



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA E MATEMÁTICA APLICADA - DEMA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ESTATÍSTICA

FRANCISCA CÍNTIA DE SOUSA BARROS

**GEOESTATÍSTICA: ANÁLISE DE DADOS DA ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA DO
SUBSOLO DE FORTALEZA- CE ATRAVÉS DE SONDADEM SPT**

FORTALEZA

2025

FRANCISCA CÍNTIA DE SOUSA BARROS

GEOESTATÍSTICA: ANÁLISE DE DADOS DA ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA DO
SUBSOLO DE FORTALEZA- CE ATRAVÉS DE SONDAÇÃO SPT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Estatística do Centro
de Ciências da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
bacharel em Estatística.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Ferreira
dos Santos Neto .

FORTALEZA

2025

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)

S696g Sousa Barros, Francisca Cíntia de.
GEOESTATÍSTICA: ANÁLISE DE DADOS DA ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA DO SUBSOLO DE FORTALEZA- CE ATRAVÉS DE SONDAÇÃO SP / Francisca Cíntia de Sousa Barros. – 2025.
62 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Física, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Manoel Ferreira dos Santos Neto.

1. Análise Geostatística. 2. Sondagem SPT. 3. Validação Cruzada. 4. Krigagem Ordinária. I. Título.
CDD 530

FRANCISCA CÍNTIA DE SOUSA BARROS

GEOESTATÍSTICA: ANÁLISE DE DADOS DA ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA DO
SUBSOLO DE FORTALEZA- CE ATRAVÉS DE SONDAÇÃO SPT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Estatística do Centro
de Ciências da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
bacharel em Estatística.

Aprovada em: 04 de agosto de 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Manoel Ferreira dos Santos Neto
(Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr(a).Alessandra Cristina da Silva Farias
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr(a). Maria Jacqueline Batista
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Esposo, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me abençoar, por sua presença e por permitir que meus propósitos fossem alcançados até o momento presente. Também por ter me proporcionado saúde e determinação para continuar no curso.

Ao meu esposo Matheus Vasconcelos do Nascimento, que sempre foi âncora e porto seguro para que tudo em minha vida tivesse sentido.

À minha avó Maria Otacília Araújo Barros e ao meu avô Francisco Itamar de Barros (in memoriam), pela criação e dedicação; ao meu pai José Cleber Araújo Barros (in memoriam) e aos meus irmãos José Kleber Araújo Barros Junior e Karoliny Braga Barros, por sempre acreditarem no meu potencial e incentivarem meus estudos. Aos meus demais familiares, que me auxiliaram de alguma forma na realização desse sonho.

À empresa *Geologic Geotécnica LTDA* pela disponibilização dos dados de Sondagem à Percussão (SPT) referentes à região de Fortaleza-CE, os quais foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa e para a elaboração da carta geotécnica apresentada neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Manoel Ferreira dos Santos Neto, pela oportunidade e orientação neste trabalho, sendo sempre um apoio e um incentivo, mesmo nos momentos em que eu mesma duvidava do meu potencial. Agradeço pela confiança depositada em mim e por acreditar na minha capacidade. E, claro, por sempre me lembrar que ninguém é melhor do que ninguém.

Ao Prof. Dr. João Maurício Araújo Mota, por me dar forças para continuar em todas as vezes que pensei em desistir. Suas palavras, ensinamentos e persistência me trouxeram até aqui.

Às professoras participantes da banca examinadora, Profa. Dra. Maria Jacqueline Batista e Profa. Dra. Alessandra Cristina S. Farias, sou grata pela disponibilidade, contribuições valiosas, atenção cuidadosa e pela certeza do acréscimo positivo à construção do meu conhecimento.

Ao Prof. Dr. Rafael Bráz A. Farias, pela atenção e consideração dedicadas à construção deste trabalho.

Aos demais professores do Departamento de Estatística e Matemática Aplicada (DEMA) - UFC, pelos ensinamentos que me permitiram apresentar um bom desempenho ao longo da minha formação profissional.

Às amigas Emanuele Cristina e Rebeca Sousa, que foram suporte durante todo o

curso, sendo abrigo e conforto nos momentos difíceis, e permanência na alegria que se estende até hoje no grupo "As Patroas".

Aos amigos Tiffany Pimentel e Gabriel Taveira, por todo o carinho e cuidado que tiveram comigo, pelas aulas ministradas com tanto zelo no pós-aula, seja presencial ou online. Sou muito grata por esses momentos que me edificaram.

