



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

*Northeast Geosciences Journal*

v. 10, n° 2 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n2ID34913>



## Banco de dados geotécnico georreferenciado dos subleitos de rodovias federais localizadas no Estado do Ceará/Brasil

### *Georeferenced geotechnical database of subgrades of federal highways located in the State of Ceará/Brazil*

Amanda Maria Gomes Sales Silvestre<sup>1</sup>; Dion Teixeira Saraiva<sup>2</sup>; Mateus Marcial Magalhães Cavalcante<sup>3</sup>; Mariana Gonçalves da Silva<sup>4</sup>; Suelly Helena de Araújo Barroso<sup>5</sup>; Antonio Júnior Alves Ribeiro<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Engenharia Ambiental e Sanitária, Juazeiro do Norte/CE, Brasil. Email: amandamgss@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9254-8439>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Cariri, Engenharia Civil, Juazeiro do Norte/CE, Brasil. Email: saraivadion@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4684-0417>

<sup>3</sup> Universidade Federal do Ceará, Engenharia de Transportes, Fortaleza/CE. Email: mateus.m.m.cavalcante@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9282-8070>

<sup>4</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Engenharia Ambiental e Sanitária, Juazeiro do Norte/CE, Brasil. Email: marigoncalves241@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2950-6791>

<sup>5</sup> Universidade Federal do Ceará, Engenharia de Transportes, Fortaleza/CE, Brasil. Email: suelly@det.ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0580-8706>

<sup>6</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Engenharia Ambiental e Sanitária, Juazeiro do Norte/CE, Brasil. Email: ajar.junior@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6607-6409>

**Resumo:** Este artigo apresenta uma análise de dados de subleitos que foram fornecidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), em formato de relatórios analógicos. As informações foram digitalizadas e transformadas em um banco de dados geotécnicos georreferenciados, através do Microsoft Excel e QGIS Desktop 3.28.9, possibilitando verificações dos resultados e correções de erros de classificação dos solos, dando início à construção de uma plataforma digital para o conhecimento prévio das características geotécnicas de determinadas regiões do Estado, bem como, a geração de modelos e mapas temáticos. A planilha analisada contém: identificação de estudo geotécnico, rodovia, estaca, coordenadas UTM, profundidade de coleta, umidade ótima, massa específica seca máxima, California Bearing Ratio (CBR), expansão, limite de liquidez, índice de plasticidade, granulometria, observações relativas às peculiaridades dos solos analisados, índice de grupo e classificação da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). A análise dos resultados foi feita com a geração de tabelas e gráficos dinâmicos, constatando-se que, de acordo com o CBR, os materiais analisados têm comportamento mecânico adequado para serem utilizados em subleitos de rodovias, e que a classificação da AASHTO consegue prever adequadamente o comportamento mecânico dos solos do Estado do Ceará.

**Palavras-chave:** Banco de dados; Solos de subleitos; Rodovias federais.

**Abstract:** This article presents an analysis of the subgrade data, which was provided in printed report format by the National Department of Transport Infrastructure (DNIT). The information was digitized and inserted into an electronic spreadsheet to create a georeferenced geotechnical database, using Microsoft Excel and QGIS Desktop, enabling verification of results and corrections of soil classification errors, beginning the construction of a digital platform for prior knowledge of the geotechnical characteristics of certain regions of the state of Ceará, as well as the generation of models and thematic maps. The analyzed spreadsheet contains geotechnical study identification, road name, station, UTM coordinates, drilling depth, optimum water content, maximum dry density, California Bearing Ratio (CBR), expansion, liquidity limit, plasticity index, sieve analysis, group index, and AASHTO classification. The analysis of the results was carried out with the generation of dynamic tables and graphs, where it was possible to identify, based on the CBR, that the materials analyzed have adequate mechanical behavior to be used in highway subgrades, and that the AASHTO classification can adequately predict the mechanical behavior of soils in the State of Ceará.

**Keywords:** Database; Subgrade soils; Federal highways.

Recebido: 19/12/2023; Aceito: 16/05/2024; Publicado: 24/09/2024.

## 1. Introdução

Os bancos de dados geotécnicos reúnem informações que auxiliam nas tomadas de decisões, tais como, a escolha da melhor área para construir, qual tipo de fundação aplicar, quais são as metodologias de tratamento de solo que poderão ser usadas e como estimar parâmetros geotécnicos (BARBOSA, 2018). O uso combinado de sistemas de informações geográficas e bancos de dados, possibilita reunir e observar parâmetros de interesse da geotecnia, de acordo com a sua posição espacial, de modo que o conhecimento de determinadas localidades ocorra com maior agilidade e eficiência (VALENTE, 2000).

O desenvolvimento dos sistemas de bancos de dados geotécnicos se apresenta viável devido à agilidade na aplicação dos cálculos e ao processamento de dados com menores custos (RENGERS *et al.*, 2002; SOARES, 2011). A integração de bancos de dados e mapas é uma importante ferramenta para a compreensão de ocorrências, previsões, simulações e planejamentos estratégicos, através da combinação entre operações tradicionais e a possibilidade de seleção e pesquisa de informações, ao mesmo tempo em que permite as visualizações e análises dos dados (OLIVEIRA, 2015).

De acordo com os conceitos da geotecnia, o subleito consiste no terreno de fundação, sobre o qual as estruturas dos pavimentos rodoviários, geralmente constituídas pelas camadas de sub-base, base e revestimento, são construídas, conforme a representação da Figura 1, e deve ser investigado até a profundidade em que atuam as cargas de tráfego (MEDINA; MOTTA, 2015; ZHANG; YI; FENG, 2020).

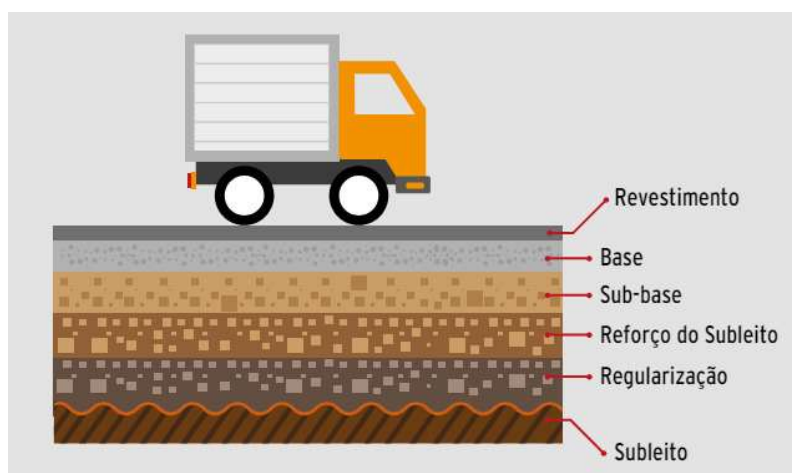


Figura 1 – Estrutura de pavimento.

Fonte: CNT (2017, p. 16).

Uma boa investigação do subleito possibilita estabelecer os principais parâmetros para o dimensionamento do pavimento, resultando nos fatores que precisam ser observados para assegurar a vida útil da infraestrutura (OLIVEIRA, 2019). As análises dos solos permitem reconhecer, identificar e caracterizar as propriedades físicas e mecânicas dos materiais que compõem os subleitos, bem como, compreender os processos pelos quais o pavimento se deteriora (BALBO, 2007; RIBEIRO, 2013).

Desde a década de 1970, vem ocorrendo uma aplicação crescente de métodos de dimensionamento de pavimentos, com o objetivo de compatibilizar o comportamento demandado pelo tráfego com a capacidade suportada pelos materiais, através de análises das estruturas dos sistemas em camadas (MEDINA; MOTTA, 2015; WANG *et al.*, 2024). Para resolver os problemas da parte estrutural utilizando métodos numéricos ou analíticos, é fundamental definir quais são os problemas, as condições das cargas e deslocamentos, e as propriedades dos materiais (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Nacionalmente, o mecanismo oficial adotado para dimensionar os pavimentos flexíveis, é baseado no parâmetro geotécnico de Índice de Suporte Califórnia, tradução livre para California Bearing Ratio (CBR), através de um método empírico para determinar as espessuras das camadas dos pavimentos rodoviários, desenvolvido no ano de 1966 pelo extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atual DNIT (SANTOS *et al.*, 2020).

