



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE RUSSAS**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**JOCÁSSIA MARIA DE OLIVEIRA DE LIMA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO ESTABILIZADO  
COM CIMENTO E REFORÇADO COM FIBRA DE COCO PARA FINS DE  
PAVIMENTAÇÃO**

**RUSSAS**  
**2026**

JOCÁSSIA MARIA DE OLIVEIRA DE LIMA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO ESTABILIZADO COM  
CIMENTO E REFORÇADO COM FIBRA DE COCO PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal do Ceará – Campus de  
Russas, como requisito parcial à obtenção do  
título de bacharel em Engenharia.

Orientador: Prof. Dra. Mylene de Melo Vieira

RUSSAS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

L698a     Lima, Jocássia Maria de Oliveira de.  
            Análise do comportamento mecânico de um solo estabilizado com cimento e reforçado com fibra de  
            coco para fins de pavimentação / Jocássia Maria de Oliveira de Lima. – 2026.  
            93 f. : il. color.

            Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,  
            Curso de Engenharia Civil, Russas, 2026.  
            Orientação: Profa. Dra. My.

            1. Solo-cimento. 2. Reforço de solos. 3. Fibra de coco. 4. Pavimentação. I. Título.

CDD 620

---

JOCÁSSIA MARIA DE OLIVEIRA DE LIMA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO ESTABILIZADO COM  
CIMENTO E REFORÇADO COM FIBRA DE COCO PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal do Ceará – Campus de  
Russas, como requisito parcial à obtenção do  
título de bacharel em Engenharia

Aprovada em: 08/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Mylene de Melo Viera (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Daniela Lima Machado da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Me. Gilmário da Costa Ribeiro  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha estimada avó, Francisca Rodrigues  
Filha, socialmente conhecida como Chaguinha  
da Avon (*in memorian*), este trabalho é  
dedicado à senhora, que sempre foi uma fonte  
inesgotável de inspiração. Com todo o meu  
amor.

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos, primeiramente, a Deus, por todas as bênçãos que me proporcionou durante toda minha vida e em minha trajetória acadêmica, sem as quais jamais conseguiram chegar até aqui.

À minha mãe, Maria Irene de Oliveira, por seu amor incondicional e por não medir esforços para manter minha educação, sendo minha maior apoiadora.

À minha vó Chaguinha, por todo amor, dedicação, cuidado e incentivo, os quais foram essenciais pra minha formação. Sendo seu grande sonho me ver formada, espero que Deus, em sua infinita bondade, possa permitir que ela veja este momento.

À minha irmã, Maria Jocasta de Oliveira de Lima, por ser meu suporte em todas as dificuldades encontradas na vida e nesse trajeto acadêmico.

À minha tia, Maria de Fátima da Silva, por tudo que faz por mim, sendo um pilar essencial para minha vida.

A todos os professores que tive a honra de ser aluna, pelos conhecimentos transmitidos, que corroboraram para minha formação tanto acadêmica como pessoal.

Aos colegas da graduação, pelos bons momentos de companheirismo compartilhados, de modo particular aos meus grandes amigos Paulo Filho, Rayanne Sousa e Thalyta Gomes.

Aos técnicos administrativos, que prestaram total auxílio em todos os momentos necessários, transcendendo a relação profissional e tornando-se amigos.

À todas as amigas que acompanharam os passos desafiadores para conclusão desde trabalho, em especial a Aniely Gadelha, Georrane Freitas, Lara Hannyella, Ranieria Lima, Thainara Marcedo, Liv Louise e Deyvid Moura.

À técnica laboratorial, Myckelle, por toda sua disponibilidade, assistência e incentivo durante o período de realização dos ensaios.

À equipe do Laboratório de Solos do CT Asfalto, Assis e Ricardo, por toda ajuda nos ensaios.

À Rafaela Cavalcante por todo amparo prestando quando retornei a Russas para a realização dos ensaios, me socorrendo, sempre que necessário.

Aos membros da banca, Profa. Dra. Daniela Lima Machado da Silva. e Gilmário da Costa Ribeiro, pela disponibilidade em avaliar este trabalho.

À minha orientadora, Profa. Dra. Mylene de Melo Viera, por toda paciência, acolhimento e suporte. Obrigado por nunca ter desistido de mim, serei eternamente grata.

## RESUMO

Solos disponíveis em jazidas locais nem sempre apresentam características geotécnicas compatíveis com as exigências estruturais das camadas de pavimentos, tornando necessária a adoção de técnicas de estabilização e reforço. A estabilização com cimento é amplamente utilizada nesse contexto, porém pode resultar em materiais com comportamento frágil e elevada suscetibilidade à fissuração. Como alternativa, a incorporação de fibras naturais assume o papel de reforço estrutural dessas misturas, além de promover o reaproveitamento de resíduos. Dessa forma, o presente trabalho avaliou o comportamento mecânico de misturas de solo estabilizado com cimento, nos teores de 5%, 7% e 9%, associadas à incorporação de fibra de coco nos teores de 0,5%, 0,75% e 1%, com comprimento de 25 mm. Para fins comparativos, também foram analisadas misturas de solo natural, solo-cimento e solo-fibra. O programa experimental compreendeu a caracterização geotécnica do solo e a avaliação do comportamento mecânico por meio dos ensaios de compactação, Resistência à Compressão Simples (RCS), Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD), Índice de Suporte Califórnia (CBR) e Módulo de Resiliência (MR). Com base nos dados experimentais, realizou-se o dimensionamento mecanístico-empírico de estruturas de pavimento com o auxílio do *software* MeDiNa. Os resultados evidenciaram que as misturas solo-cimento, sem reforço, não atingiram o valor mínimo de 2,1 MPa de RCS exigido por norma para aplicação em camadas de base, enquanto a incorporação da fibra de coco promoveu incrementos de resistência capazes de atender a esse requisito, além de alterar o modo de ruptura, resultando em um comportamento estrutural mais dúctil. Entre as composições avaliadas, a mistura contendo 5% de cimento e 1% de fibra apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho mecânico e consumo de insumos. O dimensionamento realizado no MeDiNa indicou que as misturas solo-cimento-fibra atendem aos critérios de desempenho para diferentes níveis de tráfego, inclusive em cenários de tráfego mais elevado, desde que sejam adotadas espessuras estruturais compatíveis com as exigências de projeto. Evidenciou-se o potencial desse material compósito para aplicação em camadas de base de pavimentos, enquanto as misturas solo-fibra mostraram-se adequadas para sub-base, revelando o potencial técnico das soluções, a redução do consumo de aglomerante e a destinação ambientalmente adequada do resíduo.

**Palavras-chave:** solo-cimento; reforço de solos; fibra de coco; pavimentação.

## ABSTRACT

Soils available in local borrow pits do not always present geotechnical characteristics compatible with the structural requirements of pavement layers, making it necessary to adopt stabilization and reinforcement techniques. Cement stabilization is widely used in this context; however, it may result in materials with brittle behavior and high susceptibility to cracking. As an alternative, the incorporation of natural fibers plays the role of structural reinforcement in these mixtures, while also promoting the reuse of residues. In this context, this study evaluated the mechanical behavior of soil mixtures stabilized with cement contents of 5%, 7%, and 9%, combined with the incorporation of coconut fiber at contents of 0.25%, 0.75%, and 1%, with a fixed length of 25 mm. For comparative purposes, natural soil, soil–cement, and soil–fiber mixtures were also analyzed. The experimental program comprised geotechnical characterization of the soil, compaction tests, and mechanical evaluation through Unconfined Compressive Strength (UCS), Indirect Tensile Strength (ITS), California Bearing Ratio (CBR), and Resilient Modulus (RM) tests. Based on the experimental data, mechanistic–empirical pavement design was performed using the MeDiNa software. The results showed that soil–cement mixtures without reinforcement did not reach the minimum UCS value of 2.1 MPa required by standards for application as base layers, whereas the incorporation of coconut fiber promoted strength gains sufficient to meet this requirement, in addition to modifying the failure mode, resulting in a more ductile structural behavior. Among the compositions evaluated, the mixture containing 5% cement and 1% fiber presented the best balance between mechanical performance and material consumption. The mechanistic–empirical design results indicated that soil–cement–fiber mixtures meet the performance criteria for different traffic levels, including higher traffic scenarios, provided that structural layer thicknesses compatible with design requirements are adopted. The potential of this composite material for application in pavement base layers was evidenced, while soil–fiber mixtures proved suitable for subbase layers, highlighting the technical feasibility of the solutions, reduced binder consumption, and environmentally appropriate destination of the residue.

**Keywords:** soil–cement; soil reinforcement; coconut fiber; pavement.

## LISTA DE FIGURAS

|           |                                                                                                                                                      |    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1  | – Estrutura em camadas de um pavimento.....                                                                                                          | 19 |
| Figura 2  | – Classificação de bases e sub-bases Flexíveis e Semirrígidas.....                                                                                   | 20 |
| Figura 3  | – Classificação de Solos AASHTO.....                                                                                                                 | 25 |
| Figura 4  | – Ábaco da classificação MCT.....                                                                                                                    | 26 |
| Figura 5  | – Fluxograma da pesquisa.....                                                                                                                        | 40 |
| Figura 6  | – Localização da jazida municipal tendo como referência a UFC campus de Russas .....                                                                 | 41 |
| Figura 7  | – Talude de corte presente na jazida.....                                                                                                            | 41 |
| Figura 8  | – Fibra de coco .....                                                                                                                                | 42 |
| Figura 9  | – Fluxograma do programa experimental.....                                                                                                           | 45 |
| Figura 10 | – Preparação do solo: a) Solo destorroado; b) Repetidor de amostra.....                                                                              | 47 |
| Figura 11 | – Ensaio de análise granulométrica por peneiramento.....                                                                                             | 47 |
| Figura 12 | – Limites de consistência.....                                                                                                                       | 48 |
| Figura 13 | – Ensaio de Limite de Liquidez: a) Materiais utilizados para o ensaio de LL; b) Ranhura feita na massa de solo disposta na concha de Casagrande..... | 49 |
| Figura 14 | – Materiais utilizados para o Ensaio de Limite de Plasticidade.....                                                                                  | 49 |
| Figura 15 | – Ensaio para a classificação MCT: a) Compactador Mini-MCV; b) Corpos de prova imersos em água no ensaio de Perda de Massa por Imersão.....          | 51 |
| Figura 16 | – Ensaio de compactação do solo: a) Materiais utilizados para o ensaio de Compactação; b) CP desagregado para retirada da amostra.....               | 53 |
| Figura 17 | – Moldagem do ensaio de compactação do solo-fibra.....                                                                                               | 54 |
| Figura 18 | – Ensaio de Resistência à Compressão Simples .....                                                                                                   | 55 |
| Figura 19 | – Ensaio de Resistência à Compressão Por Tração Diametral.....                                                                                       | 57 |
| Figura 20 | – Corpo de prova do CBR pós ensaio .....                                                                                                             | 58 |
| Figura 21 | – Ensaio do Módulo de Resiliência .....                                                                                                              | 60 |
| Figura 22 | – Ábaco da metodologia MCT.....                                                                                                                      | 66 |
| Figura 23 | – Fissura no corpo de prova do ensaio de RCS.....                                                                                                    | 69 |
| Figura 24 | – Comparação das superfícies dos Modelos Compostos.....                                                                                              | 73 |
| Figura 25 | – Estruturas Resultantes das análises de dimensionamento pelo método MeDiNa.....                                                                     | 76 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|           |                                                                        |    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 | – Curva Granulométrica do Solo Natural.....                            | 64 |
| Gráfico 2 | – Curvas de compactação do SN, S5C E S0,5F.....                        | 67 |
| Gráfico 3 | – Resultados da Resistência à Compressão Simples.....                  | 68 |
| Gráfico 4 | – Curva de RCS x Deformação do S5C1F.....                              | 69 |
| Gráfico 5 | – Resultado da Resistência à Compressão por Tração Diametral.....      | 70 |
| Gráfico 6 | – Resultado do ensaio de Índice de Suporte Califórnia.....             | 71 |
| Gráfico 7 | – Valores de Módulo de Resiliência Médio pela norma DNIT 134/2018-ME.. | 74 |
| Gráfico 8 | – Valores de Módulo de Resiliência Médio pela norma DNIT 181/2018-ME.. | 75 |

## LISTA DE TABELAS

|          |                                                                    |    |
|----------|--------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 | – Requisitos mínimos para materiais das camadas do pavimento ..... | 21 |
| Tabela 2 | – Nomenclatura e composição das misturas.....                      | 44 |
| Tabela 3 | – Normas para os ensaios de caracterização do solo.....            | 46 |
| Tabela 4 | – Normas para análise do comportamento mecânico.....               | 52 |
| Tabela 5 | – Estruturas analisadas.....                                       | 61 |
| Tabela 6 | – Análise Granulométrica do Solo Natural.....                      | 63 |
| Tabela 7 | – Resultados do Limites de Atterberg.....                          | 64 |
| Tabela 8 | – Resultados da metodologia MCT.....                               | 66 |
| Tabela 9 | – Resultados Módulo de Resiliência.....                            | 72 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |                                                                            |
|--------|----------------------------------------------------------------------------|
| AASHTO | <i>American Association of State Highways and Transportation Officials</i> |
| ABCP   | Associação Brasileira de Cimento Portland                                  |
| CAGECE | Companhia de Água e Esgoto do Ceará                                        |
| CBR    | <i>California Bearing Ratio</i>                                            |
| CNT    | Confederação Nacional do Transporte                                        |
| CP     | Corpo de prova                                                             |
| DNER   | Departamento de Engenharia de Transportes                                  |
| DNIT   | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem                               |
| DP     | Deformação Permanente                                                      |
| HRB    | <i>Highway Research Board</i>                                              |
| IP     | Índice de Plasticidade                                                     |
| ISC    | Índice de Suporte Califórnia                                               |
| LCC    | Laboratório de Construção Civil do campus de Russas                        |
| LL     | Limite de Liquidez                                                         |
| LP     | Limite de Plasticidade                                                     |
| MCT    | Miniatura, Compactado, Tropical                                            |
| MR     | Módulo de Resiliência                                                      |
| RCS    | Resistência à Compressão Simples                                           |
| SUCS   | Sistema Unificado de Classificação de Solos                                |
| TRB    | Transportation Research Board                                              |
| UFC    | Universidade Federal do Ceará                                              |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                 |                                                                                        |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| $c'$            | Coeficiente de deformabilidade da classificação MCT                                    |
| $C_c$           | Coeficiente de curvatura                                                               |
| $C_u$           | Coeficiente de uniformidade                                                            |
| $d'$            | Coeficiente que caracteriza o ramo seco da curva de compactação obtida pelo método MCT |
| $e'$            | Índice da classificação MCT calculado em função de $P_i$ e $d'$                        |
| $K_1, K_2, K_3$ | Parâmetros da regressão para o Módulo de Resiliência                                   |
| $P_i$           | Perda de massa por imersão                                                             |
| $\Sigma d$      | Tensão desvio                                                                          |
| $\sigma_3$      | Tensão confinante                                                                      |
| $R^2$           | Coeficiente de determinação                                                            |
| $\epsilon_r$    | Deformação Resiliente                                                                  |

## SUMÁRIO

|                |                                                                      |           |
|----------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                              | <b>16</b> |
| <b>1.1</b>     | <b>Problema da pesquisa .....</b>                                    | <b>17</b> |
| <b>1.2</b>     | <b>Justificativa .....</b>                                           | <b>17</b> |
| <b>1.3</b>     | <b>Objetivos .....</b>                                               | <b>18</b> |
| <i>1.3.1</i>   | <i>Objetivo Geral .....</i>                                          | <i>18</i> |
| <i>1.3.1</i>   | <i>Objetivos específicos .....</i>                                   | <i>18</i> |
| <b>2</b>       | <b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                                     | <b>19</b> |
| <b>2.1</b>     | <b>Pavimento .....</b>                                               | <b>19</b> |
| <i>2.1.1</i>   | <i>Definição .....</i>                                               | <i>19</i> |
| <i>2.1.2</i>   | <i>Camadas do Pavimento.....</i>                                     | <i>19</i> |
| <i>2.1.3</i>   | <i>Propriedades requeridas dos materiais para pavimentação .....</i> | <i>21</i> |
| <b>2.2</b>     | <b>Solos.....</b>                                                    | <b>22</b> |
| <i>2.2.1</i>   | <i>Solos Tropicais.....</i>                                          | <i>23</i> |
| <i>2.2.2</i>   | <i>Classificação dos Solos.....</i>                                  | <i>23</i> |
| <i>2.2.2.1</i> | <i>Sistema de Classificação AASHTO .....</i>                         | <i>24</i> |
| <i>2.2.2.2</i> | <i>Classificação MCT .....</i>                                       | <i>25</i> |
| <b>2.3</b>     | <b>Estabilização de Solos.....</b>                                   | <b>27</b> |
| <i>2.3.1</i>   | <i>Estabilização mecânica.....</i>                                   | <i>28</i> |
| <i>2.3.2</i>   | <i>Estabilização química .....</i>                                   | <i>29</i> |
| <i>2.3.3</i>   | <i>Estabilização do solo com cimento.....</i>                        | <i>30</i> |
| <b>2.4</b>     | <b>Reforço de solos .....</b>                                        | <b>32</b> |
| <b>2.5</b>     | <b>Materiais compósitos.....</b>                                     | <b>33</b> |
| <b>2.6</b>     | <b>Fibra de coco .....</b>                                           | <b>35</b> |
| <b>2.7</b>     | <b>Estudos relacionados .....</b>                                    | <b>36</b> |
| <b>3</b>       | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                     | <b>40</b> |
| <b>3.2</b>     | <b>Materiais.....</b>                                                | <b>40</b> |
| <i>3.2.1</i>   | <i>Solo.....</i>                                                     | <i>40</i> |
| <i>3.2.2</i>   | <i>Cimento.....</i>                                                  | <i>42</i> |
| <i>3.2.3</i>   | <i>Fibra de Coco.....</i>                                            | <i>42</i> |
| <i>3.2.4</i>   | <i>Água.....</i>                                                     | <i>43</i> |
| <b>3.3</b>     | <b>Definição das misturas para os ensaios laboratoriais.....</b>     | <b>43</b> |

|                |                                                                                                                                      |           |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.4</b>     | <b>Programa experimental.....</b>                                                                                                    | <b>45</b> |
| <b>3.4.1</b>   | <b><i>Caracterização do solo.....</i></b>                                                                                            | <b>46</b> |
| <b>3.4.1.1</b> | <b><i>Preparação do solo.....</i></b>                                                                                                | <b>46</b> |
| <b>3.4.1.2</b> | <b><i>Análise granulometria por peneiramento.....</i></b>                                                                            | <b>47</b> |
| <b>3.4.1.3</b> | <b><i>Limites de consistência.....</i></b>                                                                                           | <b>48</b> |
| <b>3.4.1.4</b> | <b><i>Ensaio para classificação MCT.....</i></b>                                                                                     | <b>50</b> |
| <b>3.4.2</b>   | <b><i>Ensaio para análise do comportamento mecânico dos materiais.....</i></b>                                                       | <b>51</b> |
| <b>3.4.2.1</b> | <b><i>Ensaio de compactação.....</i></b>                                                                                             | <b>52</b> |
| <b>3.4.2.2</b> | <b><i>Ensaio de Resistência à Compressão Simples .....</i></b>                                                                       | <b>54</b> |
| <b>3.4.2.3</b> | <b><i>Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral .....</i></b>                                                          | <b>56</b> |
| <b>3.4.2.4</b> | <b><i>California Bearing Ratio.....</i></b>                                                                                          | <b>57</b> |
| <b>3.4.2.5</b> | <b><i>Módulo de Resiliência .....</i></b>                                                                                            | <b>58</b> |
| <b>3.5</b>     | <b>Dimensionamento do pavimento .....</b>                                                                                            | <b>61</b> |
| <b>4</b>       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                                                                                                  | <b>63</b> |
| <b>4.1</b>     | <b>Caracterização do Solo.....</b>                                                                                                   | <b>63</b> |
| <b>4.1.1</b>   | <b><i>Análise Granulométrica do Solo.....</i></b>                                                                                    | <b>63</b> |
| <b>4.1.2</b>   | <b><i>Limites de Atterberg.....</i></b>                                                                                              | <b>64</b> |
| <b>4.1.3</b>   | <b><i>Classificação do Solo.....</i></b>                                                                                             | <b>65</b> |
| <b>4.1.3.1</b> | <b><i>Classificação AASHTO.....</i></b>                                                                                              | <b>65</b> |
| <b>4.1.3.2</b> | <b><i>Classificação MCT.....</i></b>                                                                                                 | <b>65</b> |
| <b>4.2</b>     | <b>Análises do comportamento mecânico.....</b>                                                                                       | <b>66</b> |
| <b>4.2.1</b>   | <b><i>Curvas de compactação.....</i></b>                                                                                             | <b>66</b> |
| <b>4.2.2</b>   | <b><i>Resistência à Compressão Simples.....</i></b>                                                                                  | <b>67</b> |
| <b>4.2.3</b>   | <b><i>Resistência à Compressão por Tração Diametral.....</i></b>                                                                     | <b>70</b> |
| <b>4.2.4</b>   | <b><i>Índice de Suporte Califórnia.....</i></b>                                                                                      | <b>71</b> |
| <b>4.2.5</b>   | <b><i>Módulo de Resiliência.....</i></b>                                                                                             | <b>72</b> |
| <b>4.3</b>     | <b>Dimensionamento do pavimento .....</b>                                                                                            | <b>75</b> |
| <b>5</b>       | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                                                                                               | <b>78</b> |
| <b>5.1</b>     | <b>Sugestões para trabalhos futuros.....</b>                                                                                         | <b>79</b> |
|                | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                             | <b>80</b> |
|                | <b>APÊNDICE A – ENSAIO DE MÓDULO RESILIENTE: MODELOS<br/>CLÁSSICOS EMPREGADOS NA DESCRIÇÃO DO<br/>COMPORTAMENTO RESILIENTE .....</b> | <b>87</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura rodoviária constitui um componente essencial do sistema de transporte de um país, sendo fundamental para o seu desenvolvimento econômico e social. No Brasil, conforme pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT), o modal rodoviário predomina na matriz de transportes, concentrando cerca de 65% da movimentação de mercadorias e 95% do transporte de passageiros. Entretanto, dos 111.853 km de rodovias avaliadas em âmbito nacional, aproximadamente 67% foram classificados como Regular, Ruim ou Péssimo (CNT, 2024).

Esses dados evidenciam a necessidade de intervenções voltadas à melhoria da infraestrutura viária brasileira, buscando diminuir patologias e aumentar a vida útil das estruturas. A escassez de materiais que atendam aos requisitos mínimos estabelecidos em norma, tem direcionado esforços científicos para o estudo de soluções alternativas, que conciliem desempenho técnico, viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental.

Em obras de pavimentação, o uso do solo local é preferível, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Entretanto, em muitos casos, esses solos não apresentam propriedades geotécnicas adequadas para aplicação direta nas camadas estruturais do pavimento. Nessas situações, torna-se necessária a adoção de técnicas capazes de melhorar suas características, por meio da estabilização, que pode ser associada ou não a métodos de reforço.

Para Spetch (2000), a incorporação do cimento ao solo possibilita sua aplicação em diversas obras de engenharia, como fundações superficiais, proteção de taludes, barragens e, especialmente, em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Contudo, quando empregadas em pavimentação, as misturas solo-cimento podem apresentar comportamento frágil e elevada suscetibilidade à fissuração.

Nesse contexto, o uso de fibras como técnica de reforço, de acordo com Casagrande (2005), contribui para o controle da propagação de fissuras, melhorando o comportamento mecânico do material no estado pós-fissuração. Ressalta-se que embora as fibras não impeçam o surgimento das fissuras, são capazes de atuar na redistribuição das tensões ao longo da matriz cimentada.

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe o estudo da incorporação de fibra de coco, proveniente de resíduo sólido, em misturas solo-cimento. Busca-se analisar a viabilidade técnica desse material compósito para aplicação em camadas de base ou sub-base de pavimentos rodoviários, de forma a aliar desempenho mecânico, aproveitamento de materiais locais e benefícios ambientais.

## **1.1 Problema de pesquisa**

Um dos principais problemas que afetam as obras de pavimentação rodoviária se refere à indisponibilidade de materiais que atendam às exigências geotécnicas estabelecidas em projeto. Isso decorre tanto do uso indiscriminado dos recursos naturais quanto da escassez desses materiais em determinadas regiões. A busca por novas jazidas com características adequadas exige investimentos financeiros, sobretudo em razão das grandes distâncias de transporte e das áreas destinadas ao descarte do material excedente. A logística contribui para a intensificação de impactos ambientais associados às atividades de extração e transporte de materiais.

As camadas que compõem a infraestrutura da pavimentação demandam extensos volumes de solo, o que implica na grande quantidade de materiais destinados à melhoria de suas propriedades físicas e mecânicas. Nesse cenário, os resíduos de origem orgânica, como a fibra de coco, são uma alternativa de incorporação de baixo custo, ampla disponibilidade e fácil obtenção. A utilização desse resíduo confere um novo uso ao material, agrega valor e contribui para a resolução dos problemas relacionados ao manejo inadequado dos resíduos sólidos.

Dessa maneira, emerge a problemática que orienta o presente estudo: qual a viabilidade técnica da incorporação da fibra de coco em misturas solo-cimento, considerando seus efeitos sobre as propriedades do material e sua aplicabilidade na infraestrutura viária?

## **1.2 Justificativa**

Conforme dados da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2023), o Brasil registrou uma produção aproximada de 1,93 bilhão de frutos de coco-da-baía. Por sua vez, o estado do Ceará destacou-se como líder nacional, com 518,9 milhões de frutos, representando cerca de 26,89% do total produzido no país. O grande volume de produção no estado reflete também no aumento da geração de resíduos, especialmente após o consumo da sua água.

Nesse contexto, Lacerda e Leitão (2021) apontam que o coco representa aproximadamente 80% do resíduo encontrado nas praias brasileiras, sendo comumente descartado de forma inadequada e destinado a lixões ou aterros sanitários. Outro apontamento feito por eles, trata-se de um resíduo de elevado volume cuja decomposição pode levar até 12 anos, além de apresentar potencial de emissão de gases de efeito estufa e de favorecer a proliferação de vetores transmissores de doenças.

Portanto, torna-se fundamental analisar o potencial de reaproveitamento da fibra de coco como material alternativo, como por exemplo, no reforço do solo. Nesse sentido, sua utilização pode ser interessante diante das limitações estruturais da região, caracterizada por solos com desempenho mecânico inadequado para pavimentação. Logo, demanda por soluções técnicas economicamente viáveis.

Além disso, essa abordagem está alinhada aos princípios estabelecidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que enfatiza a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

Entretanto, apesar do potencial técnico e ambiental associado ao uso da fibra de coco como material alternativo em misturas solo-cimento, há poucos estudos que avaliem o seu desempenho geotécnico e mecânico quando aplicada às camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, especialmente em condições locais.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo Geral***

Analisar a influência da incorporação da fibra de coco nas propriedades mecânicas de mistura de solo-cimento visando seu uso na pavimentação.