Por fim, a cada pessoa que contribuiu de alguma forma com o meu crescimento durante essa trajetória.

"O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são". (Aristóteles)

RESUMO

A Estatística é uma ciência importante para o desenvolvimento da sociedade, pois fornece ferramentas para o estudo de diversas situações, auxiliando na tomada de decisões. Dentro da Estatística, há uma linha que estuda fenômenos espacialmente distribuídos chamado de Geoestatística, cujo objetivo é modelar, analisar, prever e mapear variáveis espaciais com base nos dados amostrados nos pontos específicos de levantamento. O presente estudo aplica a Geoestatística para modelar e mapear a variabilidade espacial da tensão admissível do solo de regiões da cidade de Fortaleza - CE, utilizando a técnica de krigagem ordinária na interpolação dos dados e a validação cruzada para garantir sua robustez e precisão na predição da resistência do subsolo. A metodologia adotada visa gerar mapas georreferenciados com o banco de dados adquirido, de modo a contribuir para a sociedade. O levantamento da coleta de dados se deu através da obtenção de relatórios de sondagem *Standard Penetration Test* (SPT) obtidos com a empresa Geológico Geotécnica, onde foi possível compor uma amostra de ensaios de sondagem SPT, realizados em 48 bairros de Fortaleza. O ensaio permite a identificação do tipo de solo presente nas áreas investigadas e a obtenção de um Índice de resistência a penetração chamado, no meio técnico, de N_{spt} . Nos resultados estão expostos mapas previstos com a determinação preliminar da tensão admissível do solo de Fortaleza, que contribuem para o estudo preliminar dessas regiões e auxilia na tomada de decisão para construções civis. Além disso são apresentados gráficos que representam o comportamento estatístico dos dados amostrais estudados, como o N_{spt} .

Palavras-chave: Análise Geostatística; Sondagem SPT; Validação Cruzada; Krigagem Ordinária.

ABSTRACT

Statistics is an important science for the development of society, as it serves as a tool for studying a wide range of situations and supporting decision-making. Within Statistics, there is a branch that focuses on spatially distributed phenomena, known as Geostatistics. Its objective is to model, analyze, predict, and map spatial variables based on data sampled from specific survey points. The present study applies Geostatistics to model and map the spatial variability of the allowable bearing capacity of the soil in regions of Fortaleza, using ordinary kriging for data interpolation and cross-validation to ensure the robustness and accuracy of subsurface resistance predictions. This methodology is applied with the aim of generating georeferenced maps from the acquired database, thereby contributing to society. Data collection was conducted through the acquisition of SPT (Standard Penetration Test) survey reports provided by the geotechnical company Geológico, which enabled the composition of a dataset from SPT tests carried out in 48 neighborhoods of Fortaleza, CE. The test allows for the identification of the soil type present in the investigated locations and the determination of a penetration resistance index known in the technical field as N_{spt} . The results include predictive maps with a preliminary assessment of the allowable bearing capacity of the soil in Fortaleza, contributing to the initial geotechnical analysis of these regions and supporting decision-making in civil construction. Additionally, graphs are presented to illustrate the statistical behavior of the sample data analyzed, including the N_{spt} .