Independentemente do método de dimensionamento de pavimentos utilizado, o mapeamento de dados pré-existentes que contemplam a pavimentação, pode aumentar a qualidade dos projetos preliminares de estradas, visto que a falta destas

informações torna mais difícil identificar previamente os materiais, resultando muitas vezes em uma maior demanda de recursos naturais, tempo de execução e custos dos projetos rodoviários (RIBEIRO; SILVA; BARROSO, 2018).

Para a execução dos projetos de pavimentação, as coletas dos dados existentes e a posterior complementação através de coletas de dados novos, é uma forma de assegurar a execução correta do pavimento (ROCHA *et al.*, 2022). Por meio das informações previamente contidas nos sistemas de bancos de dados ou fornecidas pelos seus usuários, é possível analisar e comparar os resultados dos parâmetros disponíveis (SILVA *et al.*, 2014).

De acordo com o DNIT (2006), os dados básicos para compor um banco de dados geotécnico rodoviário são os resultados dos ensaios de caracterização dos solos, tais como, a granulometria, o Limite de Liquidez (LL), o Limite de Plasticidade (LP), o Índice de Plasticidade (IP), a umidade ótima, a massa específica seca máxima, o CBR, a expansão e a classificação da AASHTO.

Os teores de umidade ótima e massa específica seca máxima, são determinados no ensaio de compactação, onde a pressão, o impacto ou a vibração aumentam a massa específica aparente do solo e de outros materiais, fazendo com que se aumente o contato entre as partículas, reduzindo o índice de vazios, devido à diminuição da quantidade de ar na estrutura do solo. Ao diminuir os vazios de ar, é possível reduzir a tendência de variação da umidade dos materiais integrantes do pavimento durante a sua vida útil (DNIT, 2006). O referido ensaio é normatizado pelos métodos DNER-ME 129/94 e DNER-ME 162/94.

O *CBR* é um método comparativo que consiste em obter a relação entre os solos constituintes do subleito e uma pedra britada de granulometria padronizada, que se comporte adequadamente como subleito, nos casos de pavimentos flexíveis. Assim, o elemento de compactação e identificação é um índice cuja determinação é feita por um ensaio de resistência mecânica. Por meio de equações empíricas, o valor dessa relação permite calcular a espessura de pavimento flexível necessária em função do tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2008). O procedimento para determinar o *CBR* e o valor da expansão em solos, pode ser feito seguindo as especificações do DNER-ME 049/94

O LL é preconizado pelo DNER-ME 122/94, e equivale à umidade correspondente ao limite entre os estados líquido e plástico de um solo. O IP corresponde à diferença numérica entre o LL e o LP. Quanto maior o IP, mais plástico é o solo. O IP pode ser calculado seguindo as especificações do DNER-ME 082/94.

A análise granulométrica envolve a determinação das porcentagens em peso dos diferentes grãos do solo. O ensaio de granulometria é realizado ao passar uma amostra de solo por peneiras de malha quadrada de tamanhos padronizados. A quantidade retirada de cada peneira é pesada e a porcentagem que passa por cada uma delas é calculada (EMBRAPA, 2017). O ensaio supracitado segue as preconizações dos métodos DNER-ME 051/94 e DNER-ME 080/94.

Por último, a classificação da AASHTO determina se a amostra de solo é de material granular (com comportamento geral como subleito considerado excelente a bom) ou de material silteoso ou argiloso (com comportamento geral como subleito considerado fraco a pobre). Os grupos e subgrupos de materiais granulares são: A-1 (A-1-a e A-1-b) (fragmentos de pedra, pedregulho e areia), A-3 (areia fina), A-2 (A-2-4, A-2-5, A-2-6 e A-2-7) (pedregulhos e areias silteosas ou argilosas). Os grupos e subgrupos de materiais silteosos ou argilosos são: A-4 e A-5 (solos silteosos), A-6 e A-7 (A-7-5, A-7-6) (solos argilosos) (AASHTO, 1993).

O banco de dados a que se refere este artigo, teve início com o “Subprojeto Plataforma Integrada de Estruturação e Análise de Dados com Uso de Inteligência Artificial”, do DNIT, e o “Projeto de Pesquisa, Treinamento e Acompanhamento Técnico de Pavimentos Rodoviários Asfálticos Nacionais”, da Fundação de Apoio a Serviços Técnicos, Ensino e Fomento a Pesquisas (FASTEF) vinculada à Universidade Federal do Ceará (UFC).

Sua justificativa se dá pela necessidade de uma base de informações digitalizadas, contemplando os resultados de estudos geotécnicos realizados pelo órgão rodoviário federal, em rodovias federais localizadas no Estado do Ceará, e tem como objetivo a disseminação das práticas de digitalização e georreferenciamento de dados de subleito.

## 2. Metodologia

### 2.1. Aquisição dos dados

As informações dos parâmetros geotécnicos dos subleitos das rodovias federais BR-020, BR-116, BR-222, BR-226, BR-304, BR-402 e BR-403, localizadas no Estado do Ceará e representadas na Figura 2, são oriundas dos quadros-resumo de resultados de ensaios de subleito, de um total de 44 estudos fornecidos pelo DNIT.

Os resultados contemplam 19 projetos de engenharia, 15 de restauração, 1 de revisão e complementação, 2 de reabilitação, 1 de adequação de capacidade, 1 de melhoramentos, 5 de restauração e melhorias, 1 de implantação e pavimentação e 1 de melhoramentos e pavimentação, que foram cedidos em formato analógico, e desenvolvidos entre os

anos de 1973 a 2009, para a execução de projetos rodoviários, pelo DNER e o Departamento Autônomo de Estrada de Rodagem (DAER).