#### ***1.3.2 Objetivos específicos***

- Avaliar o desempenho mecânico do solo natural, das misturas de solo estabilizado com cimento nos teores de 5%, 7% e 9%, das misturas de solo reforçado com fibra de coco nos teores de 0,5%, 0,75% e 1%, com comprimento de 25 mm, e dos compósitos solo-cimento-fibra resultantes da combinação desses teores;
- Identificar, dentre as misturas avaliadas, aquela que apresenta o melhor equilíbrio entre desempenho mecânico e consumo de materiais, indicando seu potencial de aplicação em camadas de base ou sub-base de pavimentos rodoviários;
- Dimensionar estruturas de pavimento com o uso do *software* MeDiNa, aplicando o compósito solo-cimento-fibra.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Pavimento

#### 2.1.1 Definição

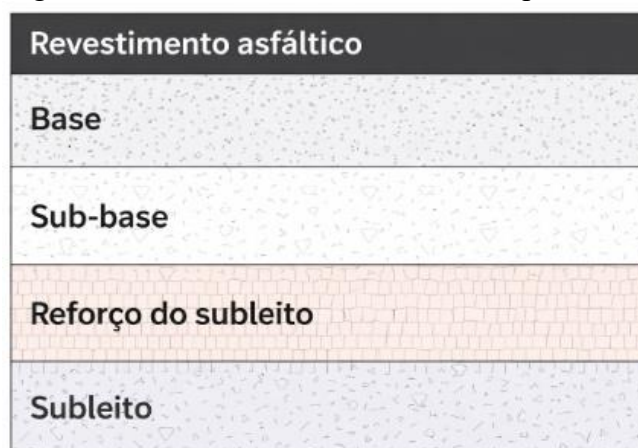
De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), o pavimento rodoviário pode ser compreendido como uma superestrutura formada por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentadas sobre o subleito, que corresponde ao terreno de fundação considerado teoricamente como um semiespaço infinito. O subleito deve ser objeto de estudo até a profundidade em que as solicitações decorrentes do tráfego atuam, a qual, do ponto de vista prático, situa-se entre 0,60 m e 1,50 m.

Consequentemente, por condicionantes de ordem técnico-econômica, o pavimento é concebido como uma estrutura multicamadas, composta por materiais com distintas resistências e comportamentos deformacionais, o que confere elevado grau de complexidade às análises de tensões e deformações geradas pelas cargas do tráfego (DNIT, 2006).

#### 2.1.2 Camadas do Pavimento

Quanto à sua estrutura, Bernucci et al. (2022) define que o pavimento rodoviário é concebido como um sistema constituído por múltiplas camadas, conforme aponta a Figura 1, geralmente compostas por revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e o próprio subleito, executadas sobre a superfície final de terraplenagem.

Figura 1 – Estrutura em camadas de um pavimento



Fonte: Bernucci et al., 2022.

A estrutura é projetada de forma técnica e economicamente adequada para resistir aos esforços decorrentes das solicitações do tráfego de veículos e das ações climáticas, ao mesmo tempo em que proporciona melhores condições de rolamento aos usuários (Bernucci et al., 2022).

De acordo com o DNIT (2017), as camadas que compõem a estrutura do pavimento possuem funções específicas e complementares, agindo como elementos responsáveis pela distribuição e absorção dos esforços provenientes do tráfego. A base tem a função principal de resistir às cargas verticais dos veículos e distribuí-las ao subleito, servindo de suporte direto ao revestimento. A sub-base, posicionada imediatamente abaixo da base, exerce funções semelhantes, sendo utilizada, sobretudo, por razões de ordem econômica, com o objetivo de reduzir a espessura da base.

Por sua vez, o subleito corresponde ao maciço de fundação que sustenta todas as camadas do pavimento, enquanto o reforço do subleito consiste em uma camada adicional executada sobre esse maciço para atender a exigências técnicas ou econômicas. Já o revestimento constitui a camada superficial, caracterizada por maior impermeabilidade, responsável por receber as ações do tráfego, proporcionar melhores condições de rolamento e resistir aos esforços horizontais atuantes, garantindo maior durabilidade à superfície da via (DNIT, 2017).

Ainda de acordo com o DNIT (2006), as camadas de base e sub-base também podem ser classificadas como rígidas, semirrígidas e flexíveis. A Figura 2 descreve a classificação das camadas consideradas flexíveis ou semirrígidas, presente no manual de pavimentação.

Figura 2 – Classificação de bases e sub-bases Flexíveis e Semirrígidas



Fonte: DNIT (2006)

### 2.1.3 Propriedades requeridas dos materiais para pavimentação

Considerando o pavimento rodoviário como uma estrutura multicamadas, cada uma de suas camadas deve atender a requisitos mínimos de resistência e estabilidade, de modo a assegurar o desempenho estrutural e funcional da via. No contexto brasileiro, esses requisitos são estabelecidos pelo Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), que define parâmetros geotécnicos e físicos para os materiais do subleito e das camadas estruturais do pavimento, conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Requisitos mínimos para materiais das camadas do pavimento

| Camada              | CBR                         | Expansão     | LL          | IP         |
|---------------------|-----------------------------|--------------|-------------|------------|
| Subleito            | $\geq 2\%$                  | $\leq 2\%$   | -           | -          |
| Reforço de Subleito | Maior que o CBR do subleito | $\leq 1\%$   | -           | -          |
| Sub-base            | $\geq 20\%$                 | $\leq 1\%$   | -           | -          |
| Base                | $\geq 80\%$                 | $\leq 0,5\%$ | $\leq 25\%$ | $\leq 6\%$ |

Fonte: DNIT (2006)

A partir desses critérios, o subleito como elemento de fundação de toda a estrutura do pavimento, deve apresentar capacidade mínima de suporte, expressa por um valor de CBR igual ou superior a 2%, além de expansão máxima limitada a 2%. Esses critérios visam garantir que o maciço de fundação seja capaz de receber e transmitir as solicitações provenientes das camadas superiores, mantendo a estabilidade global da estrutura. Para essa camada, não são especificados limites de liquidez e plasticidade, uma vez que sua avaliação estrutural está diretamente relacionada à capacidade de suporte e ao comportamento volumétrico do solo.

O reforço do subleito, quando adotado, integra a estrutura do pavimento com a finalidade de melhorar as condições mecânicas do terreno de fundação. Nessa condição, essa camada deve apresentar CBR superior ao do subleito natural e expansão máxima de 1%, contribuindo para a redução das tensões transmitidas às camadas inferiores e possibilitando soluções estruturalmente adequadas sob o ponto de vista técnico e econômico.

A sub-base constitui uma camada intermediária da estrutura, atuando na distribuição das cargas verticais e na proteção do subleito. Para que desempenhe adequadamente essa função estrutural, o DNIT (2006) estabelece que os materiais da sub-base apresentem CBR mínimo de 20% e expansão limitada a 1%. Esses parâmetros asseguram um

comportamento mecânico compatível com as solicitações impostas pelo tráfego e com a interação entre as camadas do pavimento.

A base, camada estrutural imediatamente inferior ao revestimento, é submetida às maiores solicitações mecânicas da estrutura do pavimento. Em razão disso, apresenta os requisitos mais rigorosos dentre as camadas granulares, devendo possuir CBR mínimo de 80%, expansão máxima de 0,5%, limite de liquidez inferior ou igual a 25% e índice de plasticidade máximo de 6%, conforme indicado no Tabela 1. Esses critérios garantem elevada resistência, baixa deformabilidade e adequada estabilidade volumétrica, fundamentais para o desempenho estrutural do pavimento.

Ademais, o DNIT (2006) admite a utilização de materiais com valores de limite de liquidez superiores a 25% e/ou índice de plasticidade superiores a 6% na camada de base, desde que apresentem fração de areia superior a 30% em sua composição granulométrica e atendam simultaneamente aos requisitos de CBR e expansão. Essa abordagem evidencia a necessidade de compatibilizar critérios técnicos e econômicos no projeto estrutural do pavimento, sem comprometer sua capacidade de suporte e durabilidade.

Dessa forma, os parâmetros apresentados reforçam a importância da adequada caracterização dos materiais que compõem a estrutura do pavimento, assegurando que cada camada desempenhe sua função estrutural de maneira integrada e eficiente ao longo da vida útil da rodovia.

## **2.2 Solos**

Conforme Ortigão (2007), os solos são formados a partir da deterioração das rochas por meio do processo de intemperismo, o qual pode ocorrer de forma física ou química. O intemperismo físico caracteriza-se pela fragmentação da rocha sem alteração de sua composição mineralógica, sendo provocado por agentes como a ação do vento, água, geleiras e pela alternância de ciclos de congelamento e descongelamento que atuam nas fissuras da rocha. Como resultado desse processo, o solo formado preserva essencialmente a mesma composição da rocha de origem (Knappett e Craig, 2014).

O intemperismo químico, por sua vez, é caracterizado pela transformação dos minerais originais da rocha em novos minerais por meio de reações químicas (Das e Sobhan, 2014). Segundo Pinto (2006), a presença da fauna e flora provoca o ataque químico, devido aos processos de hidratação, oxidação, hidrólise, lixiviação, troca de cátions e carbonatação.

Todos estes processos, que são mais recorrentes em climas quentes do que em climas frios, geram solos de partículas pequenas que se diferenciam pelo tamanho e composição química.

Essas particularidades dão origem aos solos tropicais, que apresentam características diferenciadas de regiões não tropicais em função das condições climáticas predominantes em sua formação.

### ***2.2.1 Solos Tropicais***

Os solos tropicais apresentam peculiaridades de propriedades e de comportamento geotécnico quando comparados aos solos de regiões de clima temperado ou frio, em função dos processos geológicos e pedológicos típicos das regiões tropicais úmidas. Assim, a caracterização de um solo como tropical não está associada apenas à sua localização geográfica ou climática, mas, sobretudo, às suas características estruturais e mecânicas, que condicionam sua resposta em obras de engenharia (Nogami e Villibor, 1995).

De modo geral, os solos tropicais podem ser agrupados em dois grandes conjuntos, conforme o grau de intemperismo: solos saprolíticos e solos lateríticos. Os solos saprolíticos, também denominados residuais jovens, preservam parcialmente a estrutura da rocha de origem e tendem a apresentar maior heterogeneidade, menor capacidade de suporte e comportamento desfavorável à pavimentação, especialmente em função da presença de argilominerais primários e do potencial de expansão (Nogami e Villibor, 1995; Carvalho et al., 2023).

Em contraste, os solos lateríticos resultam de processos avançados de intemperismo, sendo considerados solos maduros, com microestrutura mais estável, maior coesão e, em geral, melhor desempenho mecânico, o que favorece sua aplicação em camadas de pavimentos (Villibor e Alves, 2019; Reschetti, 2008).

Apesar da ampla ocorrência dos solos lateríticos no território brasileiro, materiais potencialmente adequados ao uso em pavimentação são, por vezes, descartados quando avaliados por sistemas tradicionais de classificação, que não capturam adequadamente as particularidades estruturais e comportamentais dos solos tropicais. Essa limitação motivou o desenvolvimento de metodologias alternativas de classificação, como a Metodologia MCT, proposta por Nogami e Villibor (1981), mais compatível com o comportamento desses materiais e com as condições de solicitação típicas de obras rodoviárias.

### ***2.2.2 Classificação dos Solos***

Das e Sobhan (2014) elucidam que os diferentes solos com propriedades similares podem ser classificados em grupos e subgrupos, com base em seu comportamento, do ponto de vista da engenharia. Os sistemas de classificação fornecem uma linguagem padronizada para se expressar de modo conciso, as características gerais dos solos, cuja variedade é muito ampla, sem descrições aprofundadas.

A intenção da classificação dos solos, sob a ótica da engenharia, é estimar o provável comportamento do solo, bem como orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema (Pinto, 2006).

As classificações geotécnicas tradicionais se baseiam na distribuição granulométrica e na plasticidade. Dentre estas, destaca-se o Sistema de Classificação AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Originalmente desenvolvido pelo Highway Research Board (HRB), órgão que hoje integra o Transportation Research Board (TRB), motivo pelo qual a classificação também é conhecida como HRB.

Nogami e Villibor (1981) ressaltam que, por terem sido desenvolvidas em países de clima temperado, essas classificações apresentam limitações quando aplicadas aos solos tropicais. Tais limitações decorrem das particularidades desses solos, especialmente relacionadas à sua gênese, estrutura e comportamento mecânico e hidráulico. Em função dessas incompatibilidades, os autores propuseram a Classificação MCT, especificamente voltada para solos tropicais, baseada no comportamento mecânico e hidráulico dos materiais.

#### *2.2.2.1 Sistema de Classificação AASHTO*

De acordo com Das e Sobhan (2014), o sistema de classificação de solos da AASHTO foi desenvolvido originalmente em 1929 pela Administração de Estradas Públicas dos Estados Unidos da América. Ao longo dos anos, o sistema passou por diversas revisões, sendo a versão atualmente adotada proposta em 1945 pelo *Committee on Classification of Materials for Subgrades and Granular Type Roads*, vinculado ao Highway Research Board (HRB), instituição que posteriormente deu origem ao Transportation Research Board (TRB).

Como exposto pelo DNIT (2006), no caso dessa classificação, os solos são reunidos em grupos e subgrupos, em função de sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo. Pinto (2006) indica que, neste sistema, a classificação também se inicia pela constatação da porcentagem de material que passa na peneira de abertura de malha de 0,075 mm (nº 200), sendo considerados solos de granulação grosseira os que possuem menos de 35% passando

nesta peneira. Estes são os solos dos grupos A-1, A-2 e A-3. Os solos com mais de 35% passando na peneira de 0,075 mm (nº 200) formam os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7.

A definição do grupo final do solo é realizada por meio da eliminação sucessiva de alternativas na tabela apresentada na Figura 3. O primeiro grupo, da esquerda para a direita, cujos critérios sejam atendidos pelos resultados dos ensaios do solo, corresponde à sua classificação final, conforme indicado pelo DNIT (2006).

Figura 3 - Classificação de Solos AASHTO

| CLASSIFICAÇÃO GERAL                                  | MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200 |           |         |                                            |           |           |           | MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS |         |                 |                                 |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------|---------|--------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------|---------|-----------------|---------------------------------|
| CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS                              | A - 1                                                          |           | A - 3   | A - 2                                      |           |           |           | A - 4                       | A - 5   | A - 6           | A - 7<br>A - 7 - 5<br>A - 7 - 6 |
|                                                      | A - 1 - A                                                      | A - 1 - B |         | A - 2 - 4                                  | A - 2 - 5 | A - 2 - 6 | A - 2 - 7 |                             |         |                 |                                 |
| Granulometria - % passando na peneira                |                                                                |           |         |                                            |           |           |           |                             |         |                 |                                 |
| Nº 10                                                | 50 máx.                                                        |           |         |                                            |           |           |           |                             |         |                 |                                 |
| Nº 40                                                | 30 máx.                                                        | 50 máx.   | 51 min. |                                            |           |           |           |                             |         |                 |                                 |
| Nº 200                                               | 15 máx.                                                        | 25 máx.   | 10 máx. | 35 máx.                                    | 35 máx.   | 35 máx.   | 35 máx.   | 36 min.                     | 36 min. | 36 min.         | 36 min.                         |
| Características da fração passando na peneira Nº 40: |                                                                |           |         |                                            |           |           |           |                             |         |                 |                                 |
| Limite de Liquidez                                   |                                                                |           |         | 40 máx.                                    | 41 min.   | 40 máx.   | 41 min.   | 40 máx.                     | 41 min. | 40 máx.         | 41 min.                         |
| Índice de Plasticidade                               | 6 máx.                                                         | 6 máx.    | NP      | 10 máx.                                    | 10 máx.   | 11 min.   | 11 min.   | 10 máx.                     | 10 máx. | 11 min.         | 11 min.*                        |
| Índice de Grupo                                      | 0                                                              | 0         | 0       | 0                                          | 0         | 4 máx.    | 4 max.    | 8 máx.                      | 12 máx. | 16 máx.         | 20 máx.                         |
| Materiais constituintes                              | Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia                  |           |         | Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos |           |           |           | Solos siltosos              |         | Solos argilosos |                                 |
| Comportamento como subleito                          | Excelente a bom                                                |           |         |                                            |           |           |           | Sofrível a mau              |         |                 |                                 |

Fonte: DNIT (2006)

#### 2.2.2.2 Classificação MCT

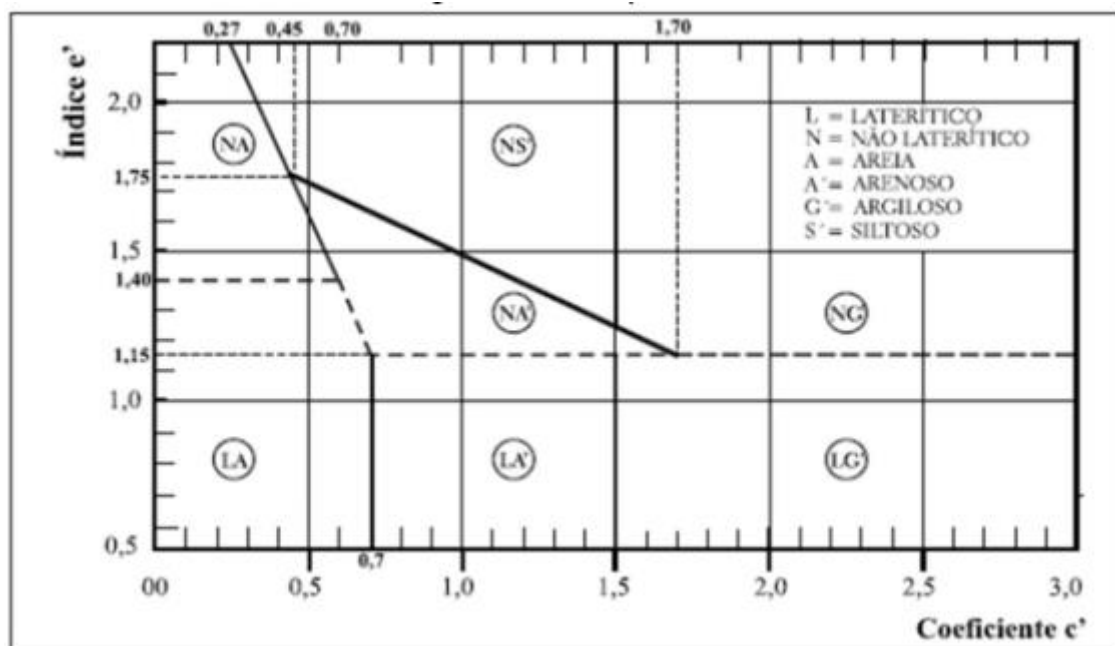
Para Nogami e Villibor (1995), os solos tropicais apresentam desempenho insatisfatório para aplicação em bases e sub-bases de pavimentos quando avaliados exclusivamente pelos sistemas tradicionais de classificação de solos. Essa limitação decorre do fato de que tais sistemas foram desenvolvidos nos Estados Unidos, em regiões de clima temperado e frio, sendo, portanto, representativos dos solos formados sob essas condições climáticas. Em função dessa incompatibilidade, os autores propuseram o sistema de

classificação MCT — Miniatura, Compactado e Tropical —, especificamente desenvolvido para caracterizar o comportamento dos solos tropicais.

A classificação MCT permite identificar características relevantes dos solos relacionadas ao seu comportamento laterítico ou saprolítico, mensurando propriedades fundamentais para a aplicação em pavimentação rodoviária (DNIT, 2006). Nessa sistemática, os solos de comportamento laterítico são representados pela letra L e subdivididos em três grupos: LA, correspondente à areia laterítica; LA', referente ao solo arenoso laterítico; e LG', caracterizado como solo argiloso laterítico.

Por sua vez, os solos de comportamento não laterítico são designados pela letra N e classificados em quatro grupos: NA, que engloba areias, siltes e misturas de areias e siltes com predominância de grãos de quartzo e ou mica; NA', composto por misturas de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico; NS', correspondente aos solos siltosos não lateríticos; e NG', referente aos solos argilosos não lateríticos. A Figura 4 apresenta o ábaco utilizado na Classificação MCT.

Figura 4 - Ábaco da classificação MCT



Fonte: Nogami e Villibor (2009)

A metodologia MCT engloba os ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão, que permitem a determinação dos parâmetros  $c'$ ,  $d'$ ,  $e'$  e  $P_i$ . Com base nesses parâmetros, realiza-se a classificação do solo segundo a metodologia MCT, conforme estabelecido pelo DNIT (2006). O primeiro parâmetro, denominado índice  $c'$ , é obtido a partir

do ensaio de Mini-MCV e corresponde à inclinação da curva que relaciona a diferença de altura ao índice Mini-MCV, considerando-se o valor do índice igual a 10. O índice  $e'$  é determinado por meio da Equação 1:

$$e' = \sqrt[3]{\frac{20}{d'} + \frac{P_i}{100}} \quad (1)$$

O parâmetro  $d'$  representa o coeficiente angular do trecho mais inclinado do ramo seco da curva de compactação, correspondente à aplicação de 12 golpes. Já o parâmetro  $P_i$  corresponde à porcentagem de perda de massa por imersão, determinada a partir da massa específica, ou altura, obtida para o índice Mini-MCV igual a 10 durante o ensaio de Mini-MCV.

### 2.3 Estabilização de Solos

A estabilização de solo, de acordo com Vizcarra (2010), corresponde à modificação das propriedades originais do solo para garantir desempenho estrutural do ponto de vista da engenharia. Essa modificação busca tornar o material mais adequado para suportar solicitações mecânicas, reduzir deformações excessivas e aumentar a durabilidade das camadas estruturais, especialmente em obras de pavimentação. Segundo o autor, o processo de estabilização envolve a alteração de características físicas, químicas ou físico-químicas do solo, de modo a proporcionar melhorias em seu comportamento estrutural e funcional.

No contexto da engenharia rodoviária, a estabilização de solos desempenha um papel estratégico ao permitir o aproveitamento de materiais disponíveis localmente que, em sua condição natural, não atenderiam aos requisitos mínimos de desempenho para aplicação em camadas estruturais, como base, sub-base e reforço de subleito. A estabilização pode também contribuir para a redução de espessuras de projeto, prolongamento da vida útil do pavimento e diminuição de falhas associadas a deformações excessivas e perda de suporte (Medina e Motta, 2015).

Conforme destacado por Fernandes (2016), determinados solos argilosos apresentam elevada compressibilidade e baixa permeabilidade à água, o que pode resultar em recalques excessivos e lentos quando submetidos a cargas estruturais. Esse comportamento compromete tanto a durabilidade quanto a segurança das obras, tornando indispensável a modificação de suas propriedades por meio de técnicas adequadas de estabilização.

A resistência de um solo, segundo Dias (2012), depende do estado de tensões ao qual estava submetido antes da carga aplicada e do seu teor de umidade, de modo que o comportamento de um solo estabilizado varia conforme as condições ambientais e operacionais. Estabilizar um solo em que a umidade e o estado de tensões permanecem praticamente constantes é uma tarefa distinta de intervir em terrenos superficiais de encostas, sujeitos a grandes variações de umidade, ou em pavimentos rodoviários, onde tanto a umidade quanto as tensões sofrem oscilações consideráveis. O autor acrescenta que, embora fundações superficiais também possam ser afetadas por essas variações, é nos pavimentos que a estabilização exige maior rigor técnico.

O caráter de durabilidade e resistência, fundamental à estabilização, é ressaltado por Vogt (1971), que entende esse tratamento como qualquer método capaz de assegurar que o solo suporte esforços provenientes do tráfego e dos agentes climáticos ao longo de todas as estações do ano. Nesse sentido, estabilizar significa aplicar métodos tecnológicos, como compactação, correção granulométrica ou adição de agentes químicos, com o objetivo de ajustar parâmetros de engenharia para atender a necessidades específicas do projeto (Oliveira, 2018).

Desse modo, para Batalione (2007) a estabilização do solo pode ser compreendida como um conjunto de intervenções destinadas a modificar as propriedades naturais do terreno, tornando-o mais resistente, durável e adequado às demandas da engenharia. Na sequência, serão apresentados e discutidos os principais métodos de estabilização empregados em obras geotécnicas e de pavimentação.

### ***2.3.1 Estabilização mecânica***

A estabilização mecânica, segundo Soliz (2007), consiste no processo pelo qual o solo ou os materiais granulares têm seu comportamento melhorado exclusivamente pela compressão e pelo adensamento, sem o uso de ligantes hidráulicos ou asfálticos. Esse tipo de estabilização se aplica a bases, sub-bases e reforços de subleito, podendo também ocorrer em revestimentos primários formados por agregados compactados sobre o leito da via.

A compactação é o principal mecanismo da estabilização mecânica, sendo definida por Pinto (2006) a aplicação controlada de energia mecânica com o objetivo de reduzir o índice de vazios do solo. O processo resulta na diminuição dos recalques, aumento da resistência ao cisalhamento e redução da permeabilidade à água, fatores que contribuem para o melhor desempenho estrutural dos pavimentos.

A eficiência da compactação está associada ao teor de umidade do solo. Para um controle rígido da umidade e da densificação, é indispensável verificar se o solo está na umidade ótima obtida em laboratório ou próximo dela, devendo o material ser areado quando estiver excessivamente úmido ou umedecido quando apresentar umidade abaixo do ideal (Balbo, 2007). Pinto (2006) reforça que o controle adequado da umidade é essencial para que o solo atinja as densidades especificadas em projeto.

Outro fator determinante no desempenho do solo compactado é a energia de compactação aplicada. Lima (2020) salienta que solos compactados sob diferentes energias apresentam variações expressivas de resistência. Para o mesmo solo, energias mais elevadas tendem a produzir Índices de Suporte Califórnia (ISC) maiores, enquanto energias menores resultam em valores inferiores, demonstrando que a intensidade da compactação influencia o desempenho mecânico do material.

Além da compactação, a estabilização mecânica pode envolver a correção granulométrica, que consiste na mistura controlada de dois ou mais solos, na busca de alcançar granulometria mais estável e material menos deformável quando compactado. A prática é comum quando o solo natural não apresenta as propriedades necessárias para o uso em pavimentação, de modo que a mistura permite obter um novo produto com características mais equilibradas, tanto em termos de distribuição de tamanhos quanto de comportamento sob cargas (Pereira, 2012).

Considerando o apresentado, a estabilização mecânica se caracteriza por envolver a compactação rigorosa do solo, aliada ao controle de umidade, ao uso de energias adequadas e, quando necessário, à correção granulométrica. Os procedimentos, quando executados de acordo com os parâmetros definidos em laboratório e verificados em campo, conferem ao solo maior resistência, menor deformação, permeabilidade à água reduzida e desempenho adequado para uso em pavimentação.

### ***2.3.2 Estabilização química***

A técnica de estabilização química consiste na mistura do solo natural com aditivos, com o propósito de melhorar seu comportamento, especialmente frente à umidade. A mistura do solo natural com aditivos capazes de alterar suas características físicas, químicas ou físico-químicas, tornam o material mais estável e adequado para aplicações em engenharia, especialmente em pavimentação rodoviária (Huss, 2018).

O emprego da técnica é relevante para solos finos, que apresentam elevada variação de capacidade de suporte quando submetidos à presença de água (Huss, 2018). De acordo com Das e Sobhan (2014), o aumento da umidade em solos argilosos provoca elevação da plasticidade e redução da resistência ao cisalhamento, favorecendo deformações excessivas. Nesse contexto, a estabilização química surge como alternativa para diminuir esses efeitos, promovendo maior estabilidade volumétrica e estrutural.

No emprego de ligantes hidráulicos, como cal, cimento Portland e pozolanas, Simoni (2019) afirma que o processo de estabilização ocorre por meio da formação de ligações entre as partículas do solo, resultantes de reações químicas que promovem a aglomeração e a cimentação do material. Segundo a autora, essas reações contribuem para o aumento da resistência mecânica, redução da plasticidade e melhoria do comportamento do solo frente às solicitações de tráfego e às variações ambientais. A escolha do ligante mais adequado depende das características do solo, das exigências do projeto e do desempenho esperado da mistura estabilizada.