Keywords: Geostatistical Analysis; SPT Survey; Cross-Validation; Ordinary Kriging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aparato de realização SPT.	17
Figura 2 – Variograma experimental (azul) e modelo ajustado (vermelho)	26
Figura 3 – Modelos Variográficos	27
Figura 4 – Localização espacial dos pontos de ensaio coletados.	32
Figura 5 – Boxplot e histograma da variáveis N_{spt3m} na escala original e na escala logarítmica.	38
Figura 6 – Variogramas experimentais da variável $\log(1 + N_{spt3m})$ nas direções 0° , 45° , 90° e 135°	39
Figura 7 – Ajuste de Modelos Teóricos ao Variograma Experimental.	41
Figura 8 – Validação Cruzada - Exponencial.	43
Figura 9 – Krigagem Ordinária ($\log(1 + N_{spt3m})$) - topo a esquerda e Krigagem Ordi- nária (N_{spt3m} - escala original) - no topo a direita e Variância da Krigagem Ordinária - parte inferior.	45
Figura 10 – Isovalor de NSPT na profundidade de 3 m.	47
Figura 11 – Relatório de Sondagem	55
Figura 12 – Relatório	56
Figura 13 – Relatório	57
Figura 14 – Planta de situação	58
Figura 15 – Perfil de Sondagem	59
Figura 16 – Acervo fotográfico	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estado de compactidade e consistência dos solos	19
Tabela 2 – Faixas de ajuste para a distribuição Lognormal	20
Tabela 3 – Modelos de variograma e suas respectivas fórmulas.	26
Tabela 4 – Análise descritiva da variável geotécnica.	36
Tabela 5 – Análise descritiva da variável geotécnica após a transformação logarítmica dos dados.	37
Tabela 6 – Parâmetros ajustados dos modelos de variograma.	42
Tabela 7 – Resultados da validação cruzada (LOOCV) para os modelos de variograma ajustados à variável $\log(1 + N_{spt3m})$	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$N_{\text{spt}3\text{m}}$	número de golpes do ensaio de sondagem à percussão (SPT) na profundidade de 3 m
N_{spt}	número de golpes do ensaio de sondagem à percussão
N	Índice de resistência à penetração
σ_{adm}	Tensão admissível do solo
ABGE	Associação Brasileira de Geologia
KO	Krigagem ordinária
NBR	Norma Brasileira
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos	15
1.3	Estrutura do Trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Sondagem SPT (<i>Standard Penetration Test</i>)	17
2.1.1	<i>Tensão Admissível/ Resistência</i>	19
2.2	Análise estatística dos dados	20
2.3	Geoestatística	21
2.3.1	<i>Estimação Linear - Krigagem</i>	22
2.3.2	<i>Variograma</i>	25
2.3.3	<i>Modelos Clássicos da Geoestatística</i>	27
2.3.3.1	<i>Modelo Exponencial</i>	27
2.3.3.2	<i>Modelo Esférico</i>	28
2.3.3.3	<i>Modelo Gaussiano</i>	29
2.3.4	<i>Validação cruzada</i>	29
3	METODOLOGIA	31
3.1	Área de estudo	31
3.1.1	<i>Localização da área de estudo</i>	31
3.2	Coleta dos dados	32
3.2.1	<i>Coleta das amostras</i>	32
3.2.2	<i>Materias utilizados</i>	33
3.3	Análise dos dados	33
3.3.1	<i>Análise descritiva</i>	33
3.3.2	<i>Análise Geoestatística</i>	34
3.3.3	<i>Validação de modelos</i>	35
3.3.4	<i>Uso de Ferramentas de Inteligência Artificial</i>	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	Análise Estatística	36
4.1.1	<i>Análise descritiva</i>	36

4.2	Análise Geoestatística	39
4.2.1	Análise Direcional do Variograma	39
4.2.2	Ajuste de Modelo Teórico ao Variograma Experimental	40
4.2.3	Validação Cruzada (Cross-Validation)	42
4.2.4	Validação Cruzada - modelo exponencial	43
4.2.5	Interpolação Espacial por Krigagem	44
4.2.6	Análise dos Resultados Espaciais	46
5	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	REFERÊNCIAS	50
	APÊNDICE A –KRIGAGEM ORDINÁRIA	52
	APÊNDICE B –VALIDAÇÃO CRUZADA	54
	ANEXO A –RELATÓRIO	55
	ANEXO B –PLANTA DE SITUAÇÃO	58
	ANEXO C –PERFIL DE SONDAGEM	59
	ANEXO D –ACERVO FOTOGRÁFICO	60

1 INTRODUÇÃO

A Geoestatística tornou-se conhecida como um conjunto de métodos da estatística matemática caracterizado pela aplicação da então denominada *Teoria das Variáveis Regionalizadas*, concebida e desenvolvida pelo engenheiro Georges Matheron no período de 1957 a 1965. Trata-se de uma abordagem matemática avançada para o estudo de fenômenos naturais. Essa ciência relativamente recente desenvolveu-se a partir de estudos voltados à mineração, ao dimensionamento de jazidas e à estimativa e cálculo de reservas minerais (VALENTE, 1989).

O conhecimento das condições do solo em subsuperfície é essencial para a elaboração de projetos de engenharia civil seguros e economicamente viáveis, além de ser aplicado em fundações, estabilidade de taludes, estruturas de contenção e planejamento urbano (PINTO, 2006).