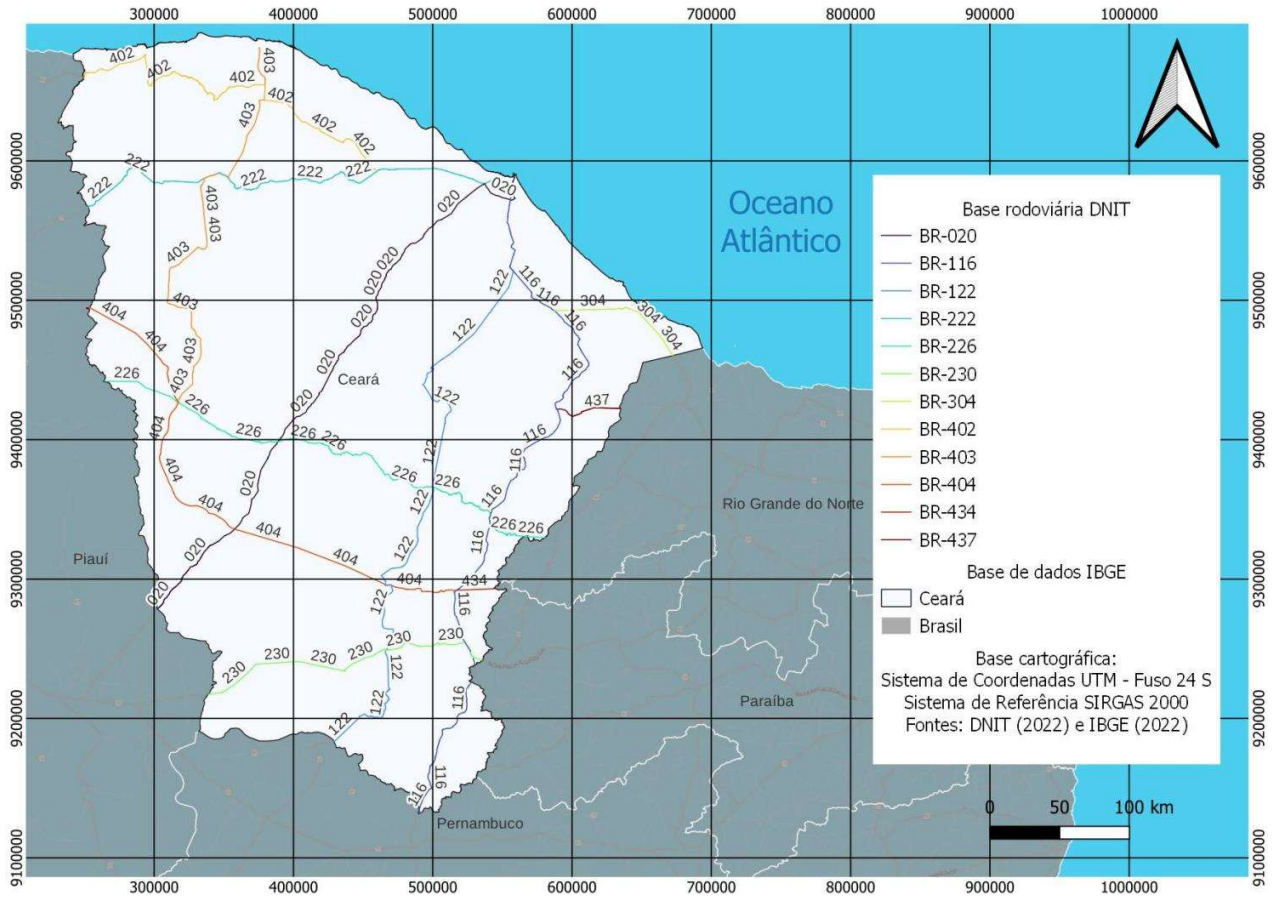


Figura 2 – Mapa das rodovias federais localizadas no Estado do Ceará.  
Fonte: Autores (2024).

## 2.2. Digitalização dos dados

A planilha do banco de dados geotécnicos georreferenciado foi digitalizada com 7139 linhas e 22 colunas, contendo as identificações dos estudos geotécnicos, rodovias, estacas, profundidades de coleta, coordenadas UTM (X e Y), umidade ótima (%), massa específica seca máxima ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), *CBR* (%), expansão (%), LL (%), IP (%), porcentagens que passaram nas peneiras granulométricas 50,8 mm (#2<sup>o</sup>), 25,4 mm (#1<sup>o</sup>), 9,5 mm (#3/8<sup>o</sup>), 4,76 mm (#4), 2 mm (#10), 0,42 mm (#40) e 0,074 mm (#200), observações relativas às peculiaridades de cada solo analisado, Índices de Grupo (IG), e classificações da AASHTO.

## 2.3. Análise dos dados

Para a execução deste trabalho, as linhas da planilha do banco de dados geotécnicos georreferenciado que não apresentavam todos os resultados dos parâmetros considerados, foram descartadas, desse modo, foram selecionadas 5038 linhas, referentes a 37 dos 44 projetos rodoviários. A análise dos resultados foi feita a partir da geração de tabelas e gráficos dinâmicos através do Microsoft Excel, possibilitando constatar a ocorrência de cada parâmetro, bem como, a obtenção das medidas de dispersão e tendência central, por meio da estatística descritiva dos dados, para obter os valores de média, mediana, moda, desvio padrão e variância.

## 2.4. Georreferenciamento dos dados

Para o georreferenciamento dos pontos de coleta das amostras para a realização das análises geotécnicas, baseou-se na metodologia de Ribeiro, Silva e Barroso (2016), por meio da locação dos pontos das informações sobre os subleitos, em relação ao estaqueamento do eixo diretriz da estrada. Este procedimento possibilitou a extração das coordenadas de alguns dos locais amostrados, através do *QGIS Desktop 3.28.9*, usando a base cartográfica rodoviária do DNIT, sistema de coordenadas *UTM* – fuso 24 S e sistema de referência *SIRGAS 2000*.

Após as extrações das coordenadas *UTM*, tornou-se possível relacionar as coordenadas dos pontos amostrados nos projetos rodoviários, com as outras informações e camadas do meio físico terrestre, como representado na Figura 3, auxiliando na aquisição das variáveis para a geração de modelos e mapas temáticos de interesse dos órgãos rodoviários.

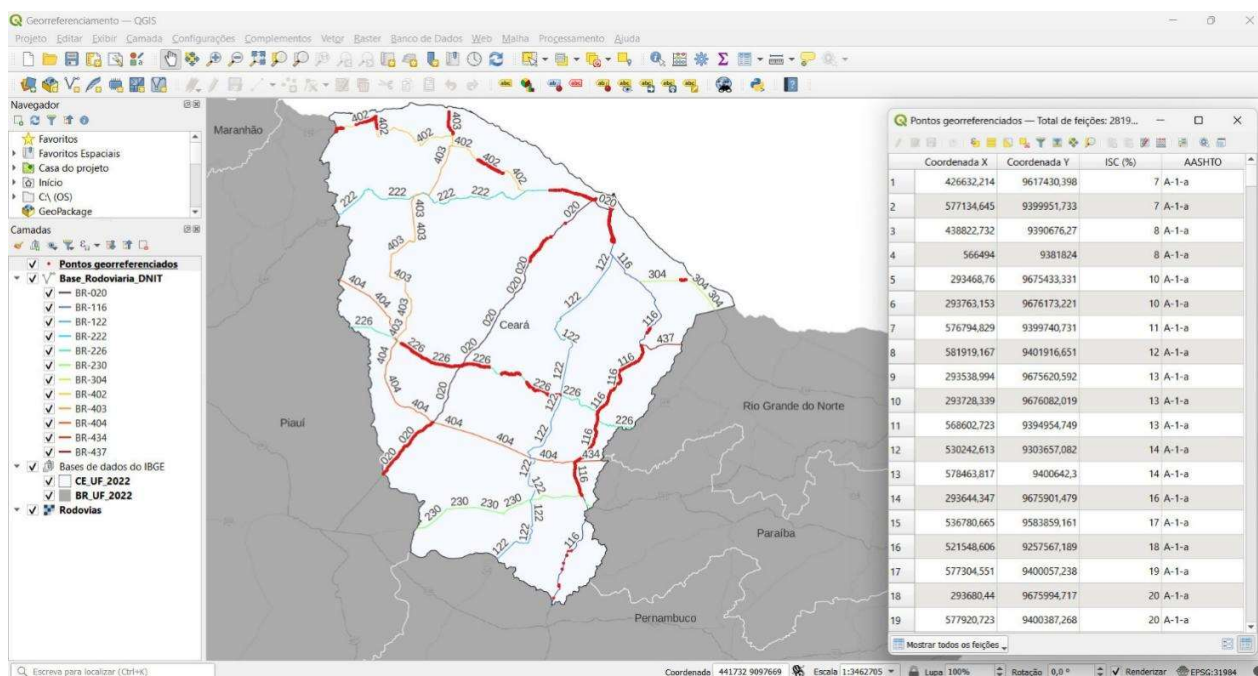


Figura 3 – Manipulação dos dados no *QGIS Desktop 3.28.9*.

Fonte: Autores (2024).

### 3. Resultados e discussão

As informações dos subleitos que foram extraídas dos estudos geotécnicos das rodovias federais localizadas no Estado do Ceará, reuniram os resultados dos parâmetros geotécnicos de umidade ótima (%), massa específica seca máxima ( $\text{g/cm}^3$ ), *CBR* (%), expansão (%), *LL* (%), *IP* (%), granulometria (%), *IG* e classificação da *AASHTO*. As Tabelas 1 e 2 apresentam as maiores ocorrências considerando os parâmetros supracitados.

Tabela 1 – Maiores ocorrências dos resultados dos parâmetros geotécnicos

|  |       |
|--|-------|
| <b>Umidade ótima (%)</b>   | 9     |
| <b>Massa específica seca máxima (<math>\text{g/cm}^3</math>)</b> | 1,90  |
| <b><i>CBR</i> (%)</b>  | 10    |
| <b>Expansão (%)</b>  | 0     |
| <b><i>LL</i> (%)</b>   | NP*   |
| <b><i>IP</i> (%)</b>   | NP*   |
| <b>Peneira granulométrica 50,8 mm (%)</b>                        | 100   |
| <b>Peneira granulométrica 25,4 mm (%)</b>                        | 100   |
| <b>Peneira granulométrica 9,5 mm (%)</b>                         | 100   |
| <b>Peneira granulométrica 4,76 mm (%)</b>                        | 100   |
| <b>Peneira granulométrica 2 mm (%)</b>                           | 100   |
| <b>Peneira granulométrica 0,42 mm (%)</b>                        | 60    |
| <b>Peneira granulométrica 0,074 mm (%)</b>                       | 30    |
| <b><i>IG</i></b>   | 0     |
| <b>Classificação da <i>AASHTO</i></b>                            | A-2-4 |

\*NP é a sigla para “Não Plástico”, que ocorre quando o solo não apresenta plasticidade.