Além dos ligantes tradicionais, Almeida et al. (2019) demonstraram o potencial de outros materiais como estabilizantes, como a sílica ativa. Embora nem sempre seja suficiente para permitir o uso em camadas estruturais superiores, o componente pode multiplicar por mais de três vezes a resistência do solo, e, em alguns casos, possibilitando sua aplicação em níveis mais nobres, desde que sua resistência de partida não seja extremamente baixa. O aditivo também influencia aumento da plasticidade, elevação da umidade ótima e redução da massa específica dos sólidos e da densidade seca, embora apresente como desvantagem o incremento da expansão do solo tratado.

Observa-se que a escolha do produto mais adequado para estabilização química depende das propriedades originais do material, demandas do projeto, disponibilidade dos aditivos e requisitos de resistência, deformabilidade e estabilidade volumétrica. A técnica, quando bem dimensionada e aplicada, permite transformar solos inadequados em materiais aptos a desempenhar funções essenciais na pavimentação e em outras obras de engenharia.

### ***2.3.3 Estabilização do solo com cimento***

A estabilização com cimento apresenta diferentes denominações, como solo melhorado, solo modificado, solo tratado, solo artificialmente cimentado e solo-cimento, todas relacionadas ao mesmo princípio de incorporar cimento Portland ao solo com a finalidade de aprimorar seu comportamento. Apesar da variedade de termos, todos se referem ao mesmo

princípio fundamental, a incorporação de cimento Portland ao solo para melhorar seu comportamento mecânico e durabilidade frente às ações do tráfego e do meio ambiente (Ferreira, 2019).

Para Simoni (2019), a combinação de solo com cimento e materiais granulares pode ser uma alternativa eficiente para compor bases e sub-bases de pavimentos submetidos a tráfego intenso. A mistura é capaz de alcançar altos níveis de rigidez e resistência, além de contribuir para o controle da expansão do solo e para o aproveitamento de materiais reciclados. Os ganhos, por sua vez, decorrem do processo de estabilização física e química promovido pelo cimento, que segundo a autora, tende a melhorar o comportamento mecânico da camada e prolongar sua vida útil, geralmente com custos menores em comparação a outras soluções construtivas.

Na presença de umidade, as reações de hidratação do cimento originam produtos como silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, responsáveis por estabelecer ligações entre as partículas, formando uma estrutura mais resistente (Sales, 2022). O cimento Portland é um dos aditivos químicos mais usuais na estabilização, responsável por ganhos imediatos de resistência, embora sua consolidação completa exija um período de cura prolongado, normalmente em torno de 28 dias (Alencar, 2022).

Quanto aos benefícios advindos do processo, estão o aumento da resistência, menor plasticidade, melhoria da trabalhabilidade e redução da variação volumétrica. Esses efeitos tornam o material mais adequado para aplicações estruturais em pavimentação, principalmente quando se busca desempenho satisfatório em condições de umidade variável (Almeida et al., 2019).

O ganho de resistência, conforme Balbo (2007), resulta da hidratação dos compostos presentes no cimento, entre eles silicato tricálcico (C3S), silicato dicálcico (C2S), aluminato tricálcico (C3A) e ferro-aluminato tetracálcico (C4AF), cada qual responsável por ritmos distintos de reação, liberação de calor e evolução da resistência. Na perspectiva do autor, quando pequenas quantidades de cimento são empregadas, o objetivo principal é reduzir a sensibilidade do solo à água e diminuir sua tendência expansiva. À medida que o teor de cimento se aproxima daquele utilizado em misturas solo-cimento, o material passa a apresentar maior rigidez e um comportamento mais próximo ao de um compósito, capaz inclusive de resistir a esforços de flexão.

Ainda conforme Balbo (2007), o comportamento do cimento na matriz solo-aditivo está diretamente relacionado à granulometria e ao índice de vazios do material estabilizado. Em seu estudo, o autor percebeu que quando aplicado em solos finos, o cimento atua predominantemente como uma pasta que reveste as partículas, formando uma matriz capaz de

imobilizar os grãos. Em materiais granulares, por outro lado, o revestimento não ocorre de forma completa, resultando em ligações pontuais que geram uma coesão aparente entre as partículas.

## **2.4 Reforço de solos**

O reforço de solos, segundo Jamaldar et al. (2024), consiste na incorporação de elementos resistentes à massa do solo com a finalidade de melhorar seu comportamento mecânico, na busca de aumentar a resistência ao cisalhamento, reduzir deformações e controlar mecanismos de ruptura, sem promover grandes alterações na composição química do material natural. Para os autores, o princípio do reforço fundamenta-se na interação entre o solo e o elemento inserido, que atua na redistribuição de tensões, limitando deslocamentos e conferindo maior estabilidade ao sistema.

Diferentemente da estabilização química, o reforço de solos depende da mobilização de esforços de tração nos materiais inseridos, como fibras, geossintéticos ou inclusões naturais. Nessa condição, o solo reforçado passa a se comportar como um material compósito, apresentando desempenho mecânico superior quando submetido a carregamentos característicos de obras geotécnicas e de pavimentação (Silveira, 2018).

De acordo com Jamaldar et al. (2024), a inclusão de fibras pode proporcionar ganhos de resistência ao cisalhamento, maior capacidade de absorção de energia e melhor desempenho sob carregamentos cíclicos, características bastante necessárias para aplicações em pavimentação e obras sujeitas à ação repetitiva do tráfego.

No grupo das fibras sintéticas, destacam-se inicialmente as fibras poliméricas, como polipropileno, polietileno, poliéster e poliamida. Specht (2000) detalha que as fibras de polipropileno possuem elevada flexibilidade e boa absorção de impacto, resultado de suas longas cadeias poliméricas, e menciona a versão fibrilada, cujos filamentos se abrem em forma de malha, favorecendo a ancoragem no solo. Segundo Reis (2022), fibras poliméricas apresentam baixo módulo de elasticidade, alta deformabilidade, resistência química e sensibilidade à radiação ultravioleta, além de baixa aderência ao solo.

Por sua vez, o poliéster é mais rígido e resistente que o polipropileno, enquanto o polietileno convencional possui módulo reduzido e baixa aderência, embora apresente boa durabilidade em ambientes alcalinos (Specht, 2000; Taylor, 2013; Reis, 2022). Já as poliamidas, como o Kevlar, apresentam elevada resistência e natureza orgânica, cujo desempenho depende da configuração molecular (Taylor, 2013).

Quanto às fibras metálicas, as mais utilizadas são as de aço, nas quais a falha do compósito ocorre geralmente pelo arrancamento, e não pela ruptura da fibra (Specht, 2000). O grupo das fibras minerais consiste em fibras de vidro, carbono e amianto. As fibras de vidro apresentam boa resistência química, estabilidade dimensional e resistência mecânica (Bernardina, 2019), enquanto as fibras de carbono possuem elevado módulo elástico e alta resistência à tração (Taylor, 2013). Em relação ao amianto, embora apresente boas propriedades mecânicas e aderência, seu uso é limitado devido aos riscos à saúde associados à inalação (Bolaños, 2013).

Avanços recentes na área de reforço de solos têm priorizado o uso de fibras recicláveis, impulsionados por demandas ambientais e pela necessidade de redução de resíduos. O desempenho das misturas solo-fibra depende de diversos fatores, como o tipo de fibra, sua proporção, comprimento, espessura e durabilidade, bem como da compatibilidade entre a matriz do solo e o material de reforço (Costa, 2024).

Nesse contexto, destacam-se as fibras vegetais, como juta, sisal, curauá, linho, coco, algodão e bambu, que representam alternativas renováveis, leves e de baixo custo. Essas fibras apresentam boa relação resistência-densidade e podem ser obtidas de diferentes partes das plantas, o que amplia sua disponibilidade e potencial de aplicação (Reis, 2022; Costa, 2024). Do ponto de vista estrutural, são constituídas majoritariamente por celulose, hemicelulose e lignina, com menores teores de pectina (Bernardina, 2019). O interesse crescente por seu uso está associado à demanda por materiais sustentáveis, considerando características como leveza, biodegradabilidade e viabilidade econômica (Galvão Neto, 2023).

As fibras naturais apresentam uma série de pontos positivos, entre eles Bolaños (2013) menciona o fato de serem materiais renováveis, de baixo custo e totalmente biodegradáveis, além de não oferecerem toxicidade e permitirem um manuseio simples por sua baixa densidade. Também se destacam por não serem abrasivas durante o processamento, fornecerem bom isolamento térmico e acústico e apresentarem níveis aceitáveis de resistência específica.

Contudo, seu uso como reforço em compósitos cimentícios envolve algumas limitações. Reis (2022) aponta a vulnerabilidade a fungos e bactérias e que ambientes alcalinos intensificam a sua deterioração. Alternativas para reduzir a degradação incluem diminuir a alcalinidade da matriz, aplicar barreiras impermeabilizantes ou utilizar tratamentos para reduzir a higroscopicidade, ainda que nem todas as soluções sejam plenamente aplicáveis quando o reforço é realizado diretamente no solo.

## 2.5 Materiais compósitos

O uso de materiais compósitos no reforço de solos está relacionado à capacidade desses sistemas de combinar duas fases distintas, resultando em um material com propriedades superiores às dos componentes isolados (Specht, 2000). Em geral, esses materiais são constituídos por uma fase contínua, denominada matriz, responsável pela coesão e pela transferência de esforços, e por uma fase descontínua de reforço, que contribui para o aumento da resistência e da capacidade de deformação do sistema (Taylor, 2013).

Casagrande (2005) destaca que a técnica de reforço de solos com fibras insere-se no campo dos materiais compósitos e tem despertado crescente interesse no meio científico, em função de seu potencial para a melhoria do comportamento mecânico dos solos. A abordagem baseia-se na incorporação de fibras à matriz do solo, formando um compósito no qual esses elementos atuam como reforço, contribuindo para o aumento da resistência, da ductilidade e da estabilidade global.

Specht (2000) caracteriza essas misturas como combinações de materiais cujas propriedades individuais são inferiores às do produto final. Quando reforçados com fibras, esses compósitos apresentam vantagens no comportamento pós-fissuração, pois as fibras controlam a abertura das trincas e redistribuem as tensões na matriz, aumentando a energia absorvida e tornando o material mais tenaz e dúctil.

Contudo, o uso de fibras naturais como reforço em compósitos apresenta algumas limitações. Uma vez que em seu estado bruto, elas tendem a apresentar adesão insuficiente a diferentes matrizes de solos, além de baixa estabilidade térmica e elevada absorção de umidade, fatores que podem comprometer o desempenho do compósito. Dessa forma, torna-se comum a aplicação de tratamentos químicos, mecânicos ou térmicos com o objetivo de melhorar suas propriedades. Outro aspecto refere-se à possibilidade de degradação das fibras quando armazenadas por longos períodos, o que pode afetar sua eficiência como material de reforço (Bolaños, 2013).

Diante as observações, a adoção de um material compósito formado por solo-cimento reforçado com fibras naturais mostra-se tecnicamente fundamentada. Contudo, conforme discutido por Little e Nair (2009), materiais cimentados tendem a apresentar comportamento mais frágil, com limitada capacidade de deformação após o pico de resistência, podendo comprometer o desempenho da camada sob carregamentos repetitivos.

Logo, a incorporação de fibras à matriz solo-cimento insere-se no conceito de material compósito, atuando na redistribuição de tensões e no controle da propagação de

fissuras. O uso de fibras naturais em matrizes de solo-cimento configura uma estratégia coerente para melhorar o desempenho mecânico do material, conciliando a rigidez proporcionada pelo cimento com maior capacidade de absorção de deformações, conforme os princípios estabelecidos na literatura técnica.

O uso de materiais compósitos no reforço de solo-cimento para pavimentação configura-se como uma alternativa, cuja eficácia depende tanto das propriedades individuais dos materiais quanto da interação entre eles. Nesses termos, Jamaladar et al. (2024) ressaltam que a incorporação de fibras tem se mostrado especialmente promissora, ampliando o campo de aplicação dessa técnica e contribuindo para o desenvolvimento de soluções geotécnicas mais duráveis e ecologicamente responsáveis. Entre as fibras naturais disponíveis, destaca-se a fibra de coco, que tem despertado crescente interesse em razão de sua disponibilidade, resistência e potencial de aplicação no reforço de solos.

## **2.6 Fibra de coco**

A fibra de coco, extraída do mesocarpo do fruto, apresenta características que a tornam um material com importância tanto ambiental quanto técnica. O coco é uma drupa composta por um exocarpo liso, um mesocarpo espesso e fibroso (de onde a fibra é obtida) e um endocarpo rígido que protege a água e a polpa do fruto (Bolaños, 2013). A depender do estágio de maturação, o material apresenta propriedades distintas: cocos verdes, colhidos por volta de seis meses, originam fibras mais claras, macias e menos resistentes, enquanto cocos maduros, colhidos entre 11 e 12 meses, geram fibras escuras, rígidas e mais duráveis devido à maior deposição de lignina nas paredes celulares (Menezes, 2018).

As fibras oriundas se destacam pela elevada durabilidade, atribuída ao teor expressivo de lignina em comparação com outras fibras de origem natural (Bernardina, 2019). A predominância desse componente, aliada a um menor percentual de celulose, também é associada à alta resistência mecânica e ao bom desempenho frente ao envelhecimento natural. Entretanto, esse mesmo fator resulta em menor flexibilidade, especialmente nas fibras provenientes de cocos maduros, o que pode influenciar seu comportamento quando empregada como material de reforço (Menezes, 2018).

Do ponto de vista estrutural, fatores como local de origem, composição química, tipo de fruto, maturação e método de extração influenciam o comportamento mecânico da fibra. Variações no diâmetro alteram o número de células constituintes e o ângulo helicoidal, o que se

reflete na resistência à tração e no módulo elástico, já que defeitos estruturais se tornam mais frequentes em fibras de maior diâmetro (Tomczak, 2010).

A variabilidade natural promove amplitude nos resultados experimentais quando a fibra é incorporada a matrizes frágeis, situação em que o arrancamento tende a ser o mecanismo predominante de ruptura, tornando a aderência fibra-matriz determinante para a tenacidade do compósito (Bernardina, 2019).

Segundo Jamaldar et al. (2024), a rugosidade superficial da fibra de coco favorece a aderência à matriz do solo, promovendo uma transferência mais eficiente de esforços entre o solo e o elemento de reforço. A incorporação adequada da fibra resulta em aumento da resistência ao cisalhamento, redução das deformações axiais e maior resistência residual, além de conferir um comportamento mais dúctil ao solo reforçado. Os aspectos auxiliam nas camadas submetidas a carregamentos repetitivos, como bases e sub-bases de pavimentos.

Ressalta-se que o desempenho do solo reforçado com fibra de coco depende diretamente do teor de fibras, bem como de seu comprimento e da forma de distribuição na matriz do solo. Teores excessivos podem dificultar a compactação e comprometer a eficiência do reforço, evidenciando a necessidade de uma dosagem adequada para garantir o comportamento mecânico desejado (Jamaldar et al., 2024).

Além dos aspectos mecânicos, as fibras de coco carregam implicações ambientais, tendo em vista que a disposição inadequada das cascas em aterros, especialmente sob condições anaeróbicas, promove a emissão de metano, um gás de efeito estufa de alto impacto, ao mesmo tempo em que reduz a vida útil dos aterros e provoca problemas sanitários e gerenciais. Destarte, o aproveitamento dessas fibras também constitui estratégia de redução de impactos ambientais, considerando que o processo de desfibrização pode ser realizado por maceração ou por métodos mecânicos que permitem seu reaproveitamento (Bolaños, 2013).

A incorporação de fibra de coco, mesmo em pequenas quantidades, contribui para tornar o solo mais resistente aos esforços aplicados, sobretudo por aumentar sua ductilidade, característica útil em situações como estabilização de taludes, aterros e outras obras de solo reforçado. Embora os ganhos de resistência ao cisalhamento não superem os do solo natural, a presença das fibras confere ao compósito um comportamento mais plástico e menos suscetível à ruptura frágil. Além disso, o uso da fibra de coco é uma alternativa promissora por agregar valor a um resíduo abundante, transformar um passivo ambiental em recurso útil e possibilitar soluções economicamente mais viáveis e ambientalmente sustentáveis dentro da engenharia civil (Menezes, 2018).

## 2.7 Estudos relacionados

A literatura demonstra interesse no emprego da fibra de coco como reforço geotécnico, especialmente devido ao seu caráter renovável, à sua abundância no Brasil e ao potencial de melhorar propriedades mecânicas de solos utilizados em obras de pavimentação e estabilização. De modo geral, os estudos analisados convergem ao indicar que a fibra pode elevar resistência e ductilidade das misturas, embora sua atuação dependa de fatores como teor incorporado, tratamento superficial, tipo de solo ou matriz cimentada, além das condições ambientais às quais o compósito é submetido.

Os resultados de Costa (2024) mostram que fibras mais finas tendem a aumentar a resistência inicial e modificar o modo de ruptura, tornando o comportamento mais dúctil, ainda que esse ganho diminua ao longo do envelhecimento, com ligeira recuperação causada pela sucção da matriz. O reforço com coco é mais eficiente em aplicações de curto prazo ou em sistemas que necessitam absorver grandes deformações.

A percepção dialoga com a pesquisa de Reis (2022), que observou melhoria na resistência ao cisalhamento e no ISC quando a fibra é adicionada entre 0,5% e 1%, especialmente quando bem distribuída. O estudo apontou ainda que tratamentos térmicos como a hornificação potencializam a resistência da fibra, enquanto tratamentos alcalinos podem provocar efeitos opostos.

Pesquisas anteriores também reforçam esse comportamento: Bolaños (2013) já havia evidenciado ganhos de coesão e leve incremento no ângulo de atrito em misturas solo-fibra, independentemente da forma de preparo das fibras. Bernardina (2019) verificou que o reforço com fibra de coco mantém comportamento strain-hardening e melhora parâmetros de resistência mesmo após vários meses de exposição ambiental, sendo essa fibra menos suscetível à degradação quando comparada a outras de origem vegetal devido ao maior teor de lignina. Santos (2020) constatou que misturas contendo RCC e fibras de coco babaçu apresentam elevação importante na resistência à compressão e redução da porosidade, sugerindo maior proteção frente a processos erosivos e reforçando a viabilidade ambiental desses compósitos.

Anggraini et al. (2015) analisaram a influência da fibra de coco em um solo argiloso altamente plástico (IP=26-30%), tratado com cal, com diferentes tempos de cura. As fibras utilizadas variavam o tamanho de 5 a 15mm e foram feitas misturas com teores de 0, 0,5, 1, 1,5 e 2 %, mais adição de cal de 0 e 5%, para o tempo de cura de 7, 28 e 90 dias. Foram realizados ensaios de Resistência à Compressão por Tração Diametral (RCTD) e Resistência à compressão não confinada (RCS), os resultados apontaram um teor ótimo de 1% de fibra, tanto para a RCTD

quanto para a RCS, sendo a tração mais sensível a estabilização da cal e da fibra de coco. A RTCD aos 90 dias teve um aumento em 4,5 em relação ao solo não tratado, dessa forma os autores concluíram que a fibra de coco é um bom material de reforço de solos, por melhorar de forma significativa as propriedades de engenharia do solo.

Por sua vez, a pesquisa de Menezes (2018) demonstrou que a adição de fibras de coco verde não altera expressivamente as propriedades físicas do solo, mas eleva a resistência e a capacidade de deformação em teores reduzidos (próximos de 0,5% e 0,75%). No entanto, os ganhos no cisalhamento direto foram limitados e o desempenho é influenciado pela homogeneidade da mistura.

No mesmo sentido, Freitas (2022) afirmou que o tratamento superficial da fibra influencia o comportamento do compósito, pois a hornificação aumentou a resistência à tração e melhorou o desempenho ao cisalhamento, enquanto tratamentos com NaOH prejudicaram a integridade da fibra e reduziram sua eficiência como reforço. Além disso, sinais de microfissuras observados após o envelhecimento indicam perda de aderência solo-fibra ao longo do tempo.

Santos (2023), ao comparar reforços naturais (coco, açaí e serragem de bambu), verificou que todos aumentam a resistência inicial do solo argiloso, embora degradem em velocidades distintas. A fibra de coco apresentou desempenho intermediário, mantendo resistência pós-pico e degradando menos que a serragem e o açaí. O estudo atribuiu a degradação ao ataque biológico e a variações químicas observadas por análises de pH e exames microestruturais, reforçando a importância da durabilidade no emprego de fibras naturais.

Em perspectiva experimental semelhante, Aguilar (2015) observou que pequenas quantidades de fibras curtas já são capazes de aumentar a resistência ao cisalhamento de areias, sobretudo pela mobilização de coesão introduzida pelo reforço. O comportamento também foi confirmado em solos finos por Oliveira Júnior (2018), que constatou que teores próximos de 1% maximizam a resistência e a interação solo-fibra, enquanto valores maiores provocam aglomerações prejudiciais. O estudo também evidenciou alterações importantes em propriedades hidro-mecânicas, como a retenção de água e a compressibilidade, influenciadas pelo tipo de contato entre a fibra e os argilominerais.

Já Sotomayor (2014), avaliando o comportamento carga-recalque em ensaios de placa em escala real, comparou dois modos de aplicação das fibras: em manta e dispersas aleatoriamente. O reforço em manta reduziu mais intensamente os recalques, porém favoreceu o surgimento de fissuramento superficial, enquanto a distribuição aleatória reduziu menos os recalques, mas inibiu de forma mais eficaz a propagação das fissuras. Em ambos os casos,

houve maior capacidade de suporte e menor recalque em comparação à areia não reforçada, apontando que diferentes técnicas de inserção das fibras podem produzir respostas mecânicas distintas e ajustáveis à necessidade da obra.

Em matrizes já estabilizadas com cimento, Cabala (2007) analisou reforços de coco e bambu em solo-cimento e constatou que, embora aumentem a tenacidade e a ductilidade, esses materiais provocam redução da resistência mecânica, sobretudo pela baixa aderência entre fibra e matriz cimentada, agravada pela variação dimensional das fibras com a umidade. A pesquisa destaca, porém, que as vantagens pós-pico abrem caminho para uso em situações que exigem absorção de energia, desde que desafios como impermeabilização e adesão sejam superados.

Na área de materiais cimentícios sustentáveis, Rocha (2025) demonstrou que a substituição parcial da areia por pó da casca de coco verde é tecnicamente viável na produção de blocos intertravados, favorecendo propriedades mecânicas e reduzindo emissões. As conclusões reforçam que resíduos lignocelulósicos do coco são compatíveis com matrizes cimentícias, desde que o teor seja otimizado para minimizar absorção hídrica e maximizar a durabilidade.

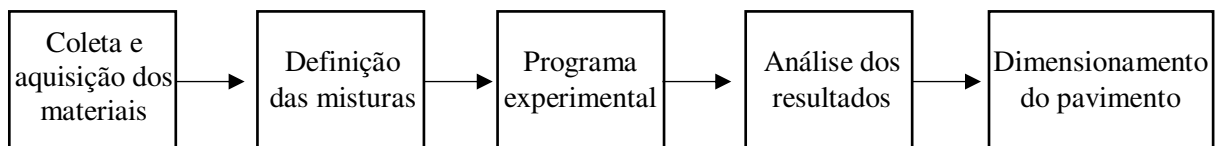
Dentro de uma perspectiva de pavimentação asfáltica, Neves et al. (2022) verificaram que a fibra de coco pode substituir agregados finos como a areia devido a sua granulometria compatível e ao teor significativo de lignina, que confere rigidez e estabilidade ao compósito. O estudo apontou que essa substituição pode melhorar a vida útil do pavimento e reduzir custos e impactos ambientais.

Brito (2022) investigou a utilização da fibra de coco como reforço em misturas cimentadas para pavimentação, considerando compósitos de solo-cimento-fibra e misturas contendo agregados reciclados de resíduos da construção e demolição. A autora verificou que o desempenho das misturas é fortemente dependente do teor de cimento empregado, observando-se melhorias nas propriedades mecânicas em composições com maiores teores (7%). Em contrapartida, para teores mais baixos (5%), foram identificadas reduções pontuais de resistência, tanto em misturas contendo solo quanto agregado reciclado. Independentemente dessas variações, a presença das fibras promoveu alterações no modo de ruptura, conferindo maior ductilidade aos compósitos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo aborda a metodologia adotada neste estudo, conforme sintetizado no fluxograma apresentado na Figura 5. Inicialmente, realizou-se a coleta e a aquisição dos materiais, compreendendo o solo proveniente da jazida municipal de Russas, o cimento CP II E 32 RS e a fibra de coco adquiridos no comércio local, além da água fornecida pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) e da água destilada disponibilizada pelo Laboratório de Química, da Universidade Federal do Ceará (UFC) campus de Russas.

Figura 5 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autora.

Em seguida, realizou-se a etapa de definição das composições das misturas a serem avaliadas experimentalmente. Essa etapa contemplou a escolha dos teores de cimento e de fibra de coco, bem como a padronização do comprimento das fibras, com base em estudos prévios da literatura.

Posteriormente, é apresentado o programa experimental, o qual contempla a caracterização dos materiais, preparação das amostras, métodos de ensaio e operacionalidade dos equipamentos. Os ensaios foram desenvolvidos com base na literatura e em normas técnicas existentes, sendo realizados no Laboratório de Construção Civil (LCC), no campus da UFC de Russas e no Laboratório de Solos do CT Asfalto, no campus da UFC do PICI.

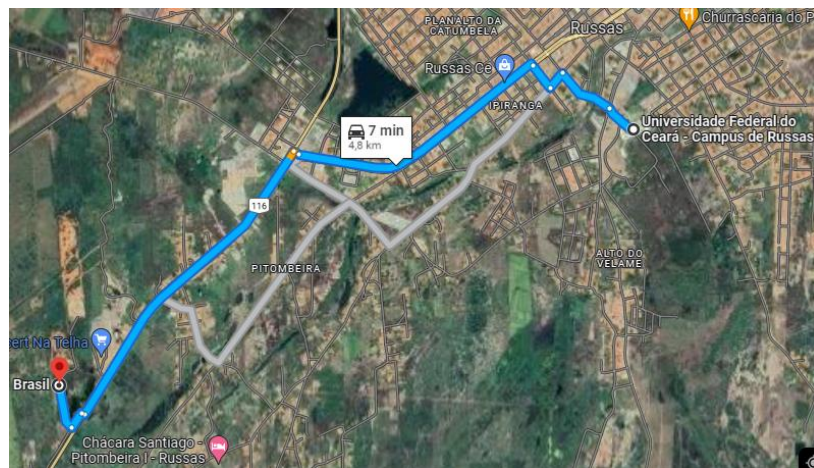
A partir dos resultados dos ensaios, foi possível analisar a viabilidade técnica dos materiais propostos para uso em camadas de pavimentação. Ademais, os parâmetros obtidos forneceram o embasamento necessário para a execução do dimensionamento estrutural do pavimento.

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Solo

O solo utilizado neste trabalho é oriundo do município de Russas, que fica localizada 144,7 km da capital do Estado do Ceará, Fortaleza. O material foi coletado na jazida municipal, que fica situada às margens da BR-116, possuindo as coordenadas geográficas de latitude  $4^{\circ}57'36.7''$  e longitude  $38^{\circ}00'17.3''$ , localizada a 4,8 km de distância da Universidade Federal do Ceará - Campus de Russas, conforme exemplifica a Figura 6.