A utilização de técnicas de geoestatística na análise de dados oriundos de sondagens SPT permite uma estimativa mais precisa da resistência do subsolo na cidade de Fortaleza, CE. Segundo Silva et al. (2021, p. 16), “O semivariograma é representado por um gráfico, no qual a semivariância da variável regionalizada está em função da distância dos pontos de coleta do atributo. No momento em que a dependência espacial é constatada pelo semivariograma, o mapa da variável é gerado pela krigagem.”

A sondagem à percussão é um método de investigação do solo em que a perfuração é realizada por meio de trado ou de lavagem, com retirada de amostras para caracterização, identificação da profundidade do nível d’água e medição dos índices de resistência à penetração ao longo da profundidade. Ao final de cada metro perfurado, caso desejado, é possível mensurar o torque necessário para o cisalhamento do solo ao longo de uma superfície de ruptura cilíndrica, além de reaproveitar o furo para a execução de outros ensaios (ABGE, 1999).

Este estudo propõe uma metodologia estatística baseada em técnicas de geoestatística, como a krigagem, para estimar a variabilidade espacial da resistência do solo em Fortaleza a partir de sondagens SPT. Foram coletadas amostras de solo de 48 bairros da cidade, totalizando 281 relatórios de sondagens à percussão. A integração de dados espaciais com métodos geoestatísticos possibilita identificar padrões de variação da resistência do solo, caracterizar sua distribuição espacial e oferecer uma avaliação mais confiável da capacidade de suporte do terreno, contribuindo para o planejamento e execução de obras civis, com redução de custos e minimização dos riscos associados à construção em áreas heterogêneas (COSTA; YAMAMOTO, 2017). Para a predição, o método geoestatístico escolhido foi a krigagem, por ser um procedi-

mento de interpolação exato, ou seja, que leva em consideração todos os valores observados e é não tendencioso, pois atribui pesos a cada amostra de forma a minimizar a variância da estimativa (erro de predição) (RODRIGUES *et al.*, 2015).

A disponibilidade de dados de sondagem é limitada, pois não há um banco público disponível para análise de estudos, uma vez que não existe um banco de dados centralizado e de consulta pública. A variabilidade geotécnica do subsolo em Fortaleza representa um desafio relevante para o setor da engenharia civil, influenciando diretamente na segurança e na eficiência das obras de infraestrutura. A Associação Brasileira de Normas Técnicas regulamenta a execução do ensaio de sondagem SPT por meio da norma ABNT NBR 6484 a qual estabelece critérios técnicos padronizados para a realização da sondagem, visando garantir a confiabilidade dos resultados e a comparabilidade dos dados obtidos em diferentes locais. A ausência de análises detalhadas e especialmente explícitas dos dados de sondagens pode acarretar estimativas imprecisas da resistência do solo, resultando em projetos inadequados e em custos adicionais.

Diante disso, questiona-se: de que forma a geoestatística pode ser empregada para aprimorar a análise dos dados de sondagens SPT e fornecer uma avaliação mais precisa da resistência do subsolo em Fortaleza, CE, contribuindo para uma tomada de decisão mais embasada no planejamento e execução de obras civis?

1.1 Justificativa

A relevância deste estudo está em preencher uma lacuna no conhecimento técnico-científico ao aplicar a geoestatística na análise de dados de resistência do subsolo em Fortaleza-CE. Espera-se que os resultados contribuam para o avanço do entendimento sobre a variabilidade espacial das propriedades geotécnicas da região, oferecendo subsídios para práticas mais eficientes e sustentáveis na engenharia civil. Entretanto, a elevada variabilidade espacial do solo e a limitação do número de pontos de amostragem representam desafios para a obtenção de um conjunto de dados representativo em escala urbana.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é aplicar técnicas de geoestatística na análise de dados oriundos de sondagens SPT, com o intuito de estimar a resistência do subsolo na cidade de Fortaleza, CE.

Objetivos Específicos

- Realizar uma análise exploratória dos dados de sondagem, com o intuito de identificar padrões e tendências de variabilidade espacial da resistência do subsolo;
- Aplicar métodos geoestatísticos, como krigagem ordinária e validação cruzada, para estimar a distribuição espacial da resistência do solo em toda a área de estudo;
- Avaliar a eficácia e a aplicabilidade da metodologia proposta por meio de estudos de caso voltados a projetos de engenharia civil na região de Fortaleza.
- Gerar mapas georreferenciados da resistência do subsolo visando subsidiar o conhecimento prévio das características geotécnicas da superfície de Fortaleza.