Fonte: Autores (2024).

Tabela 2 – Maiores ocorrências dos resultados dos parâmetros geotécnicos por rodovia

| Rodovia  | BR-020    | BR-116 | BR-222  | BR-226 | BR-304  | BR-402 | BR-403      |
|--|-----------|--------|---------|--------|---------|--------|-------------|
| <b>Umidade ótima (%)</b>   | 7,6 e 7,8 | 8,6    | 9       | 8,8    | 9,6     | 10,3   | 9,9         |
| <b>Massa específica seca máxima (<math>\text{g/cm}^3</math>)</b> | 2,15      | 1,90   | 2,00    | 1,90   | 1,96    | 1,83   | 1,90        |
| <b><i>CBR</i> (%)</b>  | 12        | 8      | 10 e 14 | 10     | 19      | 10     | 8 e 9       |
| <b>Expansão (%)</b>  | 0,1       | 0      | 0,1     | 0      | 0       | 0      | 0           |
| <b><i>LL</i> (%)</b>   | NP        | NP     | NP      | NP     | NP      | NP     | NP          |
| <b><i>IP</i> (%)</b>   | NP        | NP     | NP      | NP     | NP      | NP     | NP          |
| <b>Peneira granulométrica 50,8 mm (%)</b>                        | 100       | 100    | 100     | 100    | 100     | 100    | 100         |
| <b>Peneira granulométrica 25,4 mm (%)</b>                        | 100       | 100    | 100     | 100    | 100     | 100    | 100         |
| <b>Peneira granulométrica 9,5 mm (%)</b>                         | 100       | 100    | 100     | 100    | 100     | 100    | 100         |
| <b>Peneira granulométrica 4,76 mm (%)</b>                        | 100       | 100    | 100     | 100    | 100     | 100    | 100         |
| <b>Peneira granulométrica 2 mm (%)</b>                           | 74        | 100    | 60      | 82     | 100     | 100    | 55, 61 e 65 |
| <b>Peneira granulométrica 0,42 mm (%)</b>                        | 36        | 86     | 56      | 60     | 83 e 87 | 60     | 38          |
| <b>Peneira granulométrica 0,074 mm (%)</b>                       | 15 e 22   | 17     | 19      | 30     | 26      | 30     | 17, 19 e 20 |
| <b><i>IG</i></b>   | 0         | 0      | 0       | 0      | 0       | 0      | 0           |
| <b>Classificação da <i>AASHTO</i></b>                            | A-1-b     | A-2-4  | A-2-4   | A-2-4  | A-2-4   | A-2-4  | A-1-b       |

Fonte: Autores (2024).

A quantidade de dados de cada um dos parâmetros geotécnicos por rodovia está representada na Figura 4.



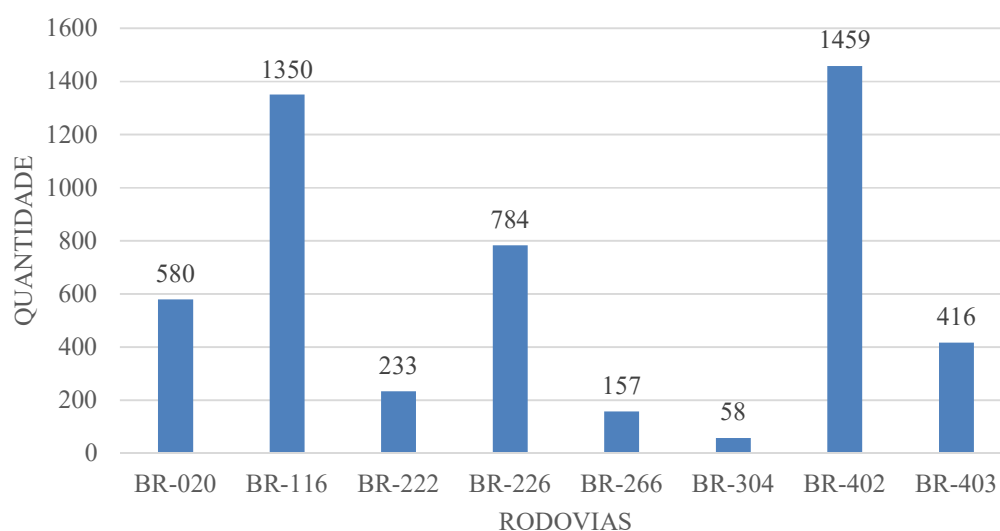


Figura 4 – Gráfico das informações obtidas dos parâmetros geotécnicos por rodovia.  
Fonte: Autores (2024).

Por meio da análise estatística dos valores de *CBR*, observou-se que as maiores ocorrências nos solos cearenses foram superiores a 2%, o que, segundo o DNIT (2006), é um ponto positivo para o comportamento desses materiais como subleito, visto que no caso do *CBR* inferior a 2%, é recomendado fazer a substituição do material por outro com valor superior a 2%.

A partir da verificação das ocorrências de *CBR* por classificação da *AASHTO*, conforme a Tabela 3, percebe-se que os solos que apresentam comportamento como subleito sofrível a mau (A-4, A-5, A-7-5 e A-7-6), possuem *CBR* médio com valor menor, enquanto que os solos que apresentam comportamento como subleito excelente a bom (A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 e A-3), possuem *CBR* médio com valor maior. Isto evidencia que a classificação da *AASHTO* consegue prever o comportamento mecânico dos solos adequadamente para o Estado do Ceará, confirmando as conclusões de Chaves (2000) e Barroso (2002) para a Região Metropolitana de Fortaleza.

Pode-se afirmar também que comparando os valores de *CBR* dos estudos geotécnicos aos valores da correlação provável entre *CBR* e Classificação *AASHTO* de Senço (2007), há uma grande diferença nos seus intervalos.

Tabela 3 – Verificação estatística dos valores de *CBR* (%) por classificação da *AASHTO*

| Classificações da <i>AASHTO</i> | <i>CBR</i> (%) | Quantidade | Média | Mediana | Moda | Desvio padrão | Variância |
|---------------------------------|----------------|------------|-------|---------|------|---------------|-----------|
| A-1-a                           | 7 a 117        | 165        | 52    | 59      | 64   | 30            | 876       |
| A-1-b                           | 0 a 129        | 962        | 33    | 21      | 13   | 26            | 651       |
| A-2-4                           | 0 a 146        | 2394       | 17    | 13      | 10   | 12            | 153       |
| A-2-5                           | 9              | 1          | 9     | 9       | -    | -             | -         |
| A-2-6                           | 1 a 78         | 261        | 15    | 12      | 13   | 11            | 120       |
| A-2-7                           | 5 e 12         | 2          | 8,5   | 8,5     | -    | 5             | 25        |
| A-3                             | 3 a 39         | 144        | 17    | 16      | 10   | 7             | 46        |
| A-4                             | 0 a 91         | 852        | 11    | 10      | 10   | 6             | 32        |
| A-5                             | 0 a 6          | 5          | 3     | 4       | -    | 2             | 6         |
| A-6                             | 1 a 34         | 225        | 10    | 10      | 10   | 5             | 26        |
| A-7-5                           | 0 a 13         | 11         | 4     | 3       | 0    | 4             | 18        |
| A-7-6                           | 0 a 10         | 15         | 4     | 3       | 2    | 3             | 11        |

Fonte: Autores (2024).

As verificações estatísticas dos dados de umidade ótima (%), massa específica seca máxima ( $\text{g/cm}^3$ ) e expansão (%) por classificação da *AASHTO* estão representadas nas Tabelas 4, 5 e 6, respectivamente.