Figura 6 - Localização da jazida municipal tendo como referência a UFC campus de Russas



Fonte: Google Maps (2025).

A escolha da jazida, representada na Figura 7, deve-se à sua representatividade em relação aos solos comumente empregados em obras de infraestrutura na região do município de Russas. Adicionalmente, a proximidade com o campus da UFC de Russas contribui para a viabilidade logística da coleta e do transporte do material. Ressalta-se ainda que a área é tradicionalmente utilizada como jazida de empréstimo, garantindo maior aplicabilidade prática dos resultados obtidos.

Figura 7 - Talude de corte presente na jazida



Fonte: Autora.

A remoção do solo foi realizada em um talude de corte, com a retirada de aproximadamente 50 cm da camada superficial, visando eliminar a presença de resíduos orgânicos, como raízes e material vegetal. A coleta foi executada com o auxílio de pás, sendo o material posteriormente transportado em baldes. Realizou-se uma análise visual preliminar do solo, a qual indicou uniformidade quanto à textura e à coloração. O procedimento ocorreu em duas etapas, totalizando cerca de 400 kg de solo, com aproximadamente 200 kg em cada retirada. Após a coleta, o solo foi transportado e armazenado no LCC da UFC de Russas.

### **3.2.2 Cimento**

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) indica, para uso em solo-cimento, os cimentos Portland: Comum (CP I e CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z e CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV). Com base nessa recomendação, o cimento aplicado na preparação das misturas desta pesquisa foi o CP II E 32 RS, do fabricante Mizu, adquirido em embalagens de 50 kg. A escolha deveu-se à sua ampla disponibilidade na região e por ser um material amplamente empregado em infraestrutura de pavimentos.

### **3.2.3 Fibra de coco**

A fibra de coco foi adquirida já beneficiada, acondicionada em embalagens de 1 kg, apresentando aspecto homogêneo e ausência de impurezas visíveis, conforme ilustrado na Figura 8. O material fibroso foi então distribuído em bandejas metálicas e exposto à secagem ao ar, a fim de eliminar eventual umidade residual e evitar processos de deterioração antes de sua incorporação às misturas.

Figura 8 - Fibra de coco



Fonte: Autora.

As fibras de coco foram previamente desembaraçadas, visando à separação individual dos filamentos e à redução da formação de aglomerados, procedimento essencial para garantir uma melhor dispersão no interior das misturas. Em seguida, as fibras foram cortadas manualmente no comprimento de 25 mm (Aguilar, 2015; Bernardina, 2019), com auxílio de uma tesoura, guiada por um gabarito, que deu suporte a execução do corte.

### **3.2.4 Água**

A água utilizada para os ensaios foi a destilada, oriunda do processo de destilação, no laboratório de química da UFC campus de Russas. Optou-se por esse procedimento com o objetivo de evitar a introdução de impurezas nas amostras, tais como álcalis e ácidos, que pudessem acarretar reações não previstas quando em contato com os demais constituintes da mistura. Contudo, na etapa de imersão dos corpos de prova, por requerer um grande volume de água, utilizou-se a água não destilada.

## **3.3 Definição das misturas para os ensaios laboratoriais**

Foram analisadas combinações de solo-fibra (SF), solo-cimento (SC) e solo-cimento-fibra (SCF). Os teores de fibra de coco adotados foram de 0,5%, 0,75% e 1%, em relação à massa seca do solo. A definição desses teores baseou-se em estudos prévios que empregaram a fibra de coco como material de reforço de solos, nos quais foram observados ganhos no desempenho mecânico dos compósitos, sem prejuízos significativos à trabalhabilidade e ao processo de compactação (Bolaños, 2013; Oliveira Junior, 2018; Menezes, 2018; Santos, 2020; Reis, 2022).

Para parametrizar a dosagem do solo-cimento, utilizou-se como referência a norma NBR 12253/2012, que estabelece as condições necessárias para determinar a quantidade de cimento Portland, requerida para estabilizar solos para emprego em camadas de pavimento. O procedimento baseia-se na avaliação da resistência à compressão simples de corpos de prova cilíndricos. A norma recomenda a análise de, no mínimo, três teores distintos de cimento, visando determinar aquele que atenda ao critério de resistência mínima de 2,1 Mpa, bem como a moldagem de três corpos de prova para cada teor. Neste trabalho, foram avaliados os teores de 5%, 7% e 9% de cimento, em relação à massa seca do solo.

Para as misturas de solo-cimento-fibra foram testadas combinações dos diferentes teores de cimento e fibras citados, visto que, ao adicionar a fibra de coco, há a possibilidade de

contribuir substituindo parte do cimento. A prática é realizada com o intuito de aumentar as propriedades mecânicas do solo e comumente reduzir o consumo de cimento nos métodos de melhoria do solo.

A nomenclatura adotada para identificação das misturas baseou-se na combinação dos materiais constituintes e de seus respectivos teores. As letras iniciais indicam o solo natural (S), seguido da identificação do teor de cimento (C) ou de fibra (F), expressos em porcentagem em relação à massa seca do solo. Quando presentes simultaneamente, os materiais são indicados de forma sequencial, sendo o cimento representado por “C” e a fibra por “F”, acompanhados de seus respectivos teores, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Nomenclatura e composição das misturas

| <b>Nomenclatura das Misturas</b> | <b>Composição</b>                     |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| <b>SN</b>                        | Solo                                  |
| <b>S5C</b>                       | Solo + 5% de cimento                  |
| <b>S7C</b>                       | Solo + 7% de cimento                  |
| <b>S9C</b>                       | Solo + 9% de cimento                  |
| <b>S0,5F</b>                     | Solo + 0,5% de fibra                  |
| <b>S0,75F</b>                    | Solo + 0,75% de fibra                 |
| <b>S1F</b>                       | Solo + 1% de fibra                    |
| <b>S5C0,5F</b>                   | Solo + 5% de cimento + 0,5% de fibra  |
| <b>S5C0,75F</b>                  | Solo + 5% de cimento + 0,75% de fibra |
| <b>S5C1F</b>                     | Solo + 5% de cimento + 1% de fibra    |
| <b>S7C0,5F</b>                   | Solo + 7% de cimento + 0,5% de fibra  |
| <b>S7C0,75F</b>                  | Solo + 7% de cimento + 0,75% de fibra |
| <b>S7C1F</b>                     | Solo + 7% de cimento + 1,0% de fibra  |
| <b>S9C0,5F</b>                   | Solo + 9% de cimento + 0,5% de fibra  |
| <b>S9C0,75F</b>                  | Solo + 9% de cimento + 0,75% de fibra |
| <b>S9C1F</b>                     | Solo + 9% de cimento + 1% de fibra    |

Fonte: Autora.

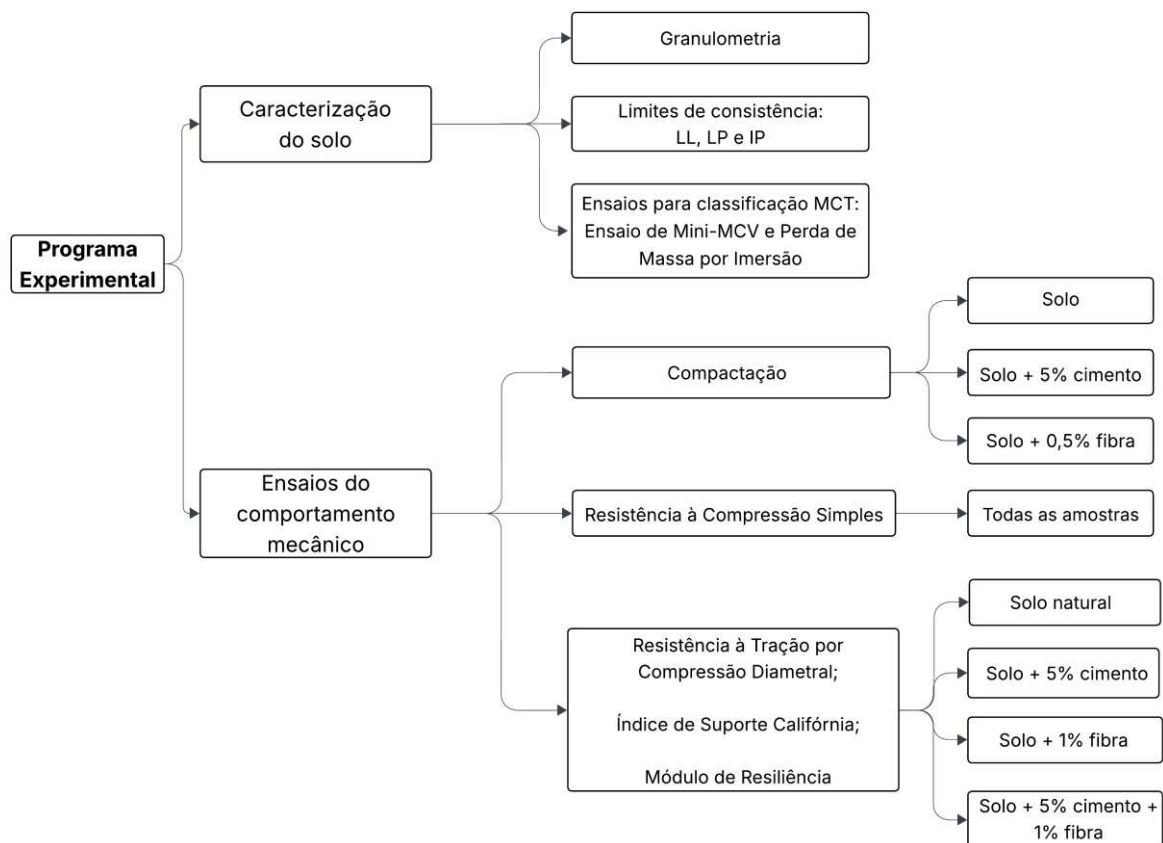
As misturas definidas nesta seção foram utilizadas na moldagem dos corpos de prova destinados aos ensaios laboratoriais previstos no programa experimental. A nomenclatura

adotada permite a identificação clara dos teores de cimento e de fibra de coco incorporados em cada composição, facilitando a análise comparativa dos resultados obtidos.

### 3.4 Programa experimental

O programa experimental, detalhado no fluxograma da Figura 9, contempla os procedimentos necessários para o alcance dos objetivos deste estudo. O escopo de investigação foi estruturado em duas etapas: a primeira na caracterização do solo e a segunda nos ensaios de comportamento mecânico das misturas propostas.

Figura 9 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Autora.

Para caracterizar o solo foi realizado a granulometria por peneiramento, os limites de Allterberg: Limite de liquidez (LL), Limite de plasticidade (LP) e Índice de plasticidade (IP) e os ensaios para classificação MCT: Ensaio de Mini-MCV e Perda de massa por Imersão. Na sequência foram realizados os ensaios de comportamento mecânico, sendo estes o ensaio de compactação, resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração por compressão

diametral (RTCD), Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR) e Módulo de Resiliência (MR).

Optou-se por esse escopo experimental, para melhor designar a atribuição de cada material na alteração das propriedades mecânicas dos compósitos, bem como a interação da matriz cimentícia com a fibra de coco.

### 3.4.1 Caracterização do solo

Os ensaios de caracterização do solo visam identificar as propriedades físicas do solo e sua designação de aplicação. Estes ensaios foram executados seguindo as orientações normativas do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atualmente conhecido como DNIT. A Tabela 3 aponta os ensaios realizados, bem como suas respectivas normas, que especificam os equipamentos e procedimentos para execução dos ensaios.

Tabela 3 - Normas para os ensaios de caracterização do solo

| Ensaio                                                   |                | Normas         |
|----------------------------------------------------------|----------------|----------------|
| Preparação de amostras para os ensaios de caracterização |                | DNER-ME 041/94 |
| Granulometria por peneiramento                           |                | DNER-ME 080/94 |
| Limite de Liquidez (LL)                                  |                | DNER-ME 122/94 |
| Limite de plasticidade (LP)                              |                | DNER-ME 082/94 |
| Mini-MCV                                                 |                |                |
| Ensaio para classificação MCT                            | Perda de massa | DNIT 258/23    |
|                                                          | por imersão    |                |

Fonte: Autora.

#### 3.4.1.1 Preparação do solo

A preparação do solo foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos na norma DNER-ME 041/94. Inicialmente, o material foi submetido à secagem ao ar livre e, posteriormente, ao destorroamento em almofariz, utilizando-se mão de gral revestida com borracha, de forma a preservar as dimensões naturais dos grãos. Em seguida, o solo foi homogeneizado e reduzido com o auxílio de um repartidor de amostras, até a obtenção de uma porção representativa de aproximadamente 2000 g, valor recomendado para solos arenosos. A Figura 10 apresenta as etapas desse processo.

Figura 10 – Preparação do solo: a) Solo destorreado; b) Repetidor de amostra



Fonte: Autora.

O solo foi passado integralmente na peneira de malha 2,0 mm (nº 10). O material passante foi fracionado, sendo ainda determinada a umidade higroscópica do solo, e devidamente armazenado em sacos plásticos para a realização dos ensaios de caracterização.

#### 3.4.1.2 *Análise granulometria por peneiramento*

O ensaio de granulometria por peneiramento é regido pela norma do DNER-ME 080/94. O procedimento consistiu na passagem da amostra de solo por uma série de peneiras de abertura progressivamente menores, com o intuito de classificar as partículas em diferentes faixas granulométricas. A Figura 11 exemplifica o processo de peneiramento realizado.

Figura 11 - Ensaio de análise granulométrica por peneiramento



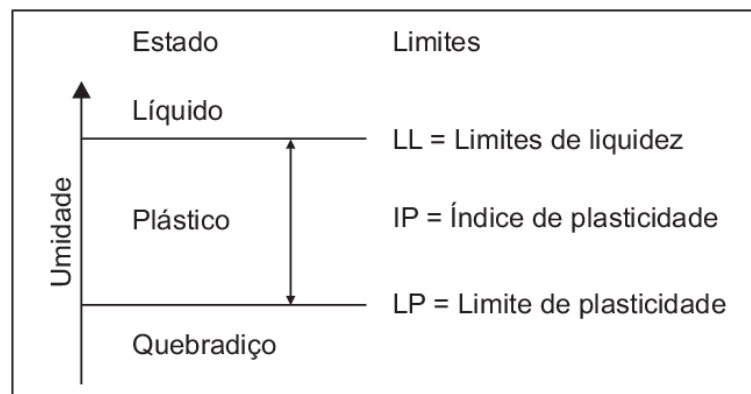
Fonte: Autora.

Em seguida, foi realizada a pesagem das frações retidas em cada peneira, permitindo a determinação da porcentagem de material retido em relação à massa total da amostra. Os valores, por sua vez, foram utilizados para a construção da curva granulométrica do solo.

#### 3.4.1.3 Limites de consistência

Os ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, conhecidos como limites de consistência ou limites de Atterberg, foram executados de acordo com os procedimentos estabelecidos pelas normas DNER-ME 122/94 e DNER-ME 082/94. Esses ensaios têm como finalidade avaliar o comportamento do solo na presença de água, possibilitando a determinação dos teores de umidade que delimitam as transições entre os diferentes estados de consistência do material. A Figura 12 ilustra, de forma esquemática, esses limites, os quais constituem parâmetros fundamentais para a caracterização geotécnica dos solos. Estes ensaios foram realizados em duplicata, visando minimizar a influência de eventuais erros operacionais e aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos.

Figura 12 – Limites de consistência

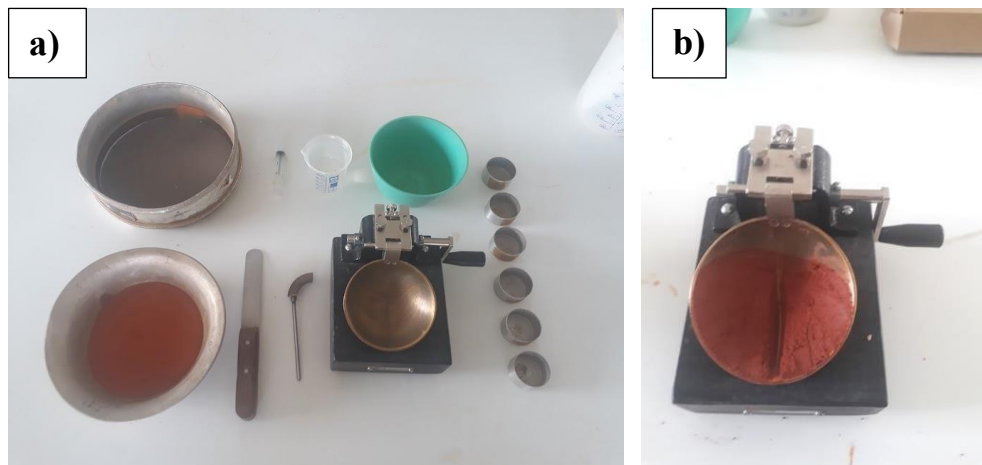


Fonte: Pinto (2006).

O ensaio de Limite de Liquidez (LL) consistiu na determinação do teor de umidade no qual ocorre o fechamento da ranhura formada na massa de solo disposta na concha do aparelho de Casagrande, após a aplicação de 25 golpes do equipamento. Para a sua execução, foram utilizados materiais padronizados, incluindo o aparelho de Casagrande, cinzel normalizado para abertura da ranhura, espátula metálica, cápsulas para determinação do teor de umidade, balança de precisão e estufa, conforme apresentado na Figura 13a.

A massa de solo, previamente homogeneizada, foi colocada na concha e nivelada, sendo posteriormente aberta uma ranhura central, como demonstrado na Figura 13b. O ensaio foi realizado para diferentes teores de umidade, obtendo-se distintos números de golpes, a partir dos quais foi aplicada interpolação linear para a determinação do teor de umidade correspondente a 25 golpes.

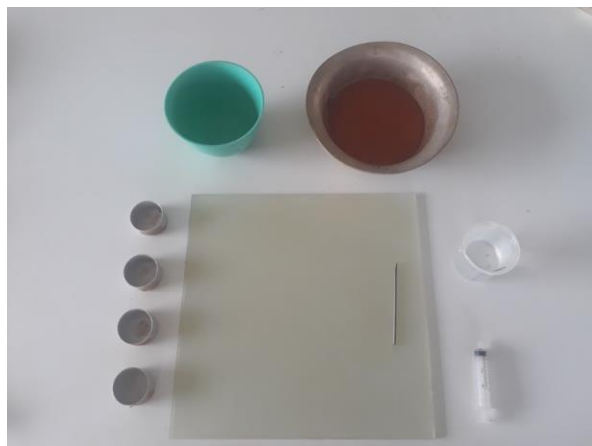
Figura 13 - Ensaio de Limite de Liquidez: a) Materiais utilizados para o ensaio de LL; b) Ranhura feita na massa de solo disposta na concha de Casagrande.



Fonte: Autora.

O Limite de Plasticidade (LP) foi determinado por meio da moldagem manual de um cilindro de solo, com a palma da mão, sobre uma placa de vidro porosa, até atingir um diâmetro de 3 mm e sua parte central começar a fragmentar. O procedimento foi repetido até a obtenção de três valores de umidade que não diferissem da média em mais de 5%. A Figura 14 expõe os materiais utilizados para a realização deste ensaio.

Figura 14 – Materiais utilizados para o Ensaio de Limite de Plasticidade



Fonte: Autora.

Por meio dos valores de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), é determinado o Índice de Plasticidade (IP), definido como a diferença entre esses dois limites, conforme apresentado na Equação 2.

$$IP = LL - LP \quad (2)$$

O Índice de Plasticidade obtido constitui um parâmetro utilizado para auxiliar na classificação do solo e na avaliação de seu comportamento geotécnico, fornecendo subsídios para as demais análises do trabalho.

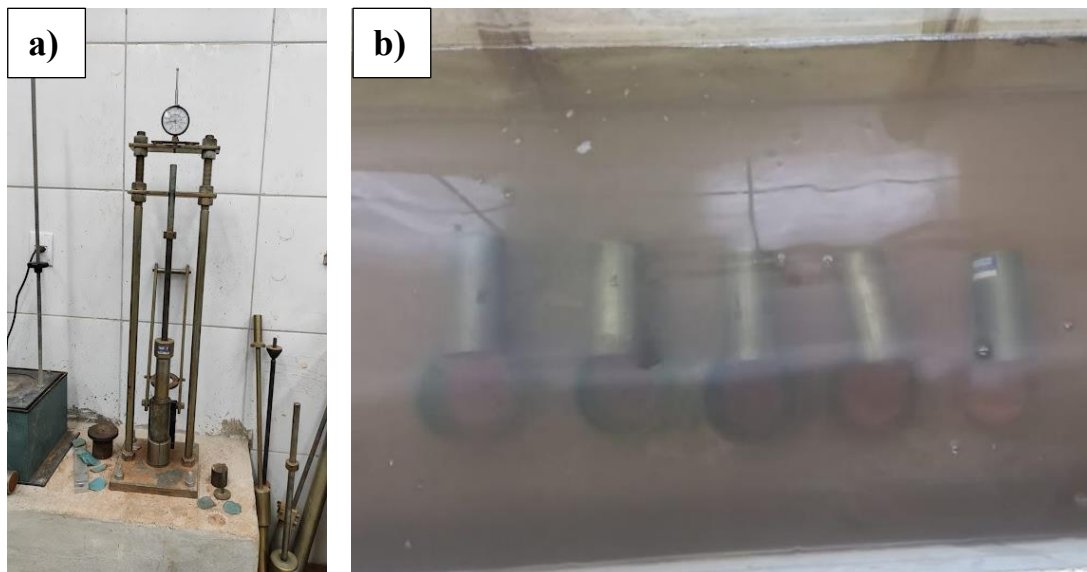
#### *3.4.1.4 Ensaios para classificação MCT*

Os ensaios para classificação MCT (Miniatura, Compactado e Tropical) foram realizados considerando as particularidades dos solos tropicais. Essa metodologia baseia-se na realização dos ensaios de Compactação Mini-MCV e de Perda de Massa por Imersão. Os procedimentos adotados para a execução desses ensaios são normatizados, pela DNIT-ME 258/2023.

Para a realização do ensaio de Compactação Mini-MCV, o solo foi inicialmente passado na peneira de abertura nominal de 2,0 mm e dividido em porções de aproximadamente 500 g, às quais foram adicionados diferentes teores de umidade. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e mantidas em repouso por um período de 24 horas, com o propósito de promover a homogeneização do teor de umidade. Após esse período, foram retiradas aproximadamente 200 g de solo de cada porção, as quais foram utilizadas para a moldagem dos corpos de prova em cilindros com 50 mm de diâmetro e 130 mm de altura, aplicando-se diferentes níveis de energia de compactação. A Figura 15a mostra o equipamento Mini-MCV utilizado no ensaio.

No Ensaio de Perda de Massa por Imersão, os corpos de prova oriundos do Ensaio de Compactação Mini-MCV foram parcialmente extrudados dos moldes, de modo a formar uma saliência de aproximadamente 10 mm. Em seguida, os moldes contendo os corpos de prova foram imersos horizontalmente em água, utilizando um dispositivo que permite a coleta do material eventualmente desprendido, conforme demonstrado na Figura 15b. Após vinte e quatro horas de imersão, o recipiente contendo o material desprendido foi retirado e levado à estufa até a estabilização de massa, permitindo assim a determinação da perda de massa por imersão.

Figura 15 – Ensaios para a classificação MCT: a) Compactador Mini-MCV; b) Corpos de prova imersos em água no ensaio de Perda de Massa por Imersão



Fonte: Autora.

A etapa foi conduzida conforme as recomendações da metodologia MCT, respeitando as normas técnicas vigentes. A aplicação conjunta desses ensaios possibilitou a classificação do solo segundo o sistema MCT, de modo a caracterizar seu comportamento mecânico e hidráulico, bem como avaliar sua potencialidade de uso nas aplicações propostas neste estudo.

### ***3.4.2 Ensaios para análise do comportamento mecânico dos materiais***

Para a avaliação do comportamento mecânico das diferentes misturas propostas nesta pesquisa (solo natural, solo-cimento e solo-cimento-fibra), foram realizados ensaios para a determinação das propriedades de resistência e deformabilidade dos materiais. As normas técnicas que nortearam a execução desses ensaios seguem elencadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Normas para análise do comportamento mecânico

| <b>Ensaio</b>                                                  | <b>Normas</b>                |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Ensaio de compactação do solo                                  | DNER-ME 162/94               |
| Ensaio de compactação solo-cimento                             | DNER-ME 216/24               |
| Moldagem e cura de corpos de provas cilíndricos                | DNER-ME 202/94               |
| Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)               | DNER-ME 201/94               |
| Ensaio de Resistência à Compressão por Tração Diametral (RCTD) | DNER 181/94<br>DNIT 136/2018 |
| Índice de Suporte California (CBR)                             | DNIT 172/2016-ME             |
| Módulo de Resiliência                                          | DNIT 134/2018 - ME           |
| Módulo de Resiliência do solo-cimento                          | DNIT 181/2018 – ME           |

Fonte: Autora.

#### 3.4.2.1 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi executado para o solo natural, o solo estabilizado com 5% de cimento e o solo reforçado com 0,5% de fibra de coco, sendo a escolha desses teores fundamentada em resultados da literatura. No que se refere ao solo-cimento, embora seja reconhecida a tendência de aumento da demanda de água com o acréscimo do teor de cimento, a magnitude dessa variação é reduzida para teores próximos, resultando em alterações pouco significativas da umidade ótima (Almeida, 2016; Ferreira, 2019; Simoni, 2019).

Sobre a mesma perspectiva, trabalhos que avaliam a incorporação de fibras naturais apontam variações discretas da umidade ótima em função do teor de fibra adicionada (Chaple e Dhattrak, 2013; Oliveira Júnior, 2018; Mittal, 2021). Dessa forma, a adoção de um teor representativo para cada material mostrou-se uma alternativa para otimizar o programa experimental, sem comprometer a representatividade dos resultados.

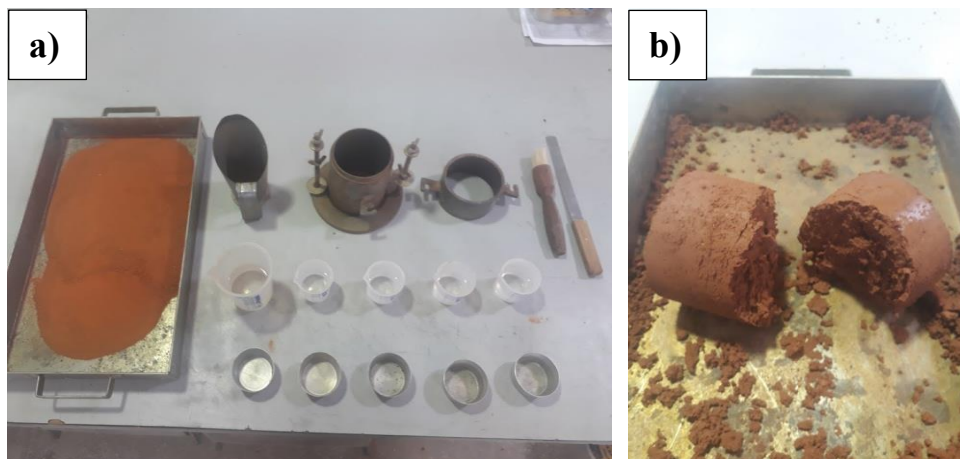
O ensaio de compactação foi realizado seguindo as diretrizes normativas da DNER-ME 162/94, que especifica a metodologia para determinação da umidade ótima e massa específica aparente seca máxima de um solo. Para a execução desse ensaio, são estabelecidas diferentes energias de compactação, classificadas como normal, intermediária e modificada. No

caso do solo em estudo, a energia escolhida para compactação foi a intermediária, uma vez que esta é amplamente utilizada na construção de infraestrutura viária.