1.3 Estrutura do Trabalho

A estrutura deste trabalho está organizada da seguinte forma:

- **Capítulo 1. Introdução:** apresenta a contextualização do estudo, a justificativa e os objetivos da pesquisa;
- **Capítulo 2. Fundamentação teórica:** trata da fundamentação teórica das técnicas utilizadas no modelo proposto, incluindo o levantamento de trabalhos relacionados e os principais métodos aplicados no processo de krigagem, com foco em análises e validações;
- **Capítulo 3. Metodologia:** descreve a metodologia adotada, detalhando as etapas de coleta de dados, análise descritiva, aplicação de técnicas geoestatísticas, validação dos modelos e apresentação dos resultados;
- **Capítulo 4. Resultados e discussão:** apresenta e discute os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo construído;
- **Capítulo 5. Conclusão e considerações finais:** traz as conclusões do trabalho, retomando os objetivos, os principais achados, as contribuições da pesquisa e propondo sugestões para estudos futuros.

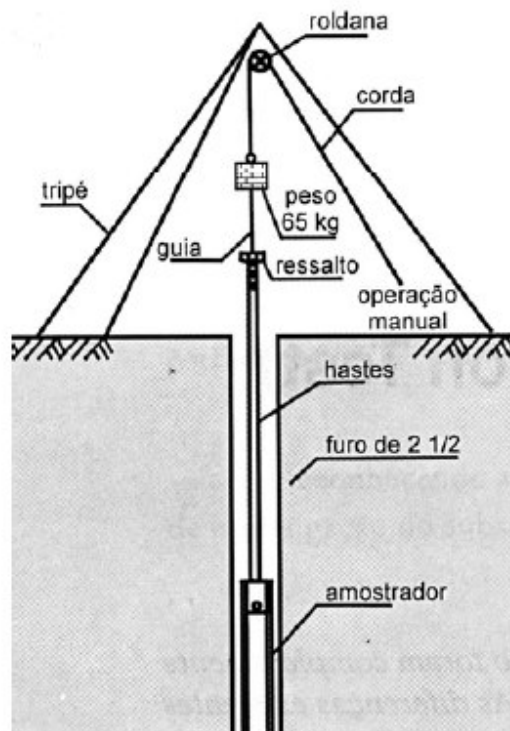
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sondagem SPT (*Standard Penetration Test*)

A sondagem de simples reconhecimento (SPT) teve seu primeiro relato no ano de 1902, quando o engenheiro Charles R. Gow, com o objetivo de aprimorar o processo de investigação do subsolo para aplicação na engenharia de fundações — até então realizado por meio do processo de circulação d'água ou lavagem — introduziu o método de amostragem a seco.

Conforme estabelecido pela norma Norma Brasileira (NBR) 6484 e pela Associação Brasileira de Geologia (ABGE), os equipamentos utilizados na execução de sondagens de simples reconhecimento com SPT incluem: tripé com roldana, tubos de revestimento, sapata de revestimento, hastes de lavagem e de penetração, amostrador padrão, martelo padronizado para cravação (65 kg), cabeças de bater dos tubos de revestimento e das hastes de cravação, haste-guia do martelo, baldinho com válvula de pé, bomba de água, fita métrica ou trena, recipientes para amostras e martelo de saca-tubos. A Figura 1 ilustra os principais componentes utilizados na realização do ensaio SPT.

Figura 1 – Aparato de realização SPT.



Fonte: Schnaid (2000)

Segundo a ABGE,1999, a sondagem à percussão é um ensaio de baixo custo e de fácil manuseio:

A sondagem à percussão é um método para investigação de solos em que a perfuração é feita por meio de trado ou de lavagem, retirando-se amostras do solo que permitem caracterizá-lo, obter a profundidade do nível da água, além da medida de índices de resistência à penetração ao longo da profundidade. Ao final de cada metro perfurado, caso seja de interesse, é possível medir o torque necessário para o cisalhamento do solo ao longo de uma superfície de ruptura cilíndrica, além de permitir o reaproveitamento do furo para realização de outros ensaios ABGE (1999).

Entre os ensaios *in situ* que fornecem informações geotécnicas sobre o perfil do solo, a sondagem de simples reconhecimento, ou *Standard Penetration Test* (SPT), é, sem dúvida, o sistema de investigação mais utilizado no Brasil e no mundo, tanto pela engenharia geotécnica quanto pela engenharia de fundações. Essa preferência deve-se à sua simplicidade, robustez, baixo custo e à ampla experiência empírica acumulada na execução e interpretação do ensaio Odebrecht (2003).