Tabela 4 – Verificação estatística dos valores de umidade ótima (%) por classificação da AASHTO

| Classificações da AASHTO | Umidade ótima (%) | Quantidade | Média | Mediana | Moda | Desvio padrão | Variância |
|--------------------------|-------------------|------------|-------|---------|------|---------------|-----------|
| A-1-a                    | 4,5 a 15          | 165        | 8,1   | 7,8     | 6,9  | 2,0           | 3,9       |
| A-1-b                    | 1,7 a 15,2        | 962        | 8,9   | 8,7     | 8,8  | 1,9           | 3,5       |
| A-2-4                    | 0,4 a 35          | 2394       | 9,9   | 9,7     | 9    | 2,1           | 4,6       |
| A-2-5                    | 19,5              | 1          | 19,5  | 19,5    | -    | -             | -         |
| A-2-6                    | 5,7 a 17,3        | 261        | 10,9  | 10,5    | 9,7  | 1,9           | 3,7       |
| A-2-7                    | 9 e 15,2          | 2          | 12,1  | 12,1    | -    | 4,4           | 19,2      |
| A-3                      | 4,4 a 12,7        | 144        | 9     | 8,8     | 8,2  | 1,7           | 2,8       |
| A-4                      | 1,3 a 51          | 852        | 11,4  | 11,1    | 10,1 | 2,7           | 7,1       |
| A-5                      | 18,3 a 21,6       | 5          | 19,7  | 19      | -    | 1,5           | 2,1       |
| A-6                      | 6 a 19,8          | 225        | 12,6  | 12,3    | 10,1 | 2,4           | 5,8       |
| A-7-5                    | 11 a 20,4         | 11         | 14,8  | 14,9    | 11   | 3,5           | 12        |
| A-7-6                    | 9,5 a 17,6        | 15         | 14,6  | 14,4    | 13,1 | 2             | 3,9       |

Fonte: Autores (2024).

Tabela 5 – Verificação estatística dos valores de massa específica seca máxima (g/cm<sup>3</sup>) por classificação da AASHTO

| Classificações da AASHTO | Massa específica seca máxima (g/cm <sup>3</sup> ) | Quantidade | Média | Mediana | Moda  | Desvio padrão | Variância |
|--------------------------|---|------------|-------|---------|-------|---------------|-----------|
| A-1-a                    | 1,7 a 2,24  | 165        | 2,058 | 2,098   | 2,13  | 0,118         | 0,014     |
| A-1-b                    | 1,15 a 13,5                                       | 962        | 2,014 | 2,002   | 1,9   | 0,391         | 0,153     |
| A-2-4                    | 0,175 a 14,5                                      | 2394       | 1,932 | 1,905   | 1,9   | 0,501         | 0,251     |
| A-2-5                    | 1,68  | 1          | 1,68  | 1,68    | -     | -             | -         |
| A-2-6                    | 1,6 a 2,18  | 261        | 1,907 | 1,91    | 1,89  | 0,118         | 0,014     |
| A-2-7                    | 1,85 e 1,87                                       | 2          | 1,86  | 1,86    | -     | 0,014         | 0         |
| A-3                      | 1,682 a 2,14                                      | 144        | 1,841 | 1,795   | 1,78  | 0,122         | 0,015     |
| A-4                      | 1 a 2,15  | 852        | 1,829 | 1,83    | 1,8   | 0,099         | 0,01      |
| A-5                      | 1,61 a 1,674                                      | 5          | 1,641 | 1,633   | -     | 0,03          | 0,001     |
| A-6                      | 0,745 a 2,05                                      | 225        | 1,793 | 1,8     | 1,79  | 0,12          | 0,014     |
| A-7-5                    | 1,61 a 1,9  | 11         | 1,789 | 1,82    | 1,789 | 0,102         | 0,01      |
| A-7-6                    | 1,63 a 1,87                                       | 15         | 1,753 | 1,732   | 1,63  | 0,079         | 0,006     |

Fonte: Autores (2024).

Tabela 6 – Verificação estatística dos valores de expansão (%) por classificação da AASHTO

| Classificações da AASHTO | Expansão (%) | Quantidade | Média | Mediana | Moda | Desvio padrão | Variância |
|--------------------------|--------------|------------|-------|---------|------|---------------|-----------|
| A-1-a                    | 0 a 0,7      | 165        | 0,1   | 0       | 0    | 0,1           | 0         |
| A-1-b                    | 0 a 1,5      | 962        | 0,1   | 0       | 0    | 0,2           | 0         |
| A-2-4                    | 0 a 9,3      | 962        | 0,1   | 0,1     | 0    | 0,4           | 0,1       |
| A-2-5                    | 0,8          | 1          | 0,8   | 0,8     | -    | -             | -         |
| A-2-6                    | 0 a 3        | 261        | 0,2   | 0,1     | 0    | 0,4           | 0,2       |
| A-2-7                    | 0,2 e 0,3    | 2          | 0,3   | 0,3     | -    | 0,1           | 0         |
| A-3                      | 0 a 0,3      | 144        | 0     | 0       | 0    | 0,1           | 0         |
| A-4                      | 0 a 2,2      | 852        | 0,2   | 0,1     | 0,1  | 0,3           | 0,1       |
| A-5                      | 0,5 a 3,5    | 5          | 1,9   | 1,8     | -    | 1,2           | 1,5       |
| A-6                      | 0 a 3,8      | 225        | 0,5   | 0,2     | 0,1  | 0,6           | 0,4       |
| A-7-5                    | 0 a 3,8      | 11         | 1,4   | 0,4     | 0    | 1,7           | 2,9       |
| A-7-6                    | 0 a 2,6      | 15         | 0,7   | 0,3     | 0    | 0,9           | 0,8       |

Fonte: Autores (2024).



Através da contagem das ocorrências de classificações da *AASHTO*, por meio de tabelas e gráficos dinâmicos, conforme as representações das Figuras 5 e 6, constatou-se que a maioria das amostras foi classificada como A-2-4 (2394), seguida por A-1-b (962), A-4 (852), A-2-6 (261), A-6 (225), A-1-a (165) e A-3 (144). As menores ocorrências foram de A-2-5 (1), A-2-7 (2), A-5 (5), A-7-5 (11) e A-7-6 (15). Observa-se, portanto, que o comportamento geral como subleito dos solos analisados é considerado como excelente a bom.

Por meio do banco de dados, também foi possível realizar as verificações e correções das classificações dos solos dadas nos estudos geotécnicos. Em um total de 5037 amostras, faltavam 64 classificações da *AASHTO* (equivalente a 1,27% dos dados de classificação da *AASHTO*) e foram encontrados 261 erros nas classificações da *AASHTO* (equivalente a 5,18% dos dados de classificação da *AASHTO*). Todos os erros constatados nas classificações da *AASHTO* foram corrigidos através da aplicação de uma fórmula no *Microsoft Excel* que verificava os resultados das porcentagens das peneiras granulométricas de 2 mm, 0,42 mm e 0,074 mm, limites de liquidez, índices de plasticidade e índices de grupo, como prevê a tabela de classificação da *AASHTO*.

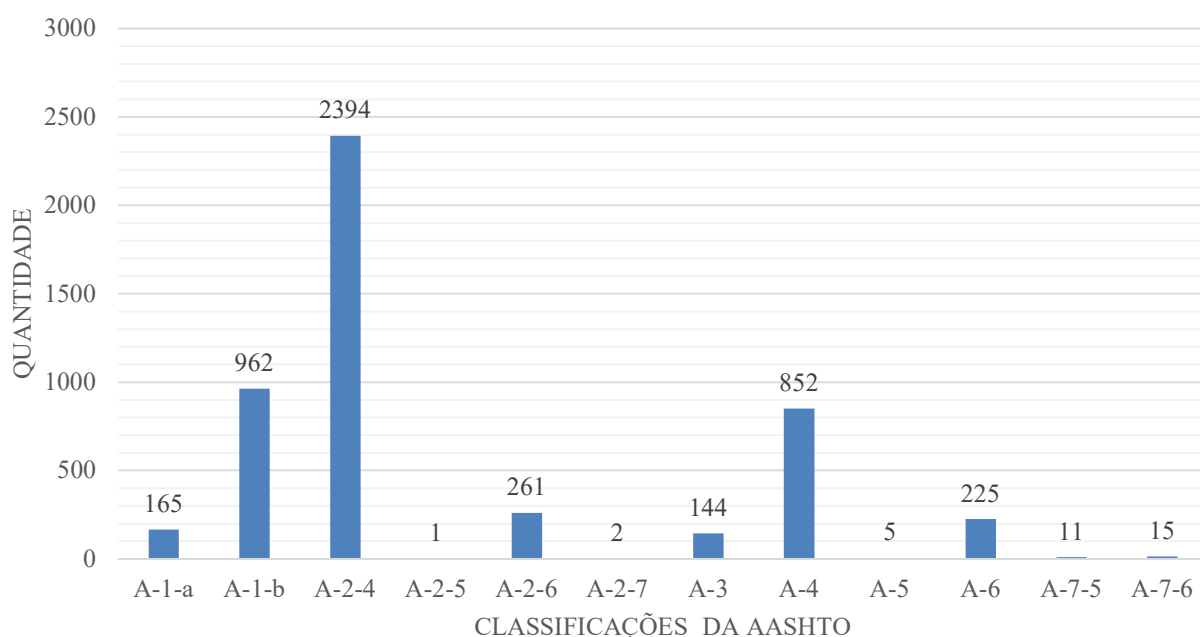


Figura 5 – Gráfico das ocorrências de classificações da *AASHTO*.  
Fonte: Autores (2024).