Para a execução do ensaio, a amostra de solo previamente homogeneizada foi moldada em três camadas no interior de um recipiente cilíndrico com volume aproximado de 1 000 cm<sup>3</sup>. Cada camada foi submetida à aplicação de 26 golpes de um soquete com massa de 2,5 kg, caindo de uma altura de 30,5 cm. Esse procedimento foi repetido quantas vezes necessárias para a obtenção de uma curva de compactação adequada, sendo realizadas, no mínimo, cinco repetições, com a adição de diferentes quantidades de água em cada uma delas.

Após a compactação, o conjunto corpo de prova–cilindro foi pesado em balança com precisão de 1 g e 0,01 g. Logo após, o Corpo de Prova (CP) foi removido do cilindro com auxílio de um aparelho extrator e fragmentado, para a retirada de duas amostras do solo ensaiado. Essas amostras foram pesadas na condição úmida e, posteriormente, levadas à estufa a uma temperatura entre 105 °C e 110 °C, para a determinação da massa seca. Na Figura 16, podem ser observados os equipamentos utilizados no ensaio, assim como o corpo de prova após a fragmentação para retirada das amostras.

Figura 16 - Ensaio de compactação do solo: a) Materiais utilizados para o ensaio de Compactação; b) CP desagregado para retirada da amostra



Fonte: Autora.

Com base nos procedimentos descritos, ao deduzir a massa do cilindro e comparar as massas do solo úmido e do solo seco, foi possível determinar a massa específica aparente seca e o teor de umidade correspondentes a cada ponto ensaiado. A partir desses valores, foi traçada a curva de compactação, da qual se obtiveram massa específica aparente seca máxima e a umidade ótima do solo.

Quanto ao ensaio de compactação do solo-cimento, este foi realizado conforme preconiza a norma DNER-ME 216/94. O procedimento adotado é análogo ao descrito para solo, acrescentando-se a etapa de homogeneização do solo com o cimento, de modo a garantir a uniformidade da mistura seca. Todo o processo do ensaio, desde a adição da água até a compactação, foi realizado em um intervalo máximo de 60 minutos, com o objetivo de evitar o início da pega do cimento.

Já o ensaio de compactação da mistura do solo com a fibra de coco também seguiu o mesmo processo metodológico do solo e solo-cimento, adotando-se um cuidado adicional ao misturar a fibra de coco com o solo, de forma a evitar sua aglomeração. Para esse fim, verificou-se que a forma mais eficaz consistiu em adicionar primeiramente a água ao solo, procedendo-se, em seguida, à incorporação das fibras de coco previamente desemaranhadas, conforme a Figura 17.

Figura 17 – Moldagem do ensaio de compactação do solo-fibra



Fonte: Autora.

Por meio dos ensaios de compactação descritos, foram determinadas as umidades ótimas necessárias à moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos subsequentes. Esses valores asseguraram condições adequadas de moldagem das misturas, influenciando diretamente o comportamento mecânico dos materiais analisados.

#### *3.4.2.2 Ensaios de Resistência à Compressão Simples*

O ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS) foi realizado para todas as misturas propostas nesta pesquisa e conduzido de acordo com as normas DNER-ME 202/94 e

DNER-ME 201/94. Tendo em vista a ausência de normativa específica para o solo natural e o solo-fibra, adotaram-se os mesmos procedimentos estabelecidos para o solo-cimento. Inicialmente, aplicaram-se essas normas ao solo puro com o propósito de comparar os valores de resistência quando este é incorporado ao cimento Portland e à fibra de coco, além de verificar se as misturas com solo-cimento atingiram os requisitos mínimos exigidos pelo DNIT para aplicação em pavimentação.

Para cada condição foram confeccionados três corpos de prova, moldados de maneira análoga ao descrito para o processo de compactação, na energia intermediária e utilizando-se a umidade ótima. Após a desmoldagem, os CPs foram envolvidos com plástico filme e papel-alumínio, devidamente identificados e armazenados em condições equivalentes à câmara úmida, durante o período de cura de 7 dias. Ao final do período de cura, as amostras contendo cimento foram imersas em água por 4 horas e, posteriormente, superficialmente secas com um tecido absorvente. Em seguida, verificou-se as dimensões de todos os CPs, que então foram encaminhados para o ensaio de compressão.

Para a execução do ensaio, utilizou-se uma máquina universal de ensaios EMIC, com capacidade de 300 kN, submetendo os CPs a uma carga axial, com velocidade de aplicação de 1,00 mm/min, como observado na Figura 18. Após o rompimento, foi retirada uma amostra de cada CP, a qual foi levada à estufa para conferência da umidade ótima

Figura 18 - Ensaio de Resistência à Compressão Simples



Fonte: Autora.

A preparação e a moldagem dos corpos de prova foram realizadas de forma idêntica em todas as etapas do trabalho, tanto para o solo natural quanto para as misturas de solo-cimento e solo-fibra. Apesar de algumas misturas não conterem cimento, adotou-se um período de cura de 7 dias para todos os corpos de prova, com o objetivo de padronizar as condições experimentais. Esse intervalo permite a estabilização da umidade e a dissipação das tensões internas geradas pela compactação, assegurando maior uniformidade estrutural e evitando interferências associadas ao tempo entre a moldagem e a aplicação da carga.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples, foi possível identificar o compósito ótimo. Assim, os ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RTCD), California Bearing Ratio (CBR) e Módulo de Resiliência (MR) foram realizados apenas para o solo natural, o S5C, o S1F e o S5C1F, permitindo uma análise comparativa entre as misturas de referência e a composição considerada ótima.

#### *3.4.2.3 Ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral*

O ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTC) foi realizado com base nas normas DNER 181/1994 e DNIT 136/2018, considerando a inexistência de normatização específica aplicável a solos e solo-cimento. O ensaio baseia-se na aplicação de uma carga compressiva ao longo do diâmetro do corpo de prova, distribuída de forma contínua. Essa solicitação provoca o surgimento de tensões de tração internas, resultantes do campo de tensões gerado pela compressão aplicada, permitindo a avaliação da resistência do material à tração indireta no plano de carregamento.

Os corpos de prova utilizados no ensaio foram confeccionados no molde Marshall, com dimensões de 100 mm de diâmetro e 65 mm de altura. A energia de compactação correspondente ao nível intermediário foi reproduzida por meio da aplicação de 28 golpes, valor definido a partir da relação entre a massa do soquete e a altura de queda empregada no procedimento. O processo de cura se deu de forma análoga ao já descrito para RCS e finalizado este período, os ensaios foram executados em prensa mecânica, aplicando-se carga monotônica crescente até a ruptura do corpo de prova, conforme demonstrado na Figura 19.

Figura 19 - Ensaio de Resistência à Compressão Por Tração Diametral



Fonte: Autora.

#### 3.4.2.4 California Bearing Ratio

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou California Bearing Ratio (CBR) fornece dados sobre os parâmetros de resistência mecânica, deformabilidade e potencial expansivo dos solos, constituindo um dos critérios classificatórios adotados pelo DNIT para aplicação dos solos em camadas de base e sub-base de pavimentos. A execução do procedimento seguiu as prescrições da norma DNIT 172 ME/2016.

Para a realização do ensaio, os corpos de prova foram compactados na umidade ótima, em cinco camadas, com energia intermediária, aplicando-se manualmente 26 golpes por camada. Três pequenas porções de cada CP foram retiradas para determinar o teor de umidade de moldagem. Embora as normas técnicas não estabeleçam a necessidade de tempo de cura para a realização do ensaio de CBR, optou-se por avaliar esse efeito nas misturas contendo cimento.

Após a moldagem, procedeu-se à remoção do disco espaçador, à inversão dos moldes e à sua fixação nos pratos-base perfurados. No espaço anteriormente ocupado pelo disco, instalou-se a haste de expansão com os pesos anelares, totalizando massa superior a 4,536 kg. Em seguida, acoplou-se o extensômetro ao tripé posicionado na borda superior do cilindro, anotou-se a leitura inicial e as amostras foram imersas em um tanque com água, onde permaneceram por um período de 96 h, sendo realizado leituras no extensômetro em intervalos de 24 h.

Terminado o tempo de imersão, os CPs foram retirados da água e colocados para drenar durante 15 minutos. Finalizado esse processo, ocorreu o assentamento do pistão de penetração com uma carga de 45 N, procedendo-se o zeramento tanto do extensômetro anelar quanto do dispositivo responsável pela leitura da penetração do pistão no solo. Em seguida, a prensa foi acionada a uma velocidade constante de 1,27 mm/min, registrando-se as deformações decorrentes do encurtamento diametral sob a ação das cargas aplicadas. A Figura 20, demonstra o estado do corpo de prova pós penetração.

Figura 20 - Corpo de prova do CBR pós ensaio



Fonte: Autora.

#### *3.4.2.5 Módulo de Resiliência*

O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) foi conduzido conforme os procedimentos estabelecidos na norma DNIT 134/2018–ME para as misturas SN, S5C, S1F e S5C1F. No caso das misturas cimentadas S5C e S5C1F, realizou-se adicionalmente o ensaio segundo a norma DNIT 181/2018–ME, de modo a possibilitar a comparação entre os métodos.

Diferentemente dos ensaios tradicionais descritos anteriormente (CBR e RCS), que aplicam cargas lentas de tensões crescentes e grandes deslocamentos, estas normas abrangem os procedimentos de ensaio para determinação do comportamento resiliente de materiais, por meio da reprodução em laboratório dos estados de tensão e as condições físicas às quais o

material é submetido nas camadas do pavimento sob a ação do tráfego, simulando assim de maneira mais real as condições em campo.

As cargas verticais aplicadas ao pavimento geram deslocamentos nos materiais, e ao serem cessados os carregamentos parte desses deslocamentos é recuperada, esses deslocamentos são ditos resilientes. Uma fração mínima do deslocamento não é recuperada, configurando deformação permanente, cuja magnitude deve permanecer reduzida para impedir que a repetição dos carregamentos gere acúmulo de deformações capazes de comprometer o desempenho estrutural do pavimento (Mascarenhas, 2016).

Dessa forma, o módulo de Resiliência (MR) é expresso como a relação entre as a tensão-desvio ( $\sigma_d$ ) aplicada repetidamente na amostra e a correspondente deformação vertical recuperável ou resiliente ( $\epsilon_r$ ), provocada por essa tensão, de acordo com a Equação 3:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (3)$$

Para a realização do ensaio, as amostras foram preparadas na umidade ótima e os corpos de prova foram moldados em um cilíndrico tripartido de 100 mm de diâmetro e 200mm de altura, em 10 camadas iguais com 10 golpes por camada, representando a energia intermediária. Após desmoldados, os CPS foram envolvidos em papel filme e armazenados para o processo de cura de 7 dias.

Decorrido o período de cura, iniciou-se a montagem para o ensaio. Nesta etapa, os corpos de prova foram envolvidos por membranas de borracha lisas e sem furos, em seguida, o conjunto foi assentado na base da célula triaxial e posicionou-se o cabeçote no topo do corpo de prova. Os Transdutores de Deslocamento (LVDTs) foram fixados e ajustados, por fim, colocou-se o invólucro cilíndrico e a placa superior de vedação.

A execução do ensaio ocorre em duas etapas de aplicação de carga. A primeira é a fase de condicionamento da amostra, na qual são aplicados três pares de tensões, com a finalidade de eliminar as deformações permanentes que ocorrem nas primeiras aplicações de carregamento, bem como reduzir o efeito do histórico de tensões no valor do módulo de resiliência.

Na segunda fase, é efetuada a aplicação de 18 pares de tensões para obtenção das leituras das deformações específicas, que são utilizadas na determinação do módulo de resiliência. A frequência das cargas repetidas é de 1 Hz (60 ciclos por minuto) e sua duração é de 1,0 segundo, sendo 0,10 segundos para aplicação da carga e 0,9 segundo de repouso antes

da aplicação da carga seguinte. A Figura 21 apresenta o corpo de prova durante a realização do ensaio.

Figura 21 - Ensaio do Módulo de Resiliência



Fonte: Autora.

Os resultados obtidos para as diversas misturas estudadas foram analisados através de 3 modelos matemáticos: o modelo em função da tensão desvio ( $\sigma_d$ ); o modelo em função da tensão confinante ( $\sigma_3$ ) e o modelo composto (que é em função das  $\sigma_d$  e  $\sigma_3$ ), apresentadas na Equações 4, 5 e 6, respectivamente. Para o tratamento dos dados foi utilizado os programas Excel e LABFit.

$$MR = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2} \quad (4)$$

$$MR = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \quad (5)$$

$$MR = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \cdot \sigma_d^{K_3} \quad (6)$$

O desempenho dos modelos foi avaliado por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), parâmetro estatístico que varia de 0 a 1 e indica o grau de ajuste entre os valores previstos pelo modelo e os dados experimentais. Quanto mais próximo de 1 for o valor de  $R^2$ , melhor é a capacidade do modelo em representar o comportamento real do material ensaiado.

### 3.5 Dimensionamento do pavimento

Com o intuito de avaliar o comportamento estrutural dos materiais estudados, realizou-se o dimensionamento e a análise mecanicista por meio do *software* MeDiNa. Inicialmente, foram analisados os resultados dos ensaios empíricos de CBR com o objetivo de avaliar o potencial dos materiais estudados para aplicação em pavimentação.

Para a definição dos materiais a serem analisados como camadas de base ou sub-base no método MeDiNa, adotou-se a RCS como critério metodológico de classificação. Tal decisão decorre do fato de que, embora o MR seja o principal parâmetro de entrada no MeDiNa, a literatura técnica não estabelece limites claramente definidos de MR que permitam distinguir, de forma objetiva, a aplicação dos materiais como base ou sub-base, especialmente no caso de misturas cimentadas.

A definição dos parâmetros do revestimento e do subleito considerou a similaridade com os materiais usualmente empregados na região de estudo. Adotou-se um subleito constituído por solos finos, de natureza siltosa ou argilosa, com módulo de resiliência (MR) constante igual a 130 MPa, bem como um revestimento em Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70.

No processo de dimensionamento foram idealizados seis casos estruturais (EST 1, EST 2, EST 3, EST 4, EST 5, EST 6), variando-se o nível de tráfego entre leve, médio e pesado, e alternando-se o material da sub-base entre solo-fibra e solo-cimento. Todas as verificações foram feitas para período de projeto de 10 anos. As camadas de subleito, base e revestimento permaneceram os mesmos em todos os cenários, conforme ilustrado na Tabela 5, a qual também indica os valores de Número N adotados para cada categoria de tráfego,  $2 \times 10^6$ ,  $6 \times 10^6$  e  $2 \times 10^7$  para tráfego leve, médio e pesado, respectivamente.

Tabela 5 – Estruturas analisadas

|                     | EST 1                                 | EST 2               | EST 3               | EST 4               | EST 5               | EST 6               |
|---------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Tráfego</b>      | $N = 2 \times 10^6$                   | $N = 6 \times 10^6$ | $N = 2 \times 10^7$ | $N = 2 \times 10^6$ | $N = 6 \times 10^6$ | $N = 2 \times 10^7$ |
| <b>Revestimento</b> | CAP 50/70                             |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Base</b>         | solo - cimento - fibra                |                     |                     |                     |                     |                     |
| <b>Sub-base</b>     | solo-fibra                            | solo-fibra          | solo-fibra          | solo-cimento        | solo-cimento        | solo-cimento        |
| <b>Subleito</b>     | Subleito (solo fino com MR = 130 MPa) |                     |                     |                     |                     |                     |

Fonte: Autora.

O dimensionamento do pavimento foi conduzido com base nos limites de desempenho indicados por Brasil (2023), considerando-se um sistema viário classificado como arterial primário. Para um período correspondente à vida útil de projeto e adotando-se um nível de confiabilidade de 85%, estabeleceu-se que os valores máximos admissíveis para a Área Trincada (AT) e para o Afundamento de Trilha de Roda (ATR) são de 30% e 13 mm, respectivamente.

Algumas simplificações foram necessárias ao longo das análises. Como não foi possível realizar o ensaio de deformação permanente para o material solo-fibra, buscou-se na biblioteca de materiais do MeDiNa um conjunto de coeficientes de DP referente a um material com demais propriedades similares, de modo a viabilizar a simulação. Além disso, devido à impossibilidade de executar ensaios de fadiga nos materiais cimentados, estes foram tratados no *software* como materiais de comportamento linear elástico, adotando-se como MR o valor médio obtido dos testes conforme a norma DNIT 181/2018.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização do Solo

#### 4.1.1 Análise Granulométrica do Solo

Os resultados do ensaio de análise granulométrica por peneiramento do solo natural estão apresentados na Tabela 6. A umidade higroscópica do solo, determinada previamente, foi de 0,59%, sendo utilizada para a correção da massa seca no ensaio de análise granulométrica e para o controle do teor de umidade nos demais ensaios de caracterização.

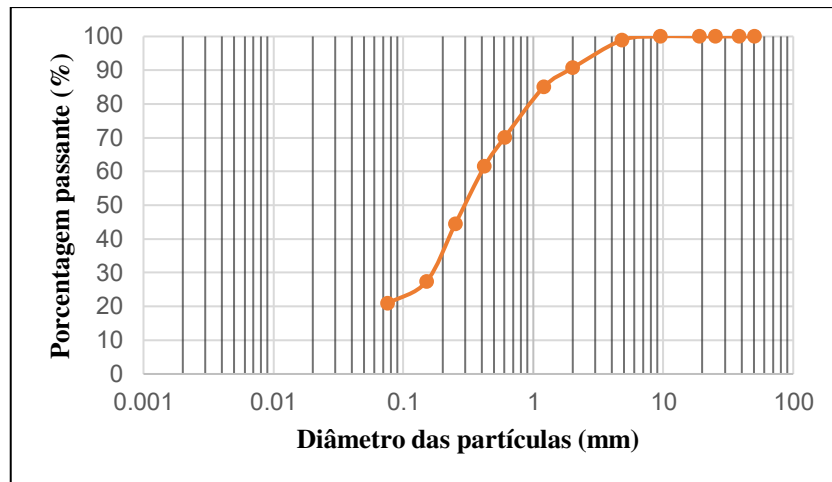
Tabela 6 - Análise Granulométrica do Solo Natural

| <b>Peneiras</b>  | <b>Abertura (mm)</b> | <b>% que passa</b> |
|------------------|----------------------|--------------------|
| <b>Nº 2"</b>     | 50                   | 100                |
| <b>Nº 1 1/2"</b> | 38                   | 100                |
| <b>Nº 1"</b>     | 25                   | 100                |
| <b>Nº 3/4"</b>   | 19                   | 100                |
| <b>Nº 3/8"</b>   | 9,5                  | 100                |
| <b>Nº 4</b>      | 4,8                  | 98,88              |
| <b>Nº 10</b>     | 2                    | 90,62              |
| <b>Nº 16</b>     | 1,2                  | 84,97              |
| <b>Nº 30</b>     | 0,6                  | 70,01              |
| <b>Nº 40</b>     | 0,42                 | 61,41              |
| <b>Nº 60</b>     | 0,25                 | 44,32              |
| <b>Nº 100</b>    | 0,15                 | 27,30              |
| <b>Nº 200</b>    | 0,075                | 20,85              |

Fonte: Autora.

Observa-se que o solo é constituído predominantemente por partículas de areia, que correspondem a aproximadamente 78% do material. Verifica-se ainda a presença considerável de finos, cerca de 20,85%, representados por silte e argila, que influenciam diretamente a plasticidade, a compactação e o comportamento mecânico do solo. O Gráfico 1 ilustra a curva granulométrica do solo natural.

Gráfico 1 - Curva Granulométrica do Solo Natural



Fonte: Autora.

O formato da curva revela uma distribuição ao longo de uma ampla faixa de diâmetros, porém, com um trecho íngreme na região central, caracterizando o solo como não uniforme e mal graduado.

#### 4.1.2 Limites de Atterberg

Realizados os ensaios em duplicata dos Limites de Atterberg, foram calculados os valores de LL e LP para o solo natural, aplicando os dados encontrados na Equação 1, foi obtido o Índice de Plasticidade. Como não houve discrepâncias significativas entre as determinações, adotou-se a média aritmética dos valores obtidos em cada ensaio, resultando em LL = 21,23%, LP = 12,72% e, consequentemente, IP = 8,51%. Os resultados seguem expressos na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do Limites de Atterberg

| Ensaio | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
|--------|--------|--------|--------|
| 1      | 21,75  | 12,51  | 9,24   |
| 2      | 20,71  | 12,93  | 7,78   |
| Média  | 21,23  | 12,72  | 8,51   |

Fonte: Autora.

Esse índice de plasticidade permite classificar o solo como de plasticidade leve, o que implica um material com reduzida retração e expansão. O DNIT (2006) indica, para aplicação nas camadas superiores do pavimento, que os materiais apresentem  $LL < 25\%$  e  $IP <$

6. O solo em estudo atende ao critério estabelecido para o limite de liquidez, porém ultrapassa o valor recomendado para o índice de plasticidade. Entretanto, o DNIT admite a utilização de materiais com valores de LL e/ou IP acima dos limites indicados, desde que apresentem fração de areia superior a 30% em sua composição, condição verificada no solo em análise. Além disso, é necessário que atendam simultaneamente aos parâmetros de CBR e expansão, os quais serão analisados posteriormente.

#### ***4.1.3 Classificação do Solo***

Com base na curva granulométrica e nos resultados dos Limites de Atterberg (LL, LP e IP), o solo foi classificado segundo o Sistema de Classificação AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Adicionalmente, o material foi classificado por meio da Classificação MCT, a qual utiliza parâmetros específicos para solos tropicais, conforme descrito anteriormente.

##### ***4.1.3.1 Classificação AASHTO***

De acordo com a distribuição granulométrica, o solo é enquadrado pela classificação AASHTO como material granular, uma vez que a porcentagem passante na peneira nº 200 é inferior a 35%. Considerando os valores de Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade, o material insere-se na faixa correspondente ao grupo A-2, constituído por pedregulhos ou areias siltosas ou argilosas. O último parâmetro analisado é o Índice de Grupo (IG), que, para o solo em estudo, foi calculado como  $IG = 0$ . Dessa forma, o solo é classificado como A-2-4, apresentando comportamento de excelente a bom para subleito, em função da predominância granular e do baixo índice de grupo.

##### ***4.1.3.2 Classificação MCT***

Com base nos resultados dos ensaios de Mini-MCV e de perda de massa por imersão, pode-se classificar o solo em conformidade com a Metodologia MCT. Na Tabela 8 segue copilado os coeficientes  $c'$ ,  $d'$ ,  $P_i$  e o índice  $e'$  utilizados para classificar os solos.

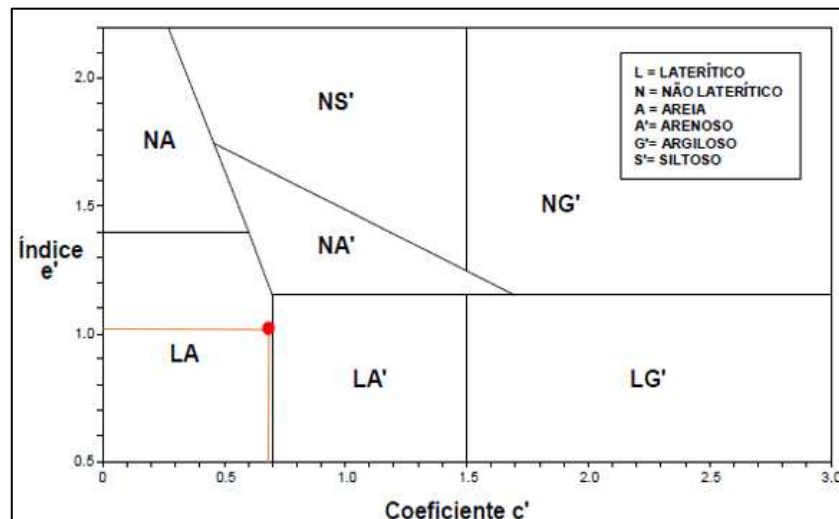
Tabela 8 - Resultados da metodologia MCT

| Amostra      | $c'$ | $d'$   | $e'$ | Pi (%) | Classificação |
|--------------|------|--------|------|--------|---------------|
| Solo Natural | 0,68 | 118,10 | 1,05 | 100    | LA            |

Fonte: Autora.

A Figura 22 mostra a localização do solo no ábaco de classificação. Desse modo, o solo pode ser classificado como Laterítico Arenoso (LA), com propriedades indicadas para aplicação em pavimentação.

Figura 22 - Ábaco da metodologia MCT



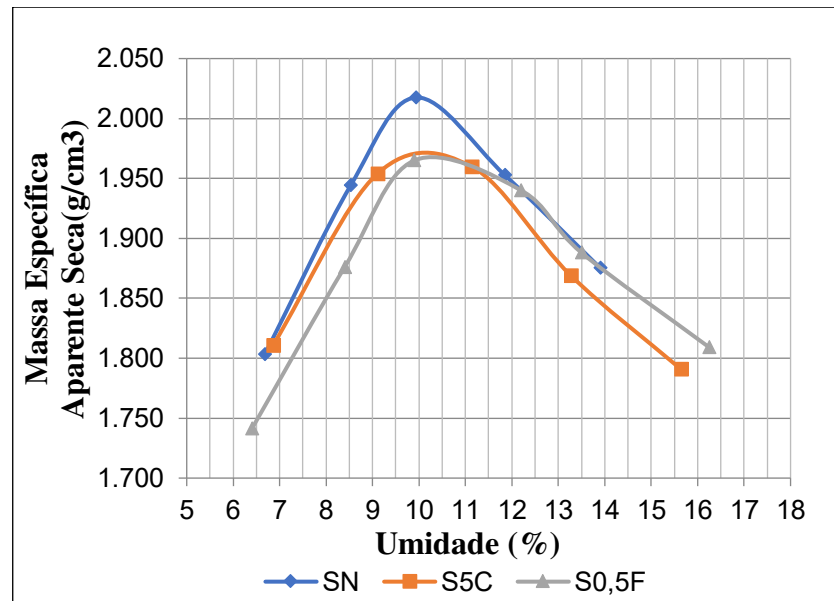
Fonte: Autora.

## 4.2 Análise do comportamento mecânico

### 4.2.1 Curvas de compactação

Foram realizados três ensaios de compactação, correspondentes às misturas SN, S5C e S0,5F. As curvas de compactação apresentadas no Gráfico 2 permitiram determinar as massas específicas aparentes secas máximas, que foram de 2,03 g/cm<sup>3</sup>, 1,97 g/cm<sup>3</sup> e 1,98 g/cm<sup>3</sup> para SN, S5C e S0,5F, respectivamente. As umidades ótimas associadas a esses valores foram de 9,9%, 10% e 10,2%, na mesma ordem.