O ensaio tem como principal finalidade fornecer informações geotécnicas relevantes, como Índice de resistência à penetração (N) ou número de golpes do ensaio de sondagem à percussão (N_{spt}), determinado a cada metro de profundidade. Além disso, permite identificar os tipos de solos encontrados e suas respectivas profundidades de ocorrência, bem como registrar a posição do nível freático, quando presente, no momento da execução da sondagem.

O índice de resistência à penetração N corresponde ao número de golpes necessários para cravar 30 cm de um amostrador padrão, após uma cravação inicial de 15 cm, destinada à estabilização do ensaio. Essa cravação é realizada com o uso de um martelo padronizado de 65 kg, que cai livremente de uma altura de 75 cm, transmitindo energia ao amostrador.

Durante a execução da sondagem, também é possível coletar amostras representativas do solo a cada metro, utilizando um amostrador padrão com diâmetro externo de 50 mm. Essas amostras permitem a caracterização tátil-visual do solo, complementando as informações obtidas com o N_{spt} , sendo fundamentais para a classificação dos materiais e o dimensionamento de fundações e outras estruturas geotécnicas.

A interpretação dos valores de N_{spt} foi realizada com base nos critérios da Tabela 1 da ABNT NBR 6484:2020, que classifica o estado de compactação de solos arenosos e a consistência de solos argilosos de acordo com faixas específicas de N_{spt} . Essa classificação permite a identificação de zonas de solo fofo, compacto ou duro, e auxilia na análise geotécnica da área de estudo.

Tabela 1 – Estado de compactidade e consistência dos solos

Solo	Índice de Resistência à penetração (N)	Designação
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa(o)
	5 – 8	Pouco compacta(o)
	9 – 18	Medianamente compacta(o)
	19 – 40	Compacta(o)
	> 40	Muito compacta(o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 – 5	Mole
	6 – 10	Média(o)
	11 – 19	Rija(o)
	> 19	Dura(o)

Fonte: ANBT NBR 6484:2020.

2.1.1 Tensão Admissível/ Resistência

Para edificações de pequeno porte, é possível verificar a viabilidade da adoção de fundações superficiais, como sapatas isoladas ou radier, bem como a respectiva profundidade de assentamento. Considerando esse contexto, o presente estudo utilizou correlações empíricas amplamente empregadas na prática geotécnica nacional para a estimativa preliminar da Tensão admissível do solo (σ_{adm}), com base exclusivamente no N_{spt} .

As fórmulas empíricas adotadas variam conforme a predominância granulométrica dos solos investigados. Para perfis de solos arenosos, utilizou-se a Equação 2.1, enquanto para solos argilosos foi empregada a Equação 2.2:

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{spt}}{5}, \quad (2.1)$$

e

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{spt}}{8}, \quad (2.2)$$

onde:

- N_{spt} representa o valor médio do número de golpes obtido no ensaio SPT na profundidade correspondente ao bulbo de tensões;
- σ_{adm} é a tensão admissível do solo (em kgf/cm²), estimada de forma preliminar.

Essas expressões empíricas são frequentemente utilizadas em estudos iniciais e podem ser encontradas em manuais técnicos e referências da literatura nacional, como em Velloso e Lopes (2004) e Décourt e Quaresma (1978), que reforçam sua aplicabilidade na ausência de investigações geotécnicas mais detalhadas.

2.2 Análise estatística dos dados

A análise estatística dos dados consiste no uso de técnicas que permitem explorar, resumir e interpretar informações coletadas, com o objetivo de identificar padrões, tendências e relações relevantes. Embora seja uma etapa central no tratamento de dados, ela representa apenas uma parte do escopo estatístico, que também abrange as fases de especificação do problema, planejamento, coleta de dados, apresentação dos resultados e interpretação. Essas etapas são fundamentais para lidar com a crescente complexidade dos dados empíricos, possibilitando decisões mais informadas e contextualizadas (SPIEGELHALTER, 2022).