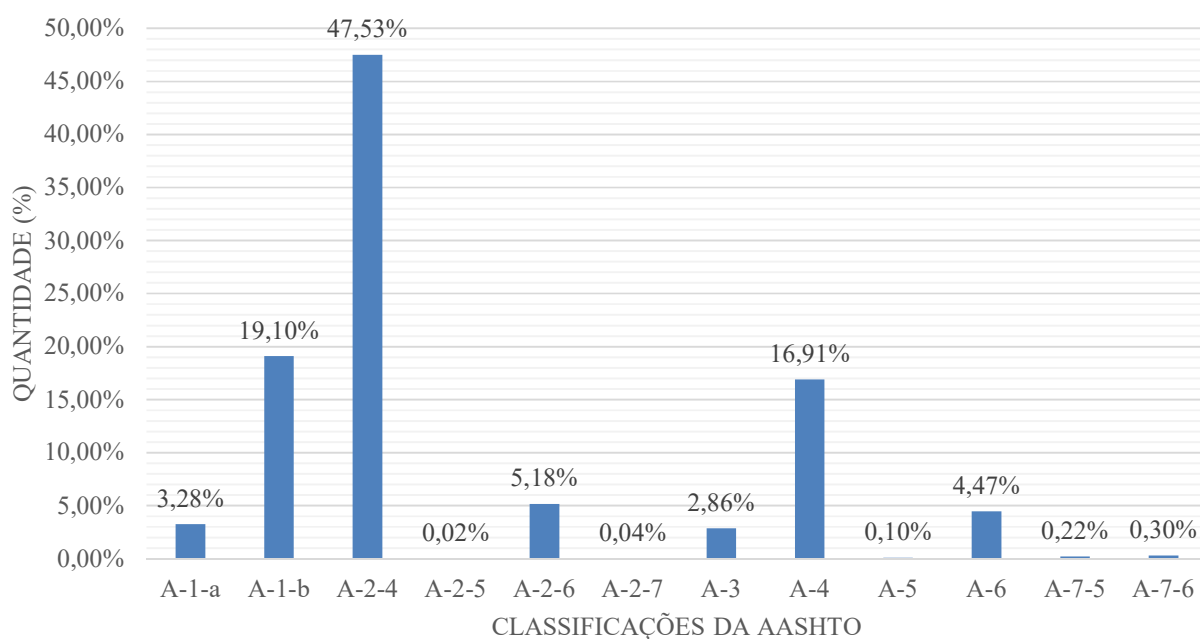


Figura 6 – Gráfico das porcentagens das ocorrências de classificações da AASHTO.  
Fonte: Autores (2024).

A Tabela 7 apresenta as informações sobre os dados que foram georreferenciados. Destaca-se que não foi possível georreferenciar todas as estacas devido à ausência de informações de localização mais precisas, visto que uma parte dos estudos geotécnicos não informava as extensões dos trechos (km inicial e km final).

Tabela 7 – Pontos georreferenciados

| Rodovia      | Quantidade total de pontos | Quantidade georreferenciada | Porcentagem georreferenciada |
|--------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| BR-020       | 580                        | 318                         | 54,83%                       |
| BR-116       | 1350                       | 995                         | 73,70%                       |
| BR-222       | 233                        | 125                         | 53,65%                       |
| BR-226       | 941                        | 698                         | 74,18%                       |
| BR-304       | 58                         | 56                          | 96,55%                       |
| BR-402       | 1459                       | 535                         | 36,67%                       |
| BR-403       | 416                        | 92                          | 22,12%                       |
| <b>Total</b> | <b>5037</b>                | <b>2819</b>                 | <b>55,97%</b>                |

Fonte: Autores (2024).

A Figura 7 apresenta o mapa dos pontos georreferenciados em cada rodovia categorizada, descritos na Tabela 7, de acordo com as coordenadas *UTM* que constam no banco de dados. Já as Figuras 8 e 9, apresentam os mapas dos pontos com *CBR* graduado e classificações da *AASHTO* categorizadas, respectivamente.

O georreferenciamento dos pontos amostrados, demonstrou a viabilidade no uso integrado de dados geotécnicos já existentes e mapas, possibilitando o conhecimento prévio dos materiais componentes dos solos de determinadas localidades. Tais informações podem ser úteis para a redução do uso de recursos, tempo de execução e custos em projetos de ampliação, duplicação, recuperação e restauração das rodovias georreferenciadas, bem como, em projetos básicos e análises de viabilidade de novas estradas próximas aos pontos localizados.