Gráfico 2 - Curvas de compactação do SN, S5C E S0,5F



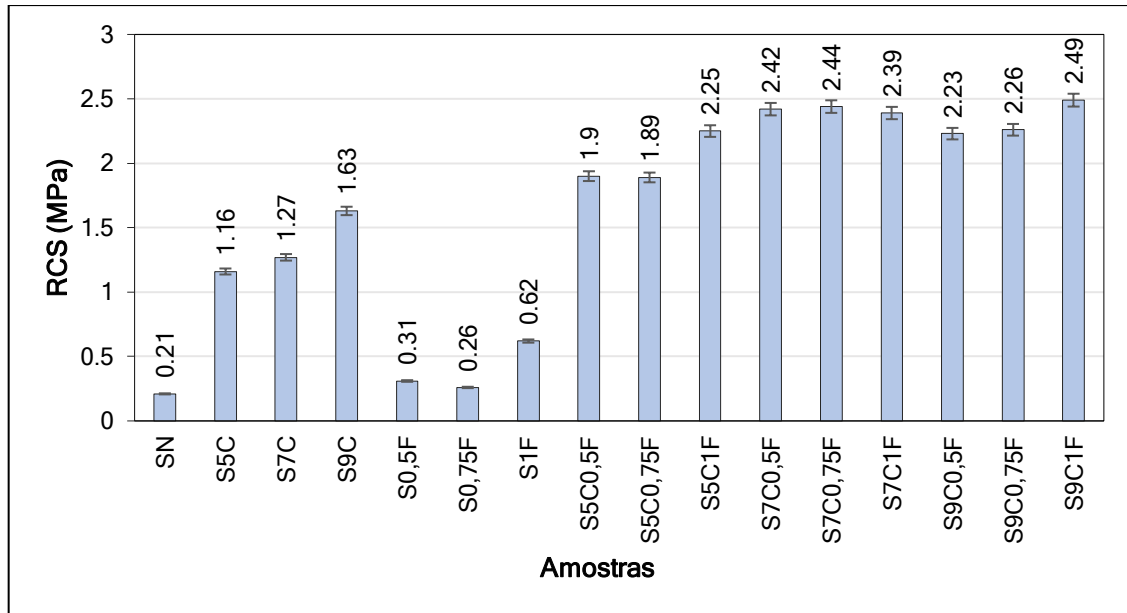
Fonte: Autora.

Pode-se inferir que a adição de cimento e de fibra de coco promoveu uma leve redução da massa específica aparente seca máxima em relação ao solo natural. No que tange à umidade ótima, tanto o cimento quanto a fibra de coco resultaram em um discreto aumento desse parâmetro. Esse comportamento, no que diz respeito à influência da fibra de coco, está em consonância com os resultados obtidos por Oliveira (2018) e Santos (2020), que também observaram tendências semelhantes em estudos de solos reforçados com fibra de coco.

#### 4.2.2 Resistência à Compressão Simples

O ensaio de Resistência à Compressão Simples foi realizado para todas as misturas propostas neste trabalho. Para a análise dos resultados, estabeleceu-se como critério de validação, que os valores individuais de resistência dos corpos de prova, não apresentassem desvio superior a 10%, em relação à resistência média do conjunto. Esse rigor estatístico foi adotado para todas as análises dos resultados deste trabalho. No Gráfico 3, estão sintetizados os valores médios de RCS obtidos.

Gráfico 3 - Resultados da Resistência à Compressão Simples



Fonte: Autora.

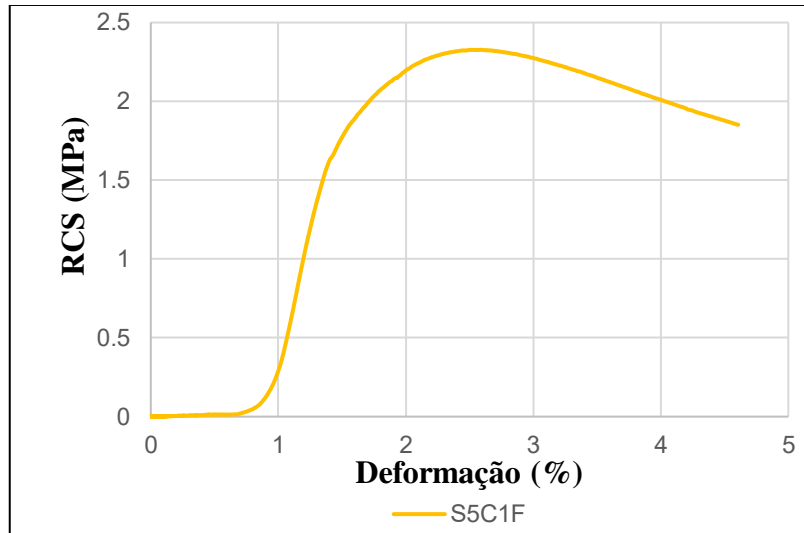
Verifica-se que o solo natural (SN) apresentou resistência média de 0,21 MPa, demonstrando sua baixa capacidade de suporte. Para as misturas com cimento (S5C, S7C e S9C), houve um aumento diretamente proporcional na relação entre a resistência e o teor de cimento das amostras. Porém, nenhum dos teores analisados atingiu o valor mínimo exigido por norma de 2,1 MPa, para aplicação em base de pavimentos. Nas amostras com adição da fibra de coco ao solo (S0,5F, S0,75F e S1F) os resultados não conferiram ganhos expressivos para RCS. Contudo, a adição da fibra promoveu alterações no comportamento mecânico da mistura, indicando um comportamento com maior ductilidade, principalmente nas misturas com maiores teores de fibra.

As análises dos compósitos formados por solo, cimento e fibra de coco revelam indicativos positivos da influência do reforço fibroso em solo-cimento, apresentando um comportamento geral de melhoria mecânica. Nas misturas com 5% e 9% de cimento, observou-se uma tendência de aumento da resistência conforme a elevação do teor de fibra nas misturas, atingindo valores de até 2,49 MPa. Esse comportamento sugere que a fibra contribui para um rearranjo estrutural mais eficiente e atua de forma complementar à matriz, atenuando a fragilidade típica de materiais rígidos. Já para as amostras com 7% de cimento, as resistências mostraram-se mais próximas entre si, indicando que a rigidez da matriz cimentícia pode tornar a contribuição das fibras menos significativa nesse intervalo específico.

Diante desses resultados, é possível indicar que o compósito que atende ao critério normativo de resistência à compressão simples mínima de 2,1 MPa e que apresenta o menor

teor de cimento, reduzindo, assim, os custos associados, é a amostra S5C1F. No Gráfico 4, está representada sua curva representativa, demonstrando-se um compósito com maior resistência de pico e pós-pico que o solo puro e que as misturas com solo-cimento.

Gráfico 4 – Curva de RCS x Deformação do S5C1F



Fonte: Autora.

É possível ainda realizar uma análise visual das fissuras dos corpos de prova do ensaio de Resistência à compressão simples, como exemplo o da Figura 23. Percebe-se que as fibras funcionam como pontes de transmissão de tensões na região das fissuras, amenizando a abertura destas.

Figura 23 - Fissura no corpo de prova do ensaio de RCS

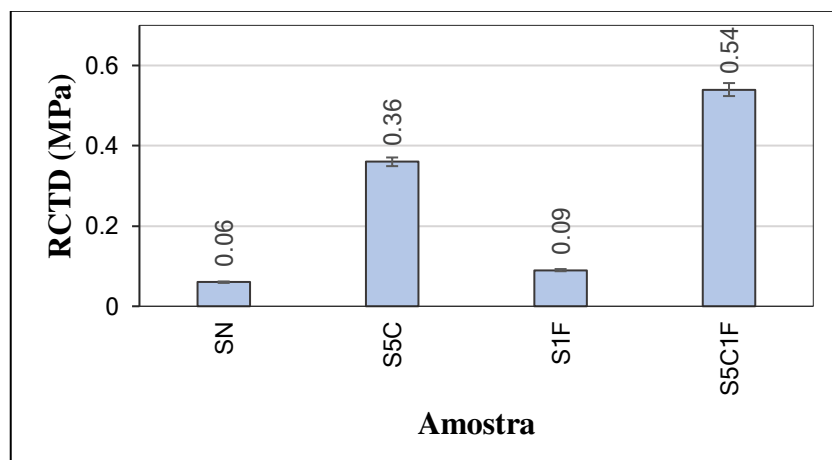


Fonte: Autora.

#### 4.2.3 Resistência à Compressão por Tração Diametral

Por meio do ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral, obtiveram-se os resultados compilados no Gráfico 5. Inicialmente, nota-se que SN apresentou um valor reduzido de RTCD, igual a 0,06 MPa, com a adição de 5% de cimento houve um incremento no valor para 0,36 MPa. Em relação a adição de 1% da fibra de coco o valor de RTCD foi para 0,09 MPa, indicando um aumento discreto quando comparado ao SN.

Gráfico 5 - Resultado da Resistência à Compressão por Tração Diametral



Fonte: Autora.

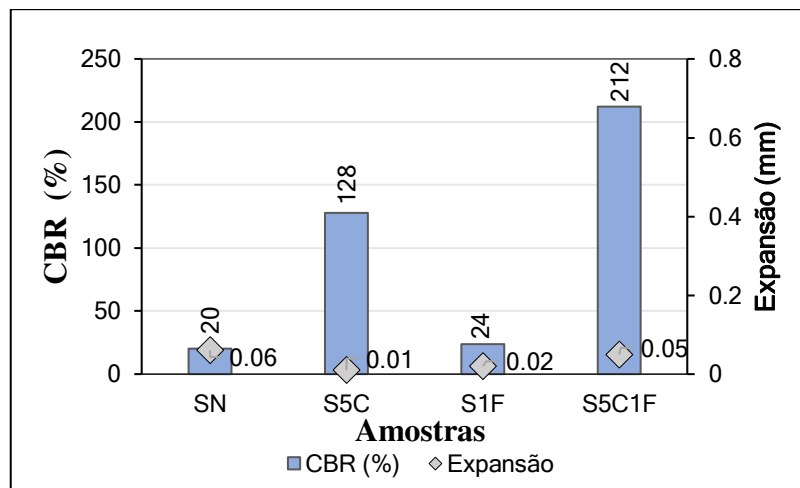
O compósito S5C1F, por sua vez, apresentou o maior valor de RTCD, atingindo 0,54 MPa, o que representa um incremento de aproximadamente 50% em relação ao S5C. Demonstrando a interação favorável entre o cimento e a fibra de coco, enquanto o cimento confere rigidez à matriz, a fibra atua no controle da propagação de fissuras, resultando em um comportamento mais dúctil. Isso se traduz no aspecto de ruptura dos corpos de prova, que aconteceu de forma semelhante aos de RCS, a fibra impede o CP de fragmentar abruptamente.

Essa alteração no comportamento mecânico associada à adição de fibras de coco também foi observada por Brito (2022) em compósitos cimentícios. Entretanto, diferentemente dos resultados obtidos nesta pesquisa, a autora identificou uma leve redução nos valores de RTCD, o que pode estar relacionado às características das fibras utilizadas, como comprimento médio em torno de 20 mm e teor de 0,5%. Conforme discutido por Gray e Ohashi (1983), incrementos de resistência tendem a ser mais expressivos para maiores comprimentos e teores de fibras, até um limite a partir do qual esse efeito deixa de ser observado.

#### 4.2.4 Índice de Suporte Califórnia

O ensaio de Índice de Suporte Califórnia foi realizado para as seguintes misturas: SN, S5C, S1F e S5C1F, com os resultados de CBR e expansão sintetizados no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Resultado do ensaio de Índice de Suporte Califórnia



Fonte: Autora.

Pode-se observar que o CBR do SN atingiu 20%, valor mínimo estipulado pelo DNIT para uso em sub-base. A estabilização com 5% de cimento (S5C), por sua vez, promoveu um incremento na capacidade de suporte, elevando o CBR para 128%. A mistura SF1 apresentou um CBR de 24%, valor ligeiramente maior que o SN. O compósito S5C1F apresentou o maior valor de capacidade de suporte, chegando a 212%, o que corresponde a um incremento de mais de 950% em relação ao solo natural e substancialmente superior ao obtido pela estabilização apenas cimentícia.

Os valores de expansão obtidos foram inferiores a 0,06% para todas as amostras analisadas. Esses resultados indicam comportamento volumétrico estável das misturas, com expansões consideradas desprezíveis. Além disso, os valores observados situam-se abaixo do limite máximo de 0,5% estabelecido pelo DNIT (2006) para a aplicação do material em camadas de base de pavimentos.

Gonçalves et al. (2017) realizaram um estudo avaliando o potencial do uso combinado de fibras e cimento no melhoramento de solos. Os autores verificaram que o compósito contendo 2% de cimento e 1% de fibra apresentou um ISC de 147,20%, valor considerado adequado para aplicação em camadas de pavimentos. Ressalta-se, entretanto, que há diferenças na composição do material em relação ao presente estudo, uma vez que foi

utilizado cimento CP V-ARI RS e fibras sintéticas de polipropileno. Todavia, o estudo de Brito (2022) evidencia a contribuição das fibras de coco no aumento do CBR em misturas cimentícias que foram de 163,6% quando solo-cimento para 172,4% com o acréscimo de 0,5% fibra de coco.

#### 4.2.5 Módulo de Resiliência

Nesta pesquisa, para avaliar os resultados obtidos no Ensaio de Módulo de Resiliência, optou-se pela utilização dos modelos clássicos empregados na descrição do comportamento resiliente de solos, além do modelo composto, como mencionado anteriormente. Na Tabela 9, está listado os resultados obtidos para cada modelo com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

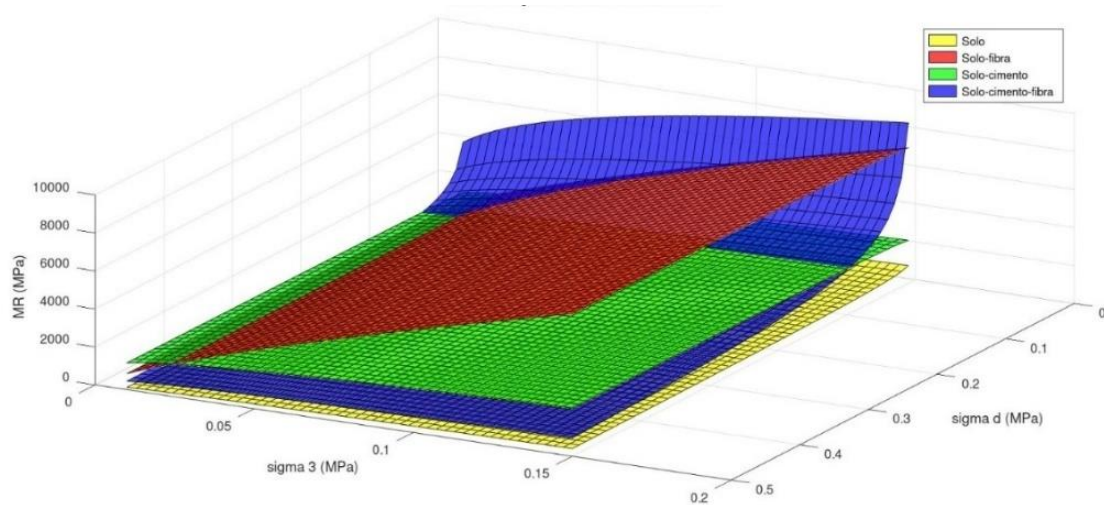
Tabela 9 - Resultados Módulo de Resiliência

| Amostra      | Modelo 1                        |       |                | Modelo 2                        |       |                | Modelo 3                                             |      |       |                |
|--------------|---------------------------------|-------|----------------|---------------------------------|-------|----------------|------------------------------------------------------|------|-------|----------------|
|              | MR = $K_1 \cdot \sigma d^{K_2}$ |       |                | MR = $K_1 \cdot \sigma_3^{K_2}$ |       |                | MR = $K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \cdot \sigma d^{K_3}$ |      |       |                |
|              | K1                              | K2    | R <sup>2</sup> | K1                              | K2    | R <sup>2</sup> | K1                                                   | K2   | K3    | R <sup>2</sup> |
| <b>SN</b>    | 679,09                          | 0,21  | 0,52           | 439,32                          | 0,07  | 0,09           | 770,73                                               | 0,42 | -0,21 | 0,77           |
| <b>S5C</b>   | 4021,7                          | 0,27  | 0,63           | 2939,23                         | 0,18  | 0,52           | 3882,78                                              | 0,21 | 0,04  | 0,66           |
| <b>S1F</b>   | 31746,1                         | 0,78  | 0,69           | 11534,1                         | 0,54  | 0,69           | 31116,9                                              | 0,75 | 0,03  | 0,99           |
| <b>S5C1F</b> | 1061,35                         | -0,18 | 0,14           | 934,88                          | -0,28 | 0,52           | 1423,5                                               | 0,32 | -0,49 | 0,67           |

Fonte: Autora.

A representação gráfica de todos os modelos adotados está sintetizada no Apêndice A. A Figura 24 apresenta a comparação entre as superfícies dos modelos compostos ajustados para as misturas analisadas, permitindo a visualização conjunta da influência da tensão confinante ( $\sigma_3$ ) e da tensão desviadora ( $\sigma_d$ ) no comportamento resiliente dos materiais.

Figura 24 - Comparação das superfícies dos Modelos Compostos



Fonte: Autora.

A comparação entre os materiais e os modelos ajustados evidencia diferenças claras no comportamento mecânico de cada mistura. Para o solo natural, o modelo composto foi o que apresentou melhor desempenho estatístico. Além disso, os modelos simples indicaram que esse material é mais sensível à tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ) do que à tensão desviadora ( $\sigma_d$ ), comportamento típico de solos arenosos, cuja rigidez aumenta com o confinamento.

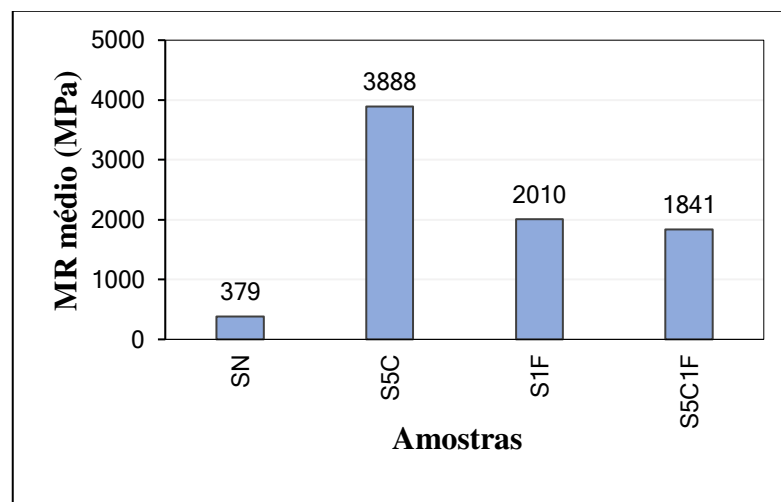
A análise do MR dos materiais de referência indicou comportamentos distintos: no solo-cimento, os coeficientes de determinação dos modelos foram próximos quando aplicado carregamento com tensão confinante, sugerindo que a alta rigidez reduz a sensibilidade do ajuste em procedimentos voltados a solos não cimentados; entretanto, no procedimento para materiais cimentados, o modelo univariável em função de  $\sigma_d$  apresentou boa correlação, apontando relação consistente do MR com o nível de carregamento. No solo-fibra, por sua vez, observou-se excelente ajuste do modelo composto e do modelo simples governado por  $\sigma_3$ , coerente com o comportamento do solo, servindo como base comparativa para discutir o desempenho do compósito solo-cimento-fibra.

Em relação ao solo-cimento-fibra, o modelo composto foi o que melhor representou os dados, além disso, a adição de fibras torna o comportamento do material mais complexo e mais dependente da  $\sigma_d$  do que da confinante. Isso sugere uma matriz mais coesa. Por outro lado, quando submetido ao procedimento voltado a materiais estabilizados, o material apresentou coeficiente  $R^2$  baixo, mostrando que a interação entre fibras e matriz cimentada não é bem captada por modelos potenciais simples sobre este tipo de carregamento.

Assim, os resultados mostram que cada material respondeu de maneira distinta aos modelos e protocolos, com comportamentos coerentes com suas características internas: solos naturais e reforçados com fibras mantiveram forte dependência do confinamento, enquanto misturas cimentadas apresentaram respostas mais associadas ao nível de tensão desviadora e maior sensibilidade ao tipo de carregamento aplicado.

O Gráfico 7 sintetiza os valores médio encontrados para o Módulos de Resiliências das misturas ensaiadas pela metodologia de materiais granulares.

Gráfico 7 - Valores de Módulo de Resiliência Médio pela norma DNIT 134/2018–ME

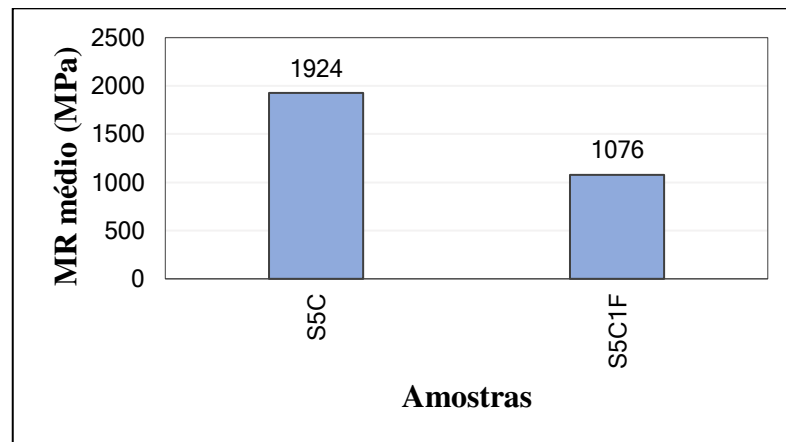


Fonte: Autora.

Observa-se que adição de 5% de cimento (S5C) promoveu um aumento expressivo na rigidez do solo em relação ao solo natural, elevando o MR de 379 MPa para 3888 Mpa, quando avaliado sob condições de ensaio com aplicação de tensão confinante. O que representa um ganho muito significativo na capacidade de recuperação elástica do material. A incorporação isolada de 1% de fibra (S1F) também melhorou o comportamento resiliente, atingindo 2010 MPa. Para a mistura S5C1F, observou-se MR intermediário de 1841 MPa, sugerindo que a inclusão de fibra tende a reduzir parte da rigidez proporcionada apenas pelo cimento, possivelmente devido ao aumento da ductilidade da matriz.

O Gráfico 8 compila os valores médios encontrados para o Módulos de Resiliências das misturas submetidas a metodologia para materiais estabilizados quimicamente.

Gráfico 8 - Valores de Módulo de Resiliência Médio pela norma DNIT 181/2018–ME



Fonte: Autora.

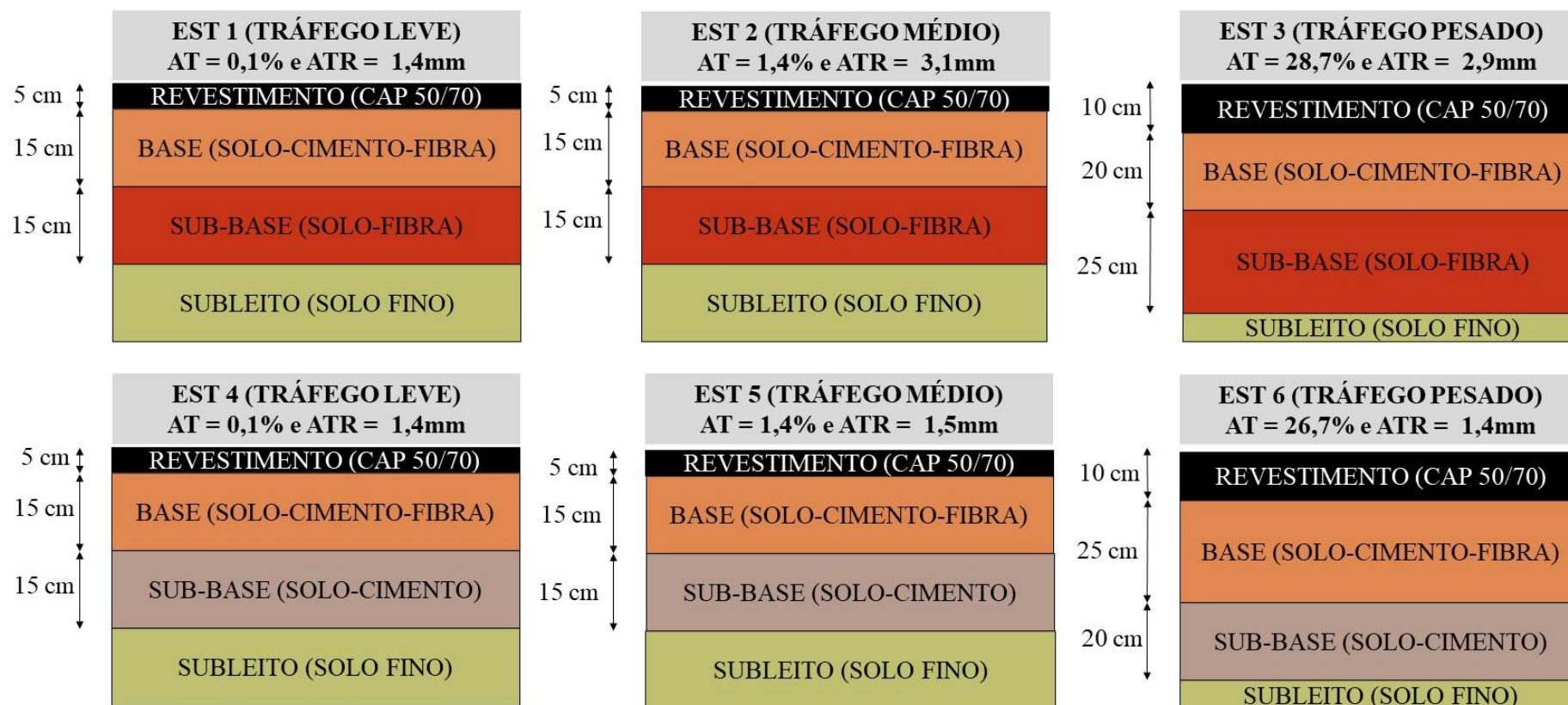
A análise dos resultados indica que os valores de módulo de resiliência foram inferiores àqueles obtidos sob condições de carregamento com aplicação de tensão confinante, para um mesmo material. Tal comportamento está associado às diretrizes da metodologia aplicada a materiais estabilizados, que impõe carregamentos mais severos na ausência de confinamento. Em contrapartida, a aplicação de tensões confinantes favorece o aumento do MR, especialmente em materiais de maior rigidez ou com estrutura parcialmente estabilizada.

Brito (2022) avaliou o comportamento de misturas solo-cimento reforçadas com fibras e observou que, aos 7 dias de cura, a incorporação da fibra resultou em redução do módulo de resiliência. Enquanto a mistura solo-cimento apresentou MR médio de 373 MPa, o compósito solo-cimento-fibra atingiu 255 MPa. Esse resultado é compatível com o observado no presente estudo e indica que, em idades iniciais, a presença da fibra pode interferir na rigidez da matriz cimentada. Com o avanço do tempo de cura, contudo, o comportamento se inverte. Aos 28 dias, o autor registrou MR de aproximadamente 520 MPa para a mistura com fibra, evidenciando o efeito positivo da maturação da matriz na mobilização do reforço fibroso.

