for the application of industrial byproducts to the base layers of low-volume roads. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 295, 2021.

GU, Xingyu *et al.* Application of secondary steel slag in subgrade: Performance evaluation and enhancement. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 181, p. 102–108, 2018.

JAMSHIDI, Ali *et al.* Performance of pavements incorporating industrial byproducts: A state-of-the-art study. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 164, p. 367–388, 2017.

KUO, Wen Ten. Properties of compressed concrete paving units made produced using desulfurization slag. **Environmental Progress and Sustainable Energy**, [s. l.], v. 34, n. 5, p. 1365–1371, 2015.

KUO, Wen Ten; HOU, Tsung Chin. Engineering properties of alkali-activated binders by use of desulfurization slag and GGBFS. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 66, p. 229–234, 2014.

LIN, Yong *et al.* Calcium carbonate synthesis from Kambara reactor desulphurization slag via indirect carbonation for CO<sub>2</sub> capture and utilization. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 351, 2024.

LOUREIRO, Carlos D.A. *et al.* Steel Slag and Recycled Concrete Aggregates: Replacing Quarries to Supply Sustainable Materials for the Asphalt Paving Industry. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 14, n. 9, 2022.

MAGALHÃES, A. J.; GOMES, G. J.C.; PIRES, P. J.M. Toward improved performance of unpaved roads: laboratory tests and field investigation of a soil-byproduct base layer. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 184–198, 2020.

MENDOZA, Luis Eduardo Causado. **Utilização do pó de escória de desulfuração do reator Kambara como agente estabilizador de solo argiloso para camadas de pavimentação**. 2023. Dissertação - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

NEPOMUCENO, Daiana Valt. **Avaliação em campo de estrutura de pavimento incorporando solo estabilizado com coproduto de aciaria KR sujeita à carregamento com simulador HVS e comparação com previsões de desempenho segundo o novo Método Brasileiro de Dimensionamento Medina**. 2019. - UFES, Vitoria - ES, 2019.

NGUYEN, Bao Thach; MOHAJERANI, Abbas. 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**, [s. l.], v. 7, p. 59–70, 2016.

NÓBREGA, Maria Teresa. **Características e Mecanismos de estabilização de solos tropicais com cal cimento em pista experimental**. 1995. - Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 1995.

OLIVEIRA, Caroline Forestti. **Uso de coproduto de dessulfuração de Reator Kambara como agente estabilizante de solos para fins de pavimentação**. 2018. - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, 2018.

OLIVEIRA, Caroline Forestti; PIRES, Patrício José Moreira; TEIXEIRA, Jamilla Emi Sudo Lutf. Physical, mechanical, and microstructure investigation of tropical clayey soils stabilised with desulfurisation slag for pavement application. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 1442–1453, 2021.

PICOLI, Hully Carvalho. **Estabilização de solos com coproduto de coqueira FGD e cimento Portland para uso em camadas de pavimentação**. 2020. - Universidade Federal do Espírito Santo, VITÓRIA - ES, 2020.

PIRES, Patrício Moreira *et al.* Laboratory and Field Evaluation of KR Slag–Stabilized Soil for Paving Applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 31, n. 9, p. 04019182, 2019.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Cement-Treated Base (CTB)**. [S. l.], 2019. Disponível em: [https://www.cement.org/cement-concrete/cement-concrete-applications/cement-based-pavements/cement-treated-base-\(ctb\)](https://www.cement.org/cement-concrete/cement-concrete-applications/cement-based-pavements/cement-treated-base-(ctb)). Acesso em: 12 fev. 2022.

RODRIGUES, Klaus Henrique de Paula. **Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração**. 2018. - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação - Volume I**. 2. ed. São Paulo - SP: [s. n.], 2008.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação - Volume II**. 2. ed. São Paulo - SP: [s. n.], 2001. Disponível em: Acesso em: 23 jan. 2022.

SHENG, Guanghong *et al.* Potential Reuse of Slag from the Kambara Reactor Desulfurization Process of Iron in an Acidic Mine Drainage Treatment. **Journal of Environmental Engineering**, [s. l.], v. 140, n. 7, p. 04014023, 2014.

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

TONG, Zhibo *et al.* Characterization and Valorization of Kanbara Reactor Desulfurization Waste Slag of Hot Metal Pretreatment. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 1–8, 2016.

YILMAZ, Fatih; DEMİR, Ersin. Strength and Durability Performance of Clayey Soil Stabilized with Lime and Marble Powder. **Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi**, [s. l.], p. 511–520, 2021.