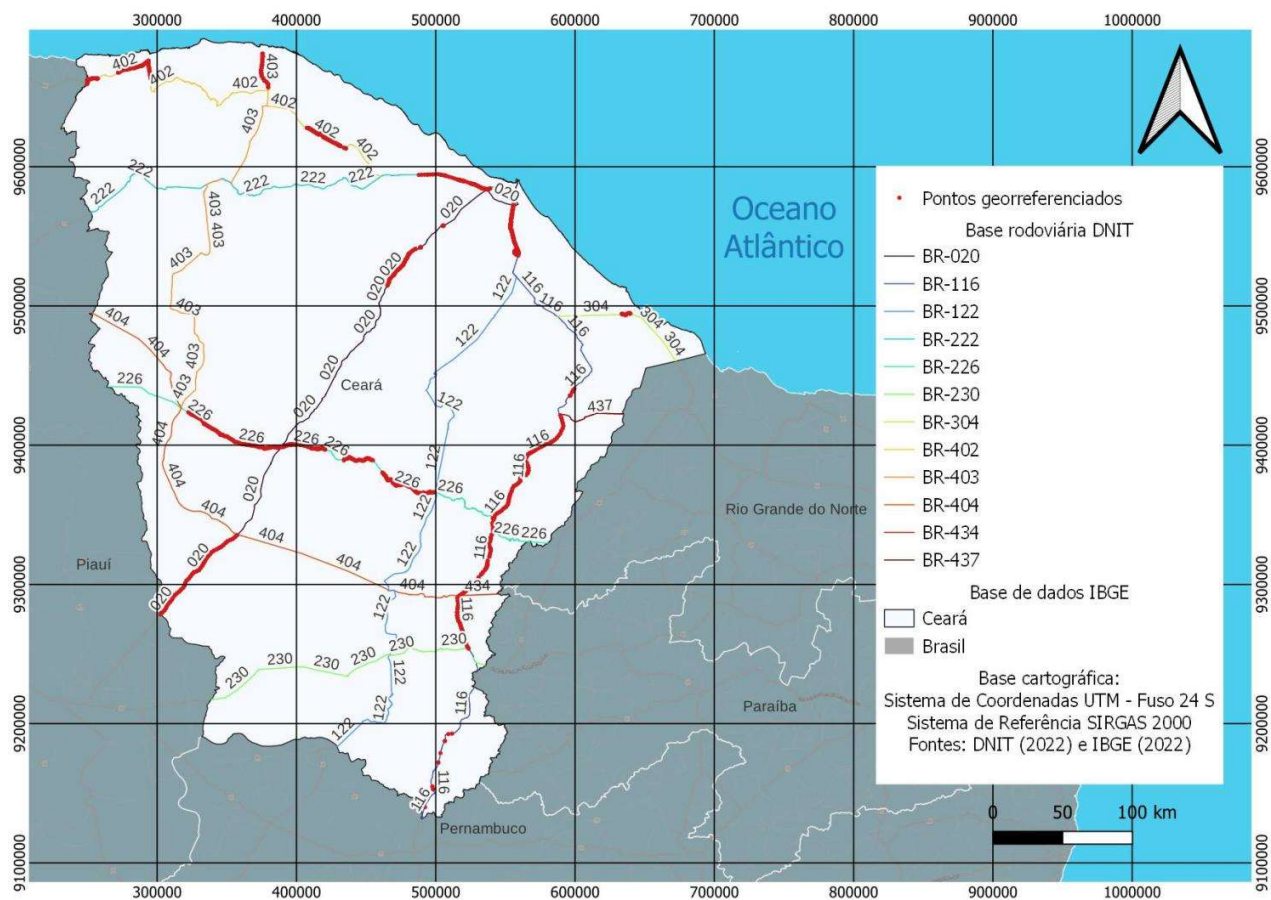


Figura 7 – Mapa dos pontos georreferenciados.  
Fonte: Autores (2024).

As ocorrências de CBR nos pontos georreferenciados, estão representadas na Tabela 8 e no Figura 8. Já as ocorrências de classificações da AASHTO nos pontos georreferenciados, estão dispostas na Tabela 9 e no Figura 9.

Tabela 8 – Ocorrências de CBR (%) nos pontos georreferenciados

| CBR (%)     | 0 a 11 | 11 a 19 | 19 a 30 | 30 a 45 | 45 a 62 | 62 a 82 | 82 a 146 |
|-------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Ocorrências | 1071   | 949     | 490     | 221     | 128     | 129     | 71       |

Fonte: Autores (2024).

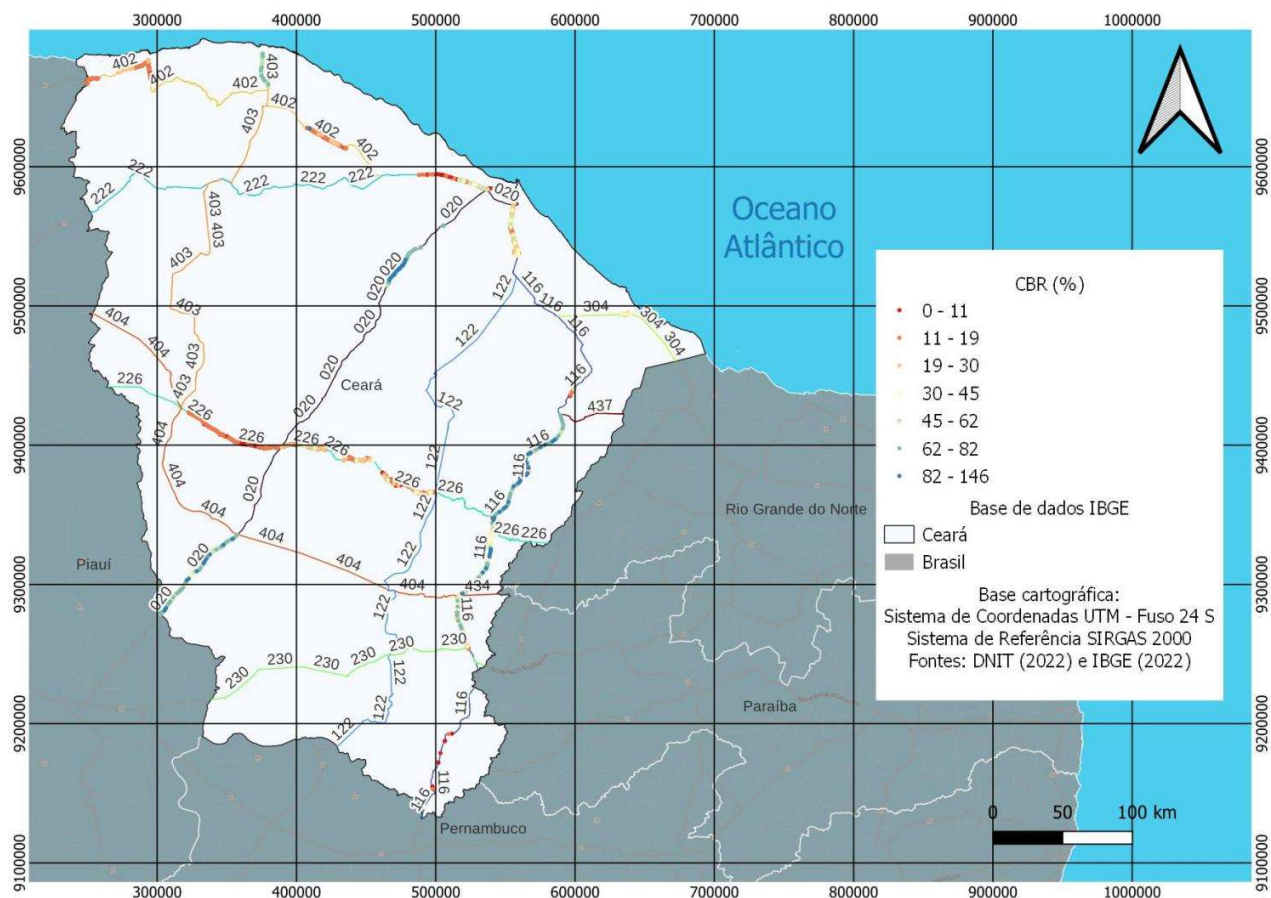


Figura 8 – Mapa dos pontos georreferenciados graduados por CBR (%).  
Fonte: Autores (2024).

Tabela 9 – Ocorrências de classificações da AASHTO nos pontos georreferenciados

| Classificações da AASHTO | A-1-a | A-1-b | A-2-4 | A-2-6 | A-3 | A-4 | A-6 | A-7-5 | A-7-6 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-------|-------|
| Ocorrências              | 118   | 580   | 1345  | 106   | 124 | 422 | 109 | 5     | 10    |

Fonte: Autores (2024).