#### 4.3 Dimensionamento do pavimento

Analizando os resultados, o compósito S5C1F, foi considerado apto para aplicação como camada de base, apresentando um  $RCS = 2,25 \text{ MPa}$ . Já os materiais solo-fibra e solo-cimento, por sua vez, foram inseridos nas análises como alternativas para a camada de sub-base. As estruturas resultantes da análise do *software* MeDiNa, seguem na Figura 25.

Figura 25 – Estruturas Resultantes das análises de dimensionamento pelo método MeDiNa



Fonte: Autora.

Os resultados obtidos por meio do dimensionamento mecanístico-empírico no MeDiNa, indicam que para ambos os materiais utilizados como sub-base, as estruturas destinadas aos tráfegos leve e médio atenderam aos critérios de desempenho com as espessuras mínimas aceitas pelo *software*. Somente no cenário de tráfego pesado foi necessário realizar o aumento das espessuras das camadas estruturais, a fim de atender às exigências de resistência e durabilidade.

As estruturas avaliadas apresentaram desempenho que atendem aos limites estabelecidos. Destacou-se os resultados do tráfego leve (EST 1 e 4) com AT próximo de zero, indicando que, praticamente, não há fadiga na superfície do pavimento. O tráfego médio (EST 2 e 5) apresentou valores inferiores a 1,4%, enquanto no tráfego pesado a área foi próxima, porém, ainda abaixo do limite requerido de 30%. Em todas as análises, os valores de ATR foram inferiores a 3 mm, atendendo o valor máximo de 13mm.

Observa-se que a variação das espessuras das camadas estruturais depende do material empregado na sub-base. Nas estruturas com sub-base em solo-fibra (EST 2 e EST 3), o aumento do nível de tráfego implicou acréscimos de 5 cm na base e 10 cm na sub-base, enquanto nas estruturas com sub-base em solo-cimento (EST 5 e EST 6) os acréscimos foram de 10 cm na base e 5 cm na sub-base. Do ponto de vista técnico-econômico, esse resultado indica que, embora o solo-cimento proporcione maior rigidez à sub-base, o dimensionamento para tráfego mais elevado tende a exigir maiores espessuras da base, aumentando o consumo de cimento e o custo de execução da estrutura.

De modo geral, os resultados obtidos reforçam o bom desempenho das soluções analisadas no âmbito do dimensionamento mecanístico-empírico. Contudo, ressalta-se que, para análises mais precisas e para a consolidação definitiva do comportamento mecânico das misturas ao longo da vida útil do pavimento, a realização de ensaios específicos de deformação permanente e de fadiga mostra-se fundamental. Esses ensaios fornecem parâmetros essenciais para o refinamento dos modelos de previsão e para o aumento da confiabilidade dos resultados de dimensionamento, especialmente em cenários de tráfego mais elevado.

## 5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa avaliou o comportamento mecânico de misturas de solo-cimento reforçadas com fibra de coco, com foco em sua aplicabilidade para camadas de pavimentação rodoviária. Os resultados analisados permitiram verificar os efeitos da incorporação da fibra e da variação dos teores de cimento no desempenho dos compósitos.

A caracterização geotécnica indicou que o solo estudado apresenta comportamento compatível com materiais empregados em pavimentação, sendo adequado à aplicação de técnicas de estabilização. A incorporação do cimento e da fibra de coco não comprometeu o processo de compactação, mantendo condições compatíveis para a execução.

De modo geral, a incorporação da fibra de coco atuando em conjunto com a matriz cimentada contribuiu para o aumento da resistência e favoreceu um comportamento mecânico mais dúctil dos compósitos, com maior integridade estrutural após a ruptura. Esse efeito evidencia a atuação das fibras como elementos de reforço, capazes de promover a redistribuição de tensões e de retardar a propagação de fissuras, aspecto desejável em camadas de pavimentos submetidas a solicitações repetidas.

Dentre as misturas avaliadas, o compósito S5C1F destacou-se por apresentar o melhor equilíbrio entre desempenho mecânico e consumo de materiais, atendendo aos critérios normativos para aplicação em camadas de base cimentadas. Essas evidências reforçam a viabilidade técnica da mistura estudada e indicam que sua utilização pode representar uma alternativa eficiente para regiões caracterizadas pela escassez de solos de boa qualidade, ampliando as possibilidades de uso de materiais regionais em projetos de pavimentação.

O dimensionamento estrutural realizado com o *software* MeDiNa indicou que o compósito solo-cimento-fibra se destaca como a alternativa mais promissora para aplicação em camadas de base, ao passo que as misturas solo-cimento e solo-fibra mostraram-se adequadas para camadas de sub-base. Inclusive em cenários de maior volume de tráfego, desde que sejam realizados ajustes apropriados nas espessuras das camadas estruturais.

Conclui-se que a incorporação da fibra de coco em misturas de solo-cimento mostra-se uma alternativa tecnicamente viável para aplicação em camadas de pavimentação rodoviária, contribuindo para a melhoria do desempenho mecânico e do comportamento estrutural dos materiais. Ademais, essa solução favorece a redução do consumo de aglomerantes, amplia as possibilidades de uso de solos locais e contribui para o reaproveitamento de resíduos vegetais.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

De modo a ampliar o estudo desenvolvido neste trabalho e responder algumas questões que surgiram durante o desenvolvimento deste, seguem algumas sugestões e recomendações para elaboração de trabalhos posteriores:

- Realizar os ensaios de deformação permanente e fadiga, para complementar a análise do comportamento mecânico das misturas;
- Realizar a análise da viabilidade econômica;
- Realizar os mesmos ensaios com diferentes comprimentos da fibra de coco;
- Realizar novas composições de dosagens de solo-fibra, com a adição de cal e avaliar quais as novas características mecânicas se apresentam;
- Executar ensaios com outros tipos de solo, a fim de se investigar a interação da fibra de coco com diferentes matrizes.
- Avaliar a durabilidade da fibra ao longo prazo;
- Investigar o uso de tratamentos superficiais a serem aplicados nas fibras, buscando melhorar sua durabilidade.

## REFERÊNCIAS

- AGUILAR, Jaime Rodrigo Tamayo. **Análise do comportamento mecânico de um solo arenoso reforçado com fibras de coco**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- ALENCAR, Victor Lindemberg de Lima. **Caracterização geotécnica de solo estabilizado com cimento e cinzas de resíduos sólidos da saúde**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.
- ALMEIDA, Guilherme Bravo de Oliveira. **Incorporação de escória de cobre pós-jateada a um solo areno-argiloso de Sergipe para aplicação em base de pavimentos**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- ALMEIDA, Lorhayne Well de; SOUZA, Lucas Henrique Pereira de; ALMEIDA, Willian Mateus de Souza; SILVA JÚNIOR, Flávio Vieira da. Estabilização química do solo com adição de sílica ativa e cimento para utilização em camadas de pavimentação rodoviária. **Engineering Sciences**, v. 7, n. 1, p. 11-21, 2019.
- ANGGRAINI, Vivi; ASADI, Afshin; HUAT, Bujang B. K.; NAHAZANAN, Haslinda. Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil. **Measurement**, v. 59, p. 372–381, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7. ed. São Paulo: ABCP, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12253: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento — Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2007.
- BATALIONE, Giovane. **Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedra de uma rocha granítica**. 2007. 172 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- BERNARDINA, Fernanda Pecemilis Dalla. **Influência da degradação de fibras no comportamento mecânico dos solos reforçados**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras; ABEDA, 2022.
- BOLAÑOS, Rafael Eduardo Zaccour. **Comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com fibras de coco**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2010

BRITO, Jessica Rodrigues. **Efeito da adição de fibras de coco em misturas cimentadas com agregados reciclados para subcamadas de pavimentos**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

CABALA, Guillermo Van Erven. **Estudo do comportamento mecânico de estruturas de solo-cimento reforçado com fibras de coco e hastes de bambu**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

CARVALHO, José Camapum et al. (org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – ABMS, 2023.

CASAGRANDE, Michéle Dal Toé. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CHAPLE, Parag M.; DHATRAK, A. I. Performance of coir fiber reinforced clayey soil. **The International Journal of Engineering and Science**, v. 2, n. 4, p. 54–64, 2013.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2024**. Brasília: CNT; SEST SENAT; ITL, 2024.

COSTA, Savila Vieira. **Análise do comportamento mecânico e da durabilidade de compósitos em matriz de solo areno-argiloso reforçados com a fibra natural do coco (Cocos nucifera L.)**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos da engenharia geotécnica**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 041/94**: Solos - preparação de amostras para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 080/94**: Solos – análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 082/94**: Solos- determinação do limite da plasticidade: Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 122/94**: Solos- determinação do limite de liquidez- método de referência e método expedito: Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 162/94**: Solos- ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 181/94**: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 201/94**: Solos-cimento – compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 202/94**: Solos-cimento – moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 216/94**: Solos-cimento – determinação da relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Glossário de termos técnicos rodoviários**. Rio de Janeiro: DNIT, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3.ed. Rio de Janeiro, 2006

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 134/2018-ME**: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136/2018-ME**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 172/2016-ME**: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 181/2018-ME**: Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 258/23**: Solos – Compactação em equipamento miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2023.

DIAS, João José da Fonseca Marques Simões. **Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

FERNANDES, Manuel de M. **Mecânica dos Solos: Conceitos e Princípios Fundamentais (v.1)**. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2016

FERREIRA, José Wilson dos Santos. **Comportamento mecânico de misturas solos-cimento para aplicação em pavimentos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.

FREITAS, Thaís Mota. **Comportamento mecânico a longo prazo de um solo reforçado com fibras de coco**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2022.

GALVÃO NETO, Leoncio Soares. Utilização de fibras naturais como reforço de materiais compósitos poliméricos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 9, n. 12, p. 30815-30824, dez. 2023.

GONÇALVES, Haikel Baganem Busgaib; OLIVEIRA, Francisco Heber Lacerda de; QUARIGUASI, José Breno Ferreira; AGUIAR, Marcos Fábio Porto de. Estudo de reforço de solo para pavimentos rodoviários com a utilização de fibra de polipropileno e cimento. In: **20ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA**, 2017, Florianópolis. *Anais...* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2017.

GRAY, D.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 109, n. 3, p. 335–353, 1983.

HUSS, Fábio de Oliveira. **Estabilização química de solos para fins rodoviários**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. SIDRA – Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Tabela 1613: Área destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras permanentes** [Internet]. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613>. Acesso em: 22 nov. 2025.

JAMALDAR, Amirhossein; ASADI, Parsa; SALIMI, Mahdi; PAYAN, Meghdad; RANJBAR, Payam Zanganeh; ARABANI, Mahyar; AHMADI, Hadi. Application of natural and synthetic fibers in bio-based earthen composites: a state-of-the-art review. **Results in Engineering**, v. 25, 2024.

KNAPPETT, J. A.; CRAIG, R. F. **Mecânica dos solos**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

LACERDA, Monique Silva; LEITÃO, Fabrício. O coco verde no contexto da economia circular: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Agroambiental**, v. 14, n. 3, p. 667–679, 2021.

LIMA, Danilo Alves de Souza. **Efeito da adição de cimento Portland e RAP na estabilização de solo argiloso da Formação Guabirotuba**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

LITTLE, D. N.; NAIR, S. **NCHRP Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials**. Texas: College Station, 2009.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MENEZES, Lucas Chagas Paes de. **Análise do comportamento físico e mecânico de solo areno-argiloso reforçado com fibras do coco verde**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Pernambuco, Recife, 2018.

MITTAL, Ayush. Effect of coir fibres on strength, thickness and cost of PMGSY roads. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1136, 2021.

NEVES, Waleskha Benevenuto Pinto; SANTIAGO, Marília Cavalcanti; SOUSA, Cláwsio Rogério Cruz de; CARMO, Shirlene Kelly Santos. Incorporação de fibra de coco na camada de revestimento asfáltico de pavimentos flexíveis. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 7, n. 1, p. 11–18, 2022.

NOGAMI, Job Shuji; VILLIBOR, Douglas Fadul. **Pavimento de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Vilibor, 1995.

NOGAMI, Job Shuji; VILLIBOR, Douglas Fadul. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA**, 1., 1981, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABMS, 1981.

OLIVEIRA, Felício Geraldo de. **Análise da aplicabilidade da classificação MCT na execução de bases rodoviárias com utilização de solos lateríticos estabilizados**. 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

OLIVEIRA JÚNIOR, Antônio Italcly de. **Comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. São Paulo: Terratek, 2007.

PEREIRA, Kiev Luiz de Araújo. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

PEREIRA, Pedro Isaac Damasceno. **Estabilização de solo com bagana de carnaúba para uso em pavimentação**. 2021.

PINTO, Carlos de S. **Curso básico de mecânica dos solos**. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2006.

REIS, Antonio Felipe de Souza Machado. **Análise do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibra de coco**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2022.

ROCHA, Eliane Alves da. **Modelo de negócio inovador para blocos intertravados agregados com resíduos agrícolas de coco verde: uma abordagem sustentável**. 2025. Dissertação (Mestrado em Ciência, Tecnologia e Inovação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2025.

SALES, Lucila Costa. **Análise de propriedades geotécnicas de misturas de solo com concreto asfáltico fresado e cimento Portland para uso em camada de pavimento rodoviário**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2022.

SANTOS, Mayara Luana de Jesus. **Desempenho mecânico e avaliação da durabilidade de serragem de bambu, fibras de coco e fibras de açaí como materiais de reforço de um solo tropical**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

SANTOS, Michele Joyce Pereira dos. **Reforço de um solo erodível com resíduos de construção e fibras de coco babaçu**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2020.

SILVEIRA, Mariana Vela. **Análise do comportamento mecânico e da durabilidade em compósitos de areia reforçada com fibras naturais de curauá e sisal**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SIMONI, Júlia Patrocínio da Silva Coccozza. **Contribuição acerca da dosagem e do comportamento de misturas solo-agregado-cimento para uso em camadas de pavimentos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo dos três solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica**. Dissertação (Mestrado). COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

SOTOMAYOR, Juan Manuel Girao. **Avaliação do comportamento carga-recalque de uma areia reforçada com fibras de coco submetida a ensaios de placa em verdadeira grandeza**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

TAYLOR, Geoffrey D. **Materials in construction: An Introduction**. New York: Routledge, 2013.

TOMCZAK, Fabio. **Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VILLIBOR, Douglas Fadul; ALVES, Driely Mariane Lancarovici. **Pavimentação de baixo custo para regiões tropicais: projeto e construção – novas considerações**. Florianópolis: Tribo da Ilha, 2019.

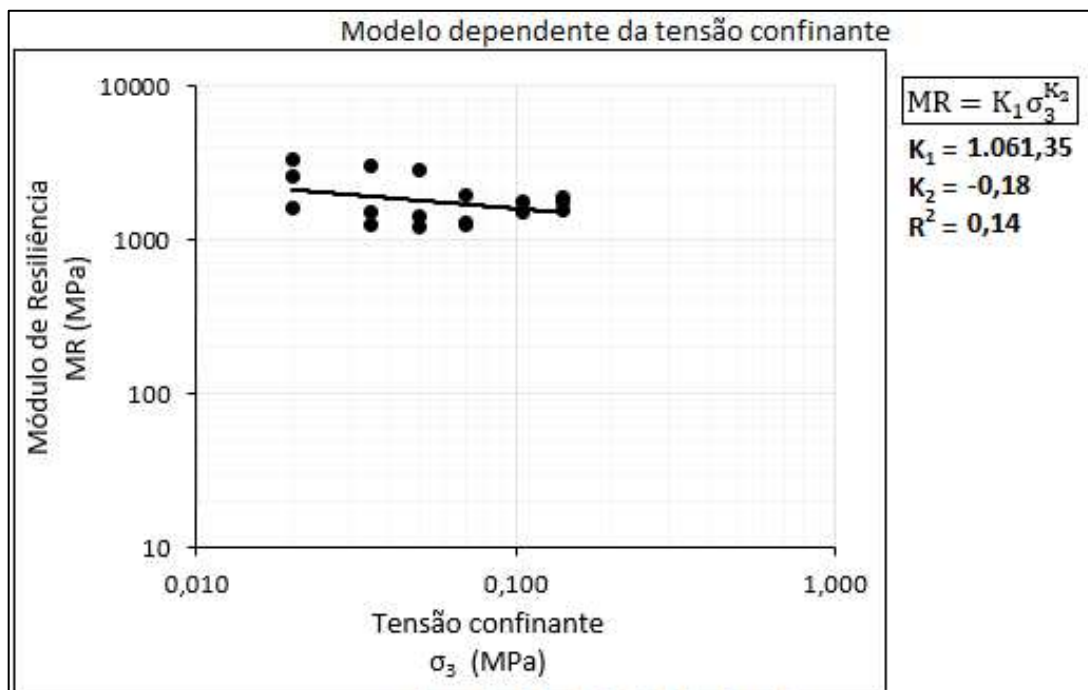
VILLIBOR, Douglas Fadul et al. **Pavimentos de baixo custo para vias urbanas**. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

VIZCARRA, Gino Omar Calderón. **Aplicabilidade de cinzas de resíduo sólido urbano para base de pavimentos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

VOGT, J. C. Estabilização betuminosa. In: **SIMPÓSIO SOBRE PESQUISAS RODOVIÁRIAS**, 7., 1971, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, 1971.

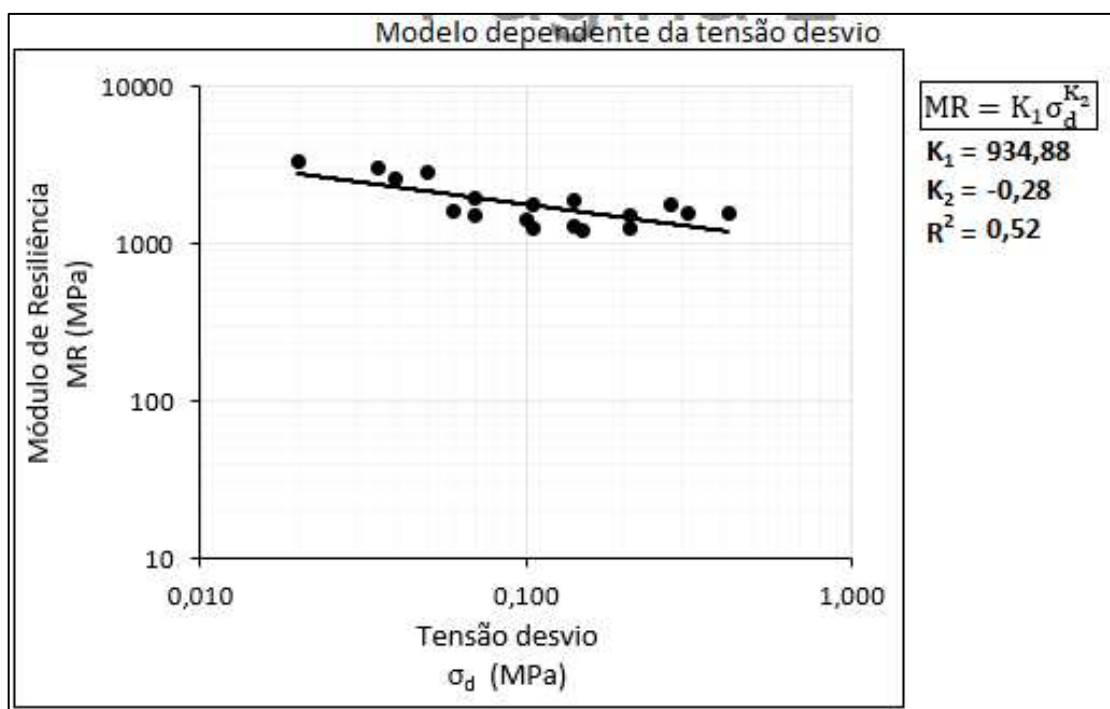
## APÊNDICE A – ENSAIO DE MÓDULO RESILIENTE: MODELOS CLÁSSICOS EMPREGADOS NA DESCRIÇÃO DO COMPORTAMENTO RESILIENTE

Figura A.1 - Modelo 1 para o Módulo de Resiliência do SN



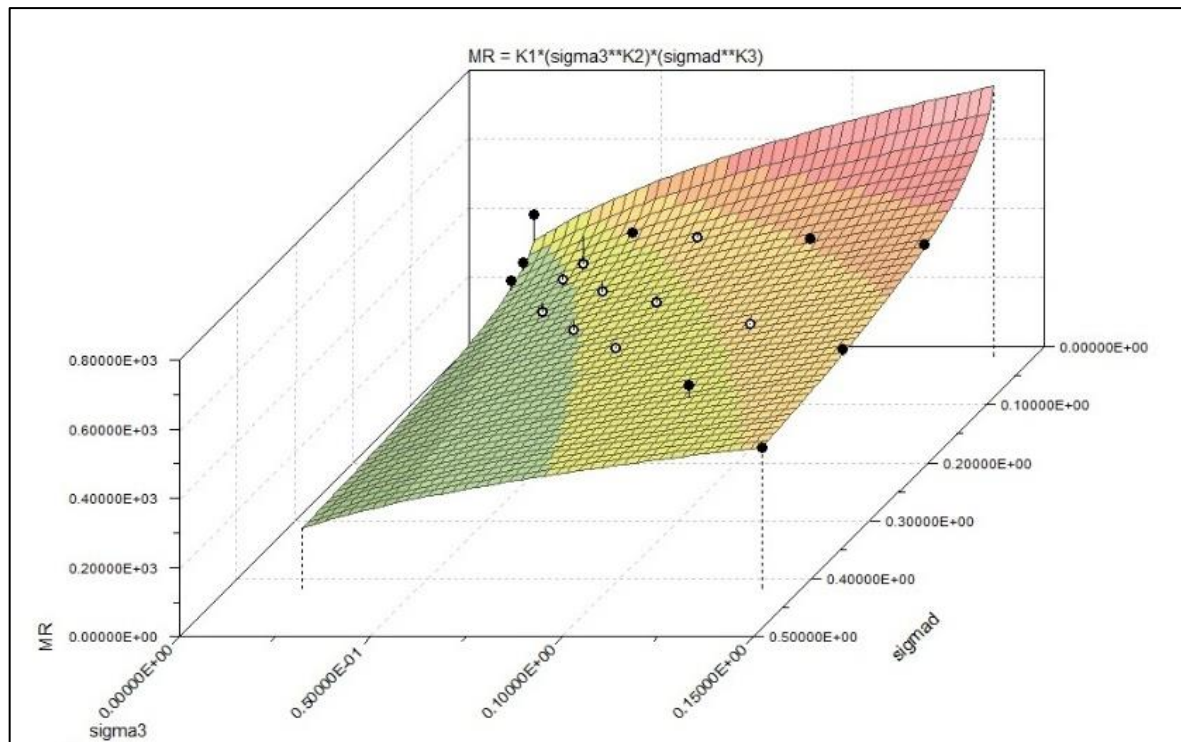
Fonte: Autora.

Figura A.2 - Modelo 2 para o Módulo de Resiliência do SN



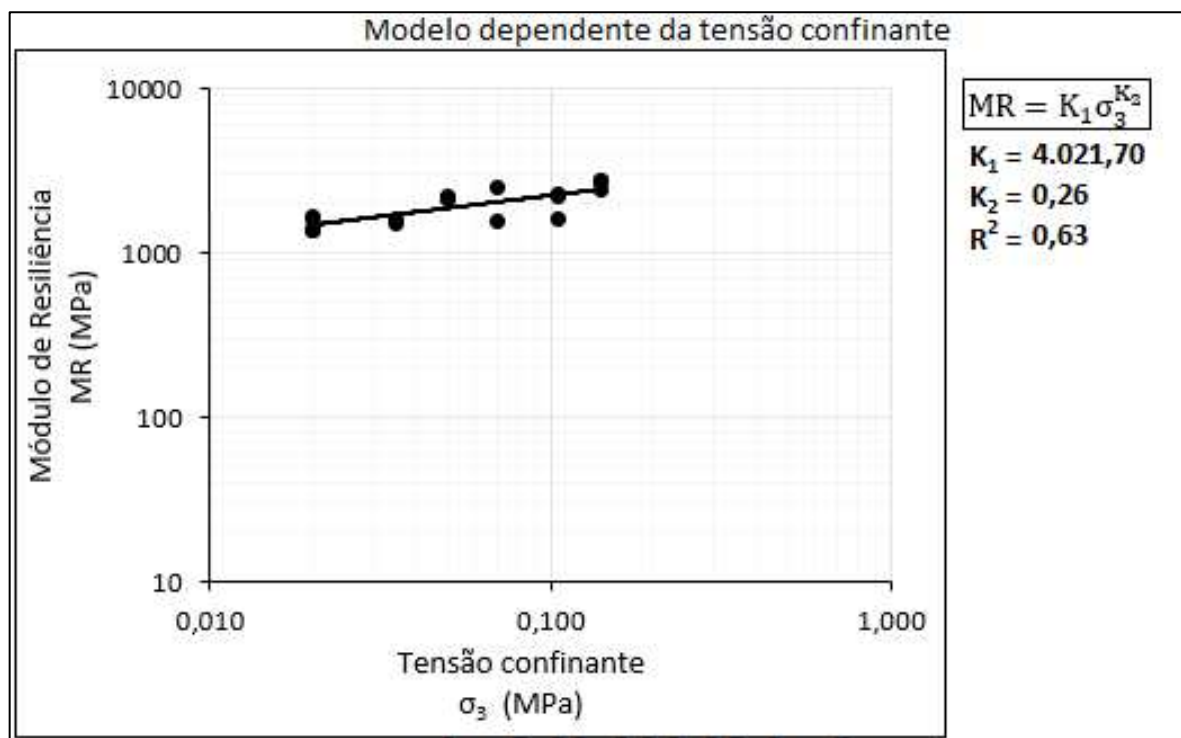
Fonte: Autora.

Figura A.3 - Modelo 3 para o Módulo de Resiliência do SN



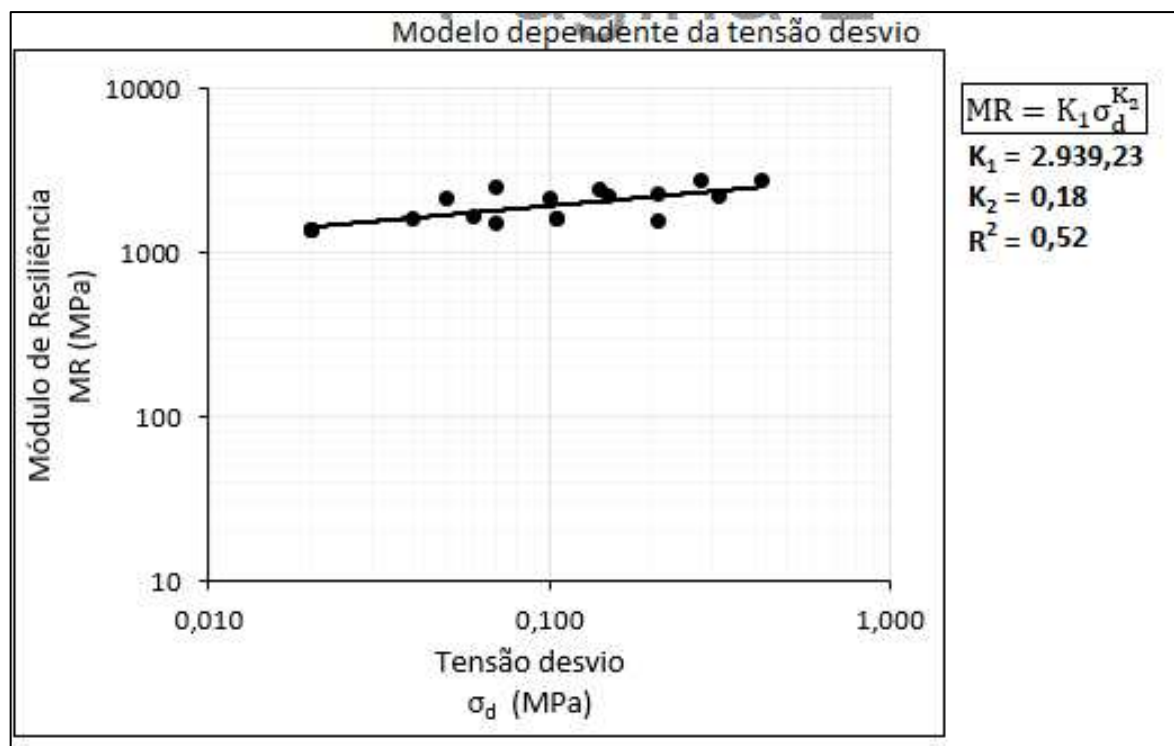
Fonte: Autora.

Figura A.4 - Modelo 1 para o Módulo de Resiliência do S5C



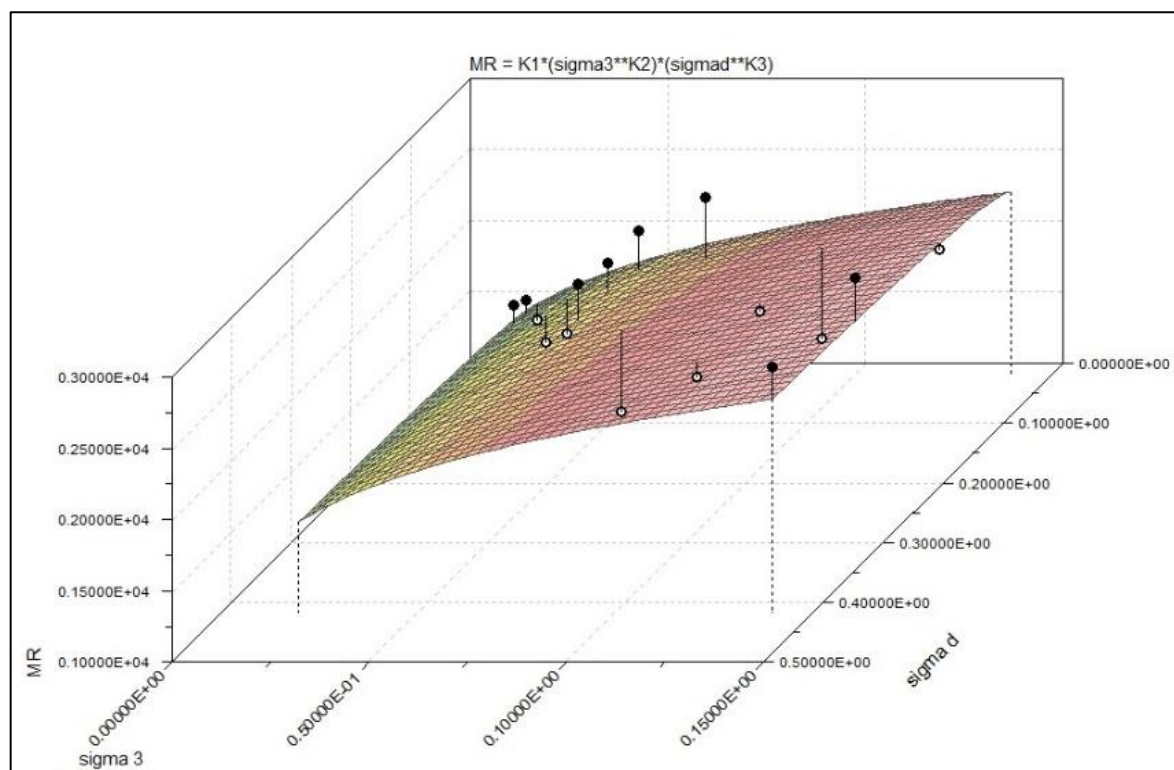
Fonte: Autora.

Figura A.5 - Modelo 2 para o Módulo de Resiliência do SC



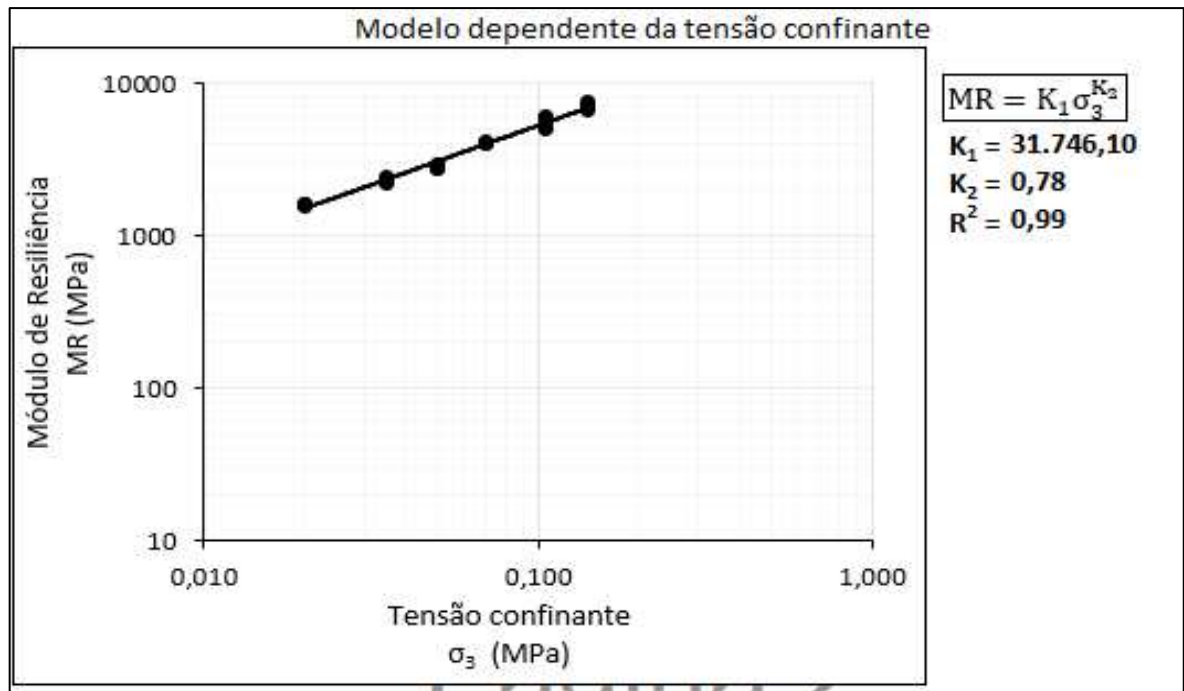
Fonte: Autora.

Figura A.6 - Modelo 3 para o Módulo de Resiliência do SC



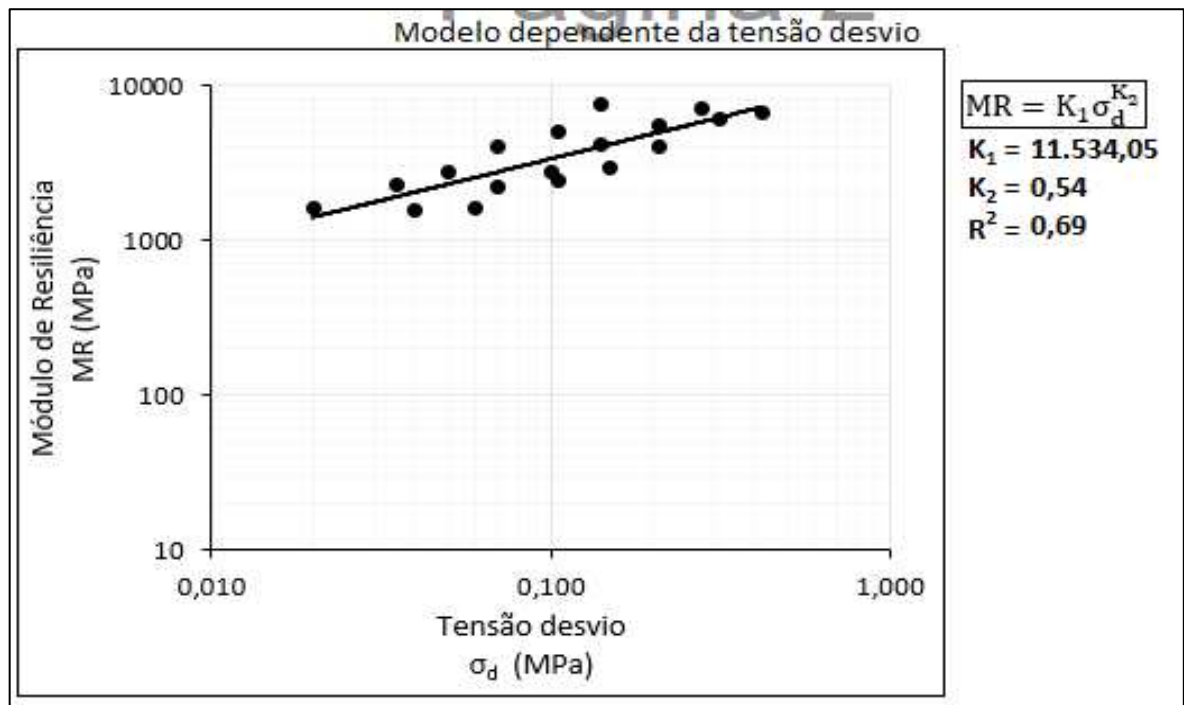
Fonte: Autora.

Figura A.7 - Modelo 1 para o Módulo de Resiliência do S1F



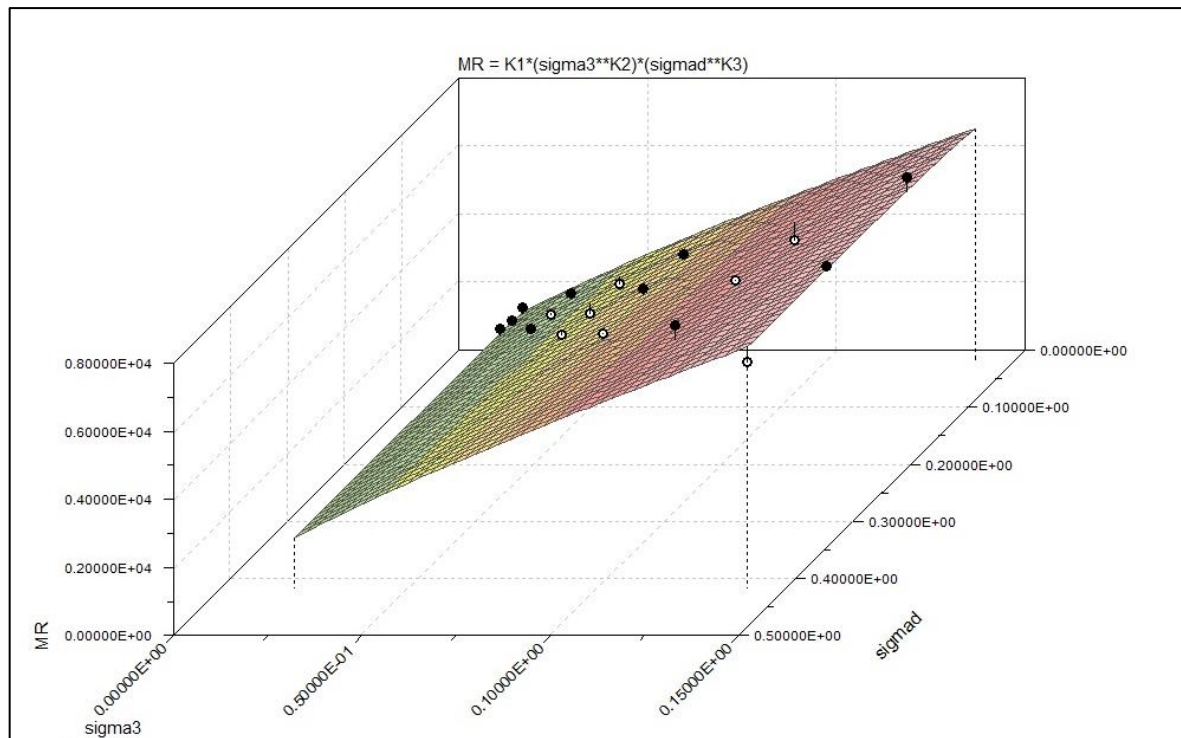
Fonte: Autora.

Figura A.8 - Modelo 2 para o Módulo de Resiliência do S1F



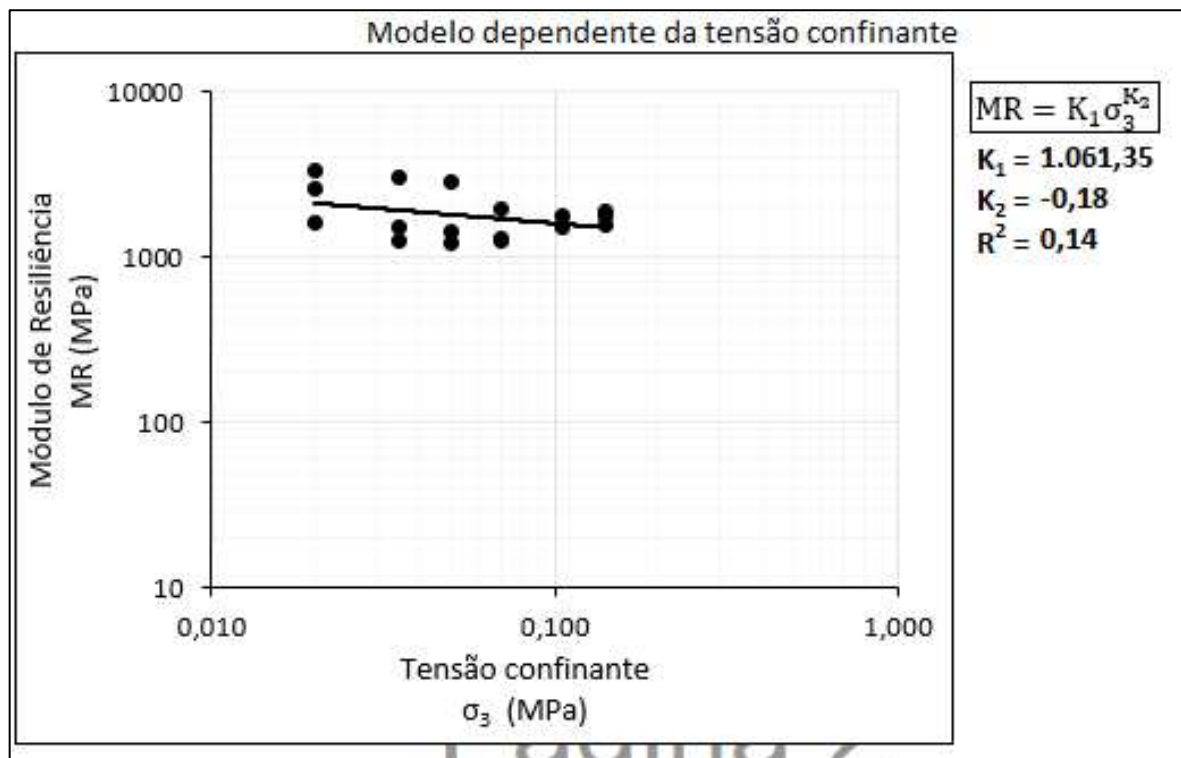
Fonte: Autora.

Figura A.9 - Modelo 3 para o Módulo de Resiliência do 1F



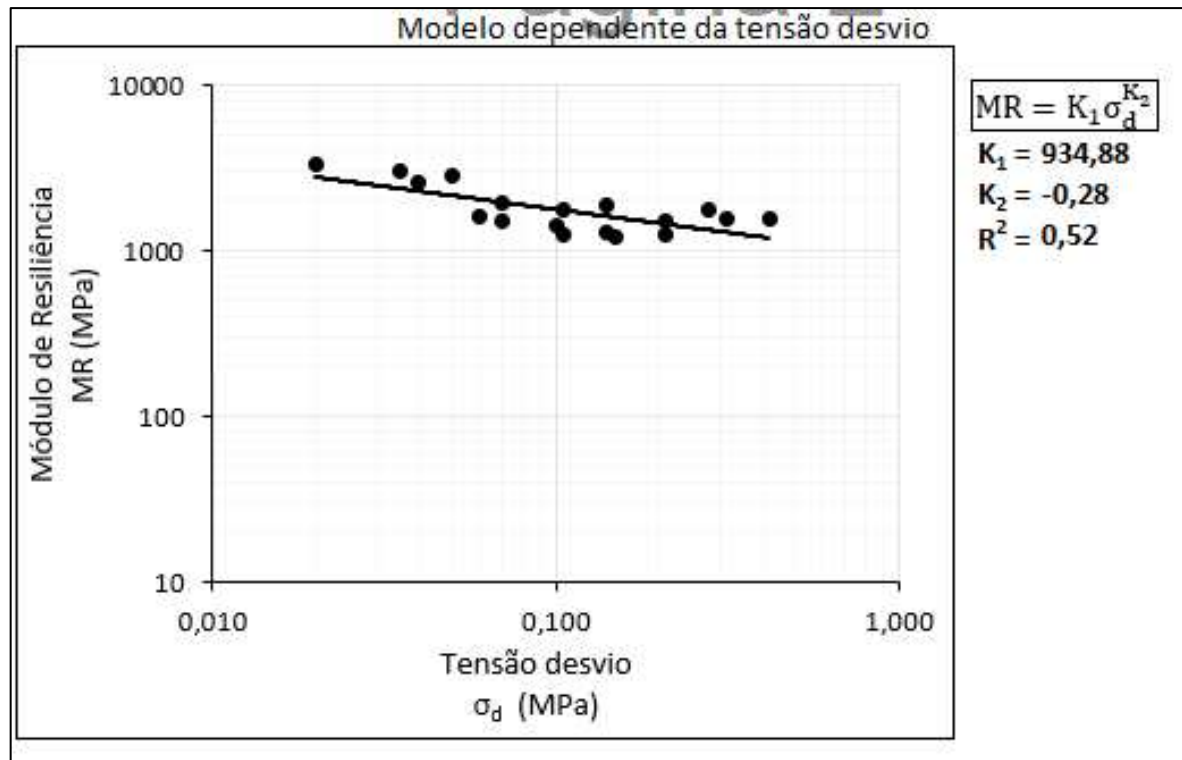
Fonte: Autora.

Figura A.10 - Modelo 1 para o Módulo de Resiliência do S1F



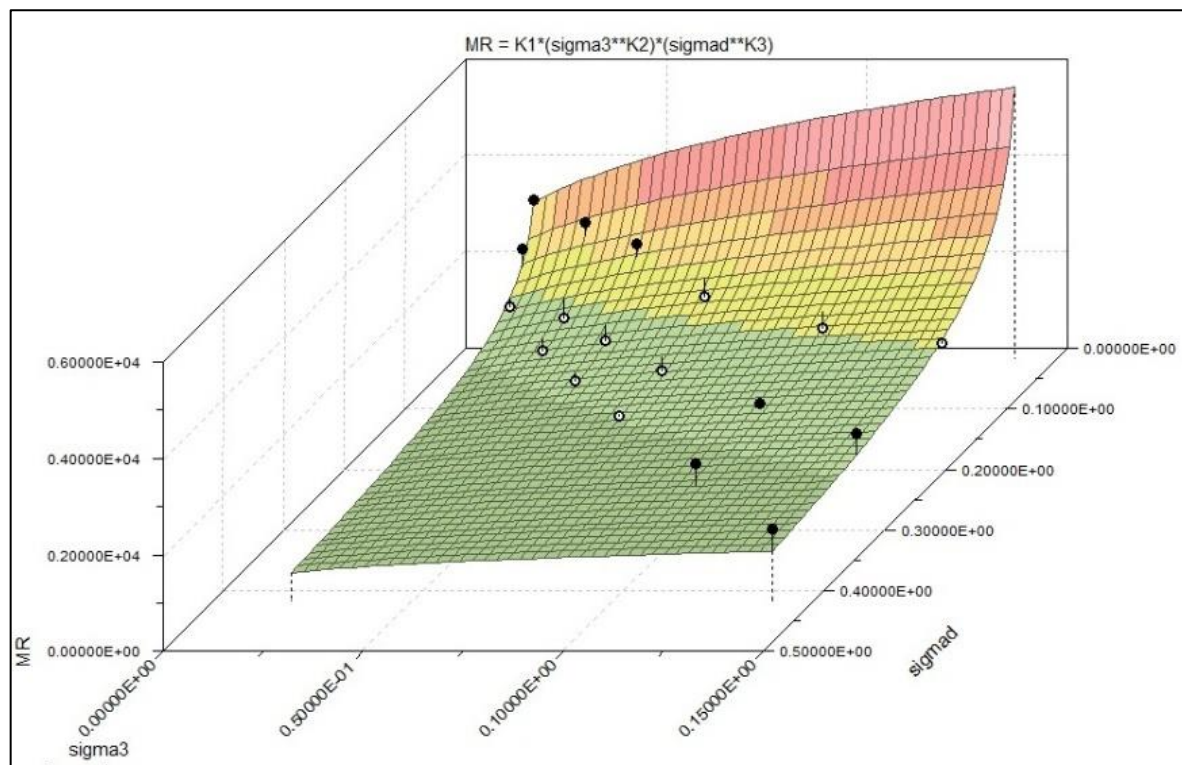
Fonte: Autora.

Figura A.11 - Modelo 2 para o Módulo de Resiliência do S1F



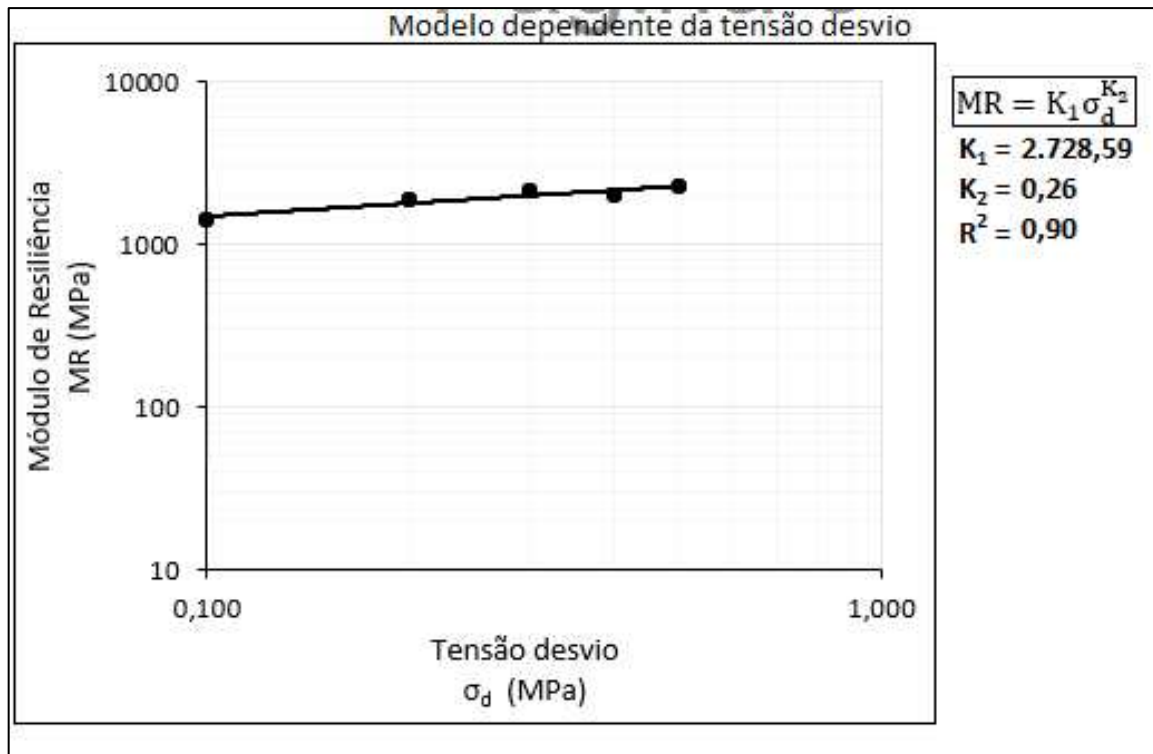
Fonte: Autora.

Figura A.12 - Modelo 3 para o Módulo de Resiliência do 1F



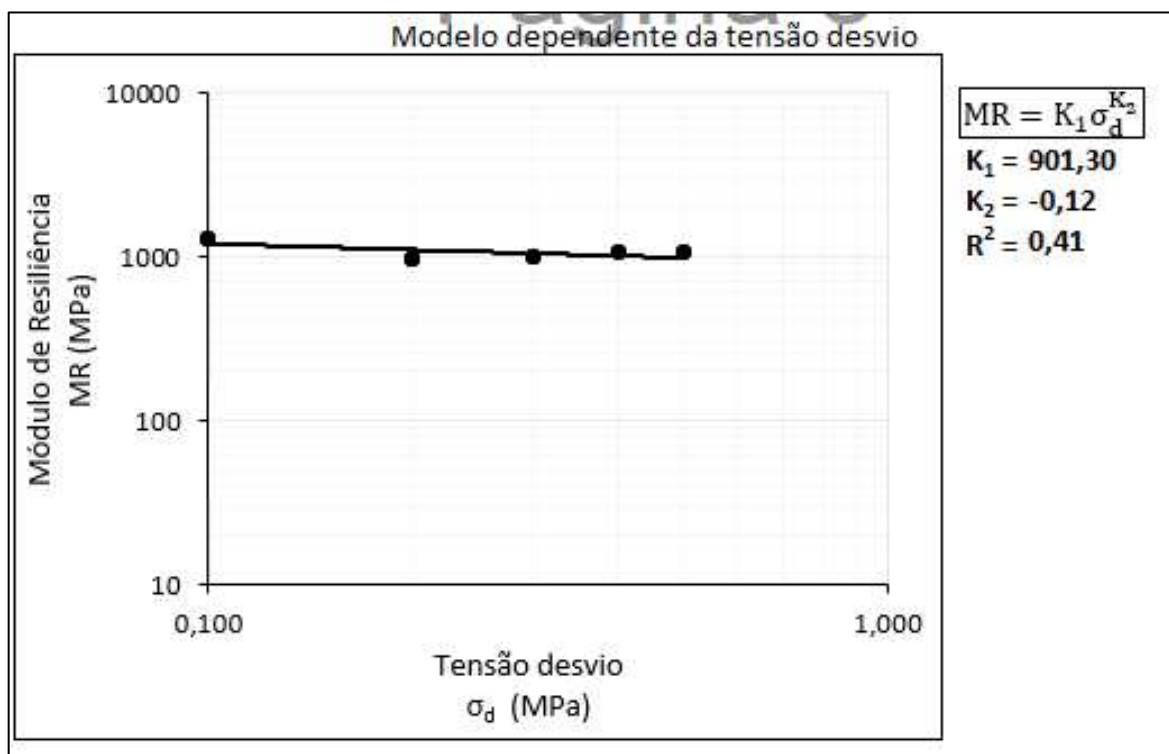
Fonte: Autora.

Figura A.13 - Modelo para o módulo de Resiliência do S5C ensaiado na DNIT 181/2018–ME



Fonte: Autora.

Figura A.14 - Modelo para o Módulo de Resiliência do S5C1F ensaiado na DNIT 181/2018–ME



Fonte: Autora.