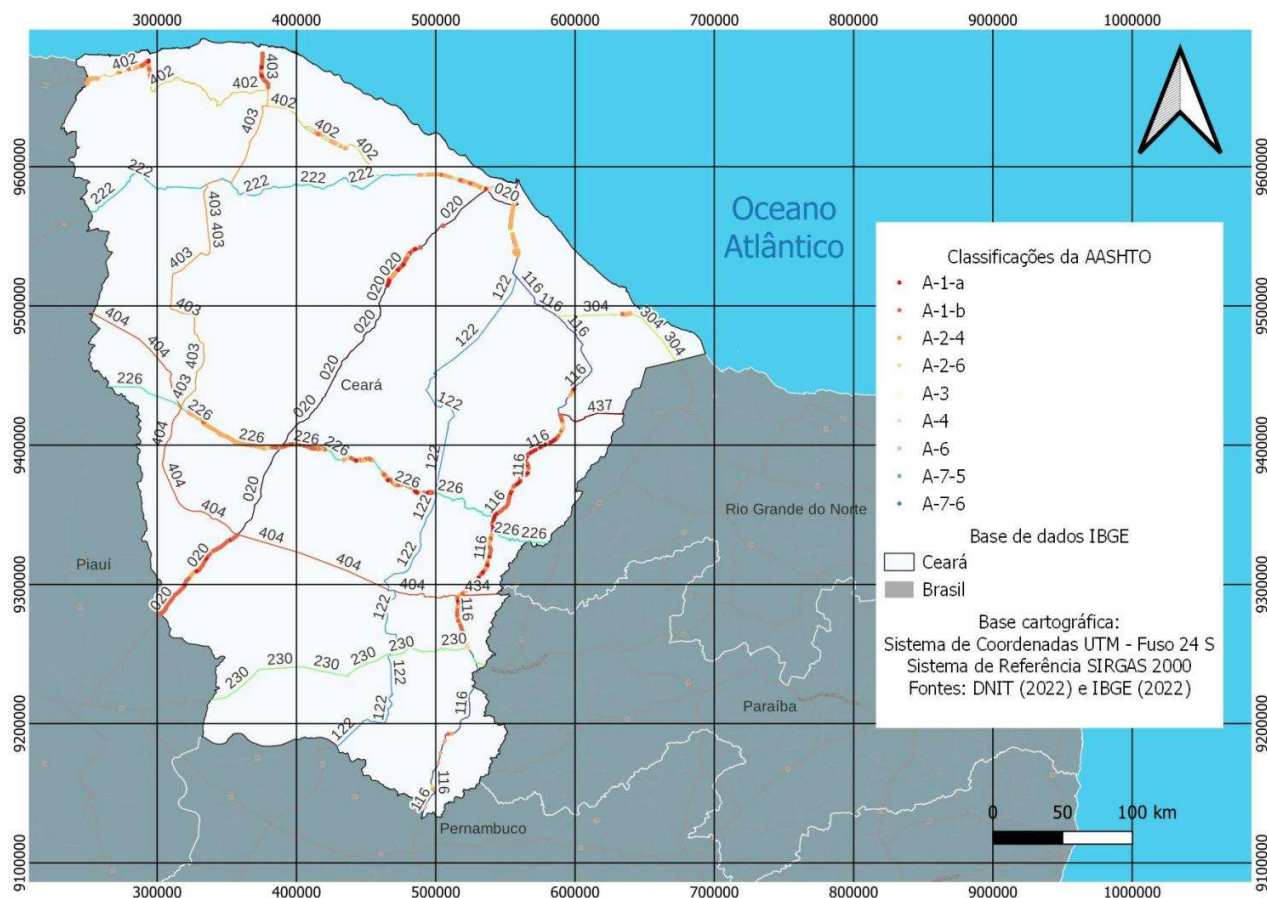


Figura 9 – Mapa dos pontos georreferenciados categorizados por classificação da AASHTO.  
 Fonte: Autores (2024).

#### 4. Considerações finais

Através da análise dos resultados, constatou-se que as maiores ocorrências de *CBR* nos solos analisados, são superiores a 2%, não havendo a necessidade de camada de reforço do subleito. Evidenciou-se que a classificação da *AASHTO* consegue prever o comportamento mecânico dos solos adequadamente para o Estado do Ceará. Constatou-se ainda, que o comportamento geral como subleito dos solos das rodovias BR-020, BR-116, BR-222, BR-226, BR-304, BR-402 e BR-403, é excelente a bom, de acordo com as maiores ocorrências de classificações da *AASHTO*.

A digitalização e o georreferenciamento dos dados geotécnicos dos subleitos relacionados a este artigo, possibilitaram as análises dos resultados, correções dos erros de classificação dos solos e deram início à construção de uma plataforma digital para a geração de modelos e mapas temáticos de interesse dos órgãos rodoviários, contribuindo para a otimização no fornecimento de informações sobre as propriedades dos solos de subleito, que são necessárias para a execução de projetos rodoviários.

Por fim, sugere-se que a execução deste trabalho inspire mais trabalhos futuros, como, por exemplo, a construção de modelos preditivos das informações geotécnicas dos solos e a expansão do banco de dados geotécnico georreferenciado para as camadas de sub-base e base que também compõem a estrutura do pavimento.

## Agradecimentos

Ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), bem como, à Fundação de Apoio a Serviços Técnicos, Ensino e Fomento a Pesquisas (FASTEF) vinculada à Universidade Federal do Ceará (UFC), pelo fornecimento dos estudos geotécnicos e o apoio financeiro na execução deste trabalho.

## Referências

- AASHTO. American Association of State Highway and Transportation Officials. *AASHTO guide for design of pavement structures*. Washington, D.C.: AASHTO, 1993.
- Balbo, J. T. *Pavimentação asfáltica, materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 560p.
- Barbosa, H. T. *Banco de dados geotécnico das argilas moles da região metropolitana do Recife (RMRecife)*. Recife, 2018. 302f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2018.
- Barroso, S. H. A. *Estudo dos solos da região metropolitana de Fortaleza para aplicação na Engenharia Rodoviária*. São Carlos, 2002. 178f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2002.
- Bernucci, L. B. *et al.* *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras, 2008. 475p.
- Chaves, F. J. *Caracterização geotécnica de solos da formação Barreiras da Região Metropolitana de Fortaleza para aplicação em obras rodoviárias*. Rio de Janeiro, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Programa de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2000.
- CNT. Confederação Nacional dos Transportes. *Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?* Brasília, DF: CNT, 2017. p. 16.
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Manual de pavimentação*. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. 274p.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Manual de métodos de análise de solo*. Autores: Paulo Cesar Teixeira, Guilherme Kangussu Donagemma, Ademir Fontana, Wenceslau Geraldes Teixeira. Brasília: EMBRAPA, 2017. 574p.
- Medina, J.; Motta, L. M. G. *Mecânica dos pavimentos*. Rio de Janeiro, RJ: Editora Interciência, 2015. 640p.
- Oliveira, F. S. S. *Diagnóstico e banco de dados das propriedades geotécnicas da duplicação do lote 4 da BR-470/SC com auxílio de um SIG*. Florianópolis, 2015. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2015.
- Oliveira, L. M. P. *Influência da resistência do subleito e intensidade do tráfego no dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil*. Campinas, 2019. 190f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2019.
- Rengers, N. *et al.* Information technology applied to engineering geology. *Engineering Geology for Developing Countries - Proceedings of 9th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, 2002. Disponível em: [https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers/arti\\_conf\\_pr/rengers\\_hack.pdf](https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers/arti_conf_pr/rengers_hack.pdf). Acesso em: 15/11/2023.
- Ribeiro, A. J. A.; Silva, C. A. U.; Barroso, S. H. A. Metodologia de baixo custo para mapeamento geotécnico aplicado à pavimentação. *Revista Transportes*, v. 26, n. 2, 84-100, 2018.

- 
- Ribeiro, A. J. A.; Silva, C. A. U.; Barroso, S. H. A. Metodologia para criação de um banco de dados georreferenciado a partir de dados geotécnicos obtidos em “as built” e projetos rodoviários. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 12, n. 2, 1-13, 2016.
- Ribeiro, M. M. P. *Contribuição ao estudo da deformação permanente dos solos de subleito*. São Carlos, 2013. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2013.
- Rocha, G. D. C. *et al.* Análise dos pavimentos utilizados nas rodovias brasileiras. *Revista Mangaio Acadêmico*, v. 7, n. 2, 50-75, 2022.
- Santos, T. A. *et al.* Análise do desempenho de subleitos rodoviários à luz de conceitos da mecânica dos pavimentos. *Revista Matéria*, v. 25, n. 3, 2020.
- Senço, W. *Manual de técnicas de pavimentação*. São Paulo: Pini, 2007. 761p.
- Silva, C. S. S. *et al.* Avaliação ambiental de processos de pavimentação rígida e flexível a partir da análise do ciclo de vida. *Anais do IX Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental*, 2014. Disponível em: <https://www.abes-rs.org.br/qualidade2014/trabalhos/id840.pdf>. Acesso em: 17/11/2023.
- Soares, W. C. *Banco de dados geológico-geotécnicos com base em sondagens à percussão e uso de SIG: Análise espacial da profundidade do lençol freático e do  $N_{SPT}$  para obras de fundação em João Pessoa-PB*. São Carlos, 2011. Tese (Doutorado em Ciências). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2011.
- Valente, A. L. S. Proposta metodológica de um banco de dados geotécnicos para uso em Sistema de Informações Geográfica (SIG) e sua aplicação no município de Porto Alegre, RS. *Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil*, v. 1, n. 1, 87-95, 2000.
- Wang, K. *et al.* Optimization of colored pavement considering driving behavior and psychological characteristics under dynamic low-visibility conditions related to fog-a driving simulator study. *Traffic Injury Prevention*, v. 25, n. 3, 518–526, 2024.
- Zhang, M., Yi, J., Feng, D. Reasonable thickness design of expressway pavement structures based on gray relation analysis of subgrade soil improvement. *Science Progress*, v. 103, n. 1, 2020.