O processo estatístico tem início com a exploração dos dados por meio de estatísticas descritivas, que permitem identificar padrões, resumir características principais e detectar valores atípicos. Essa etapa é fundamental para interpretar fenômenos observados em estudos experimentais ou aplicados, pois fornece parâmetros para a escolha do modelo probabilístico que melhor representa a distribuição empírica observada. Medidas como média, mediana, desvio padrão, assimetria e curtose são amplamente utilizadas para caracterizar o comportamento dos dados e embasar análises subsequentes (BUSSAB; MORETTIN, 2017; TRIOLA, 2011).

No contexto da engenharia, as ferramentas estatísticas são fundamentais para a compreensão das variáveis envolvidas nos processos analisados, especialmente quando se busca avaliar o ajuste dos dados a distribuições teóricas como a normal ou o lognormal (MONTGOMERY *et al.*, 2012; JR. *et al.*, 2009). Entretanto, quando os dados não atendem aos pressupostos de normalidade, torna-se necessário utilizar técnicas estatísticas não paramétricas, que dispensam suposições rígidas sobre a forma da distribuição (SIEGEL, 1975). Essa abordagem mostra-se particularmente útil em estudos geotécnicos, nos quais os dados empíricos frequentemente apresentam alta variabilidade e assimetria acentuada.

Diante da possibilidade de os dados em estudos geotécnicos seguirem uma distribuição lognormal, pode-se adotar, com 95% de confiança, os intervalos de referência para essa distribuição conforme proposto por Preston (1970), Pearson e Hartley (1976). Tabela 2

Tabela 2 – Faixas de ajuste para a distribuição Lognormal

Métrica	Mínimo	Máximo
Assimetria	0,0	0,4
Curtose	2,4	3,7
Razão Curtose/Assimetria (A/S)	4,5	6,0

Fonte: adaptado de (PEARSON; HARTLEY, 1966).

Seja X uma variável aleatória com distribuição lognormal, denotada por $X \sim \text{Lognormal}(\mu, \sigma^2)$, isto é, o logaritmo natural de X segue uma distribuição normal

$$\ln(X) \sim N(\mu, \sigma^2).$$

Dessa forma, a média e a variância de X na escala original são dadas pela equação 2.1 e 2.2

$$\mathbb{E}[X] = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}, \quad (2.3)$$

$$\text{Var}(X) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2}. \quad (2.4)$$

As medidas de assimetria (γ_1) e curtose excessiva (γ_2) da distribuição lognormal são calculadas por:

$$\gamma_1 = (e^{\sigma^2} + 2) \sqrt{e^{\sigma^2} - 1}, \quad (2.5)$$

$$\gamma_2 = e^{4\sigma^2} + 2e^{3\sigma^2} + 3e^{2\sigma^2} - 6. \quad (2.6)$$

Essas fórmulas permitem caracterizar a assimetria positiva e a curtose leptocúrtica típicas da distribuição lognormal, sendo úteis na análise de variáveis geotécnicas, como a resistência do subsolo, quando estas apresentam grande variabilidade e não seguem uma distribuição simétrica.

Observações:

- Ambas dependem unicamente de σ^2 .
- Quando $\sigma = 0$, a distribuição lognormal se reduz a um valor determinístico e^μ , pois não há variabilidade.
- Quanto maior σ , maior a assimetria e a curtose.

2.3 Geoestatística

A Geoestatística se dedica ao estudo de variáveis distribuídas espacialmente, denominadas variáveis regionalizadas, e fundamenta-se no formalismo das Funções Aleatórias, que permitem modelar propriedades do espaço como variáveis aleatórias associadas a diferentes localizações Matheron (1963); Journel e Huijbregts (1978).

Com base nesse modelo teórico, foram desenvolvidas técnicas como o variograma, cujos ajustes se dão por meio de modelos clássicos na geoestatística, como o esférico, exponencial

e gaussiano, que descrevem a estrutura de dependência espacial dos dados. A validação cruzada é utilizada para avaliar a qualidade desses modelos por meio da krigagem, que também é aplicada posteriormente para estimar valores em locais não amostrados, com base no modelo selecionado. Na sequência, essas técnicas serão apresentadas em maiores detalhes.

A cartografia geotécnica pode ser utilizada como importante ferramenta de contribuição para o avanço científico e tecnológico de diversas áreas da ciência. Na engenharia civil permite, por exemplo, o uso de dados geotécnicos, desde o planejamento até a execução de uma obra de construção civil (PIMENTEL *et al.*, 2020).

2.3.1 Estimação Linear - Krigagem

A krigagem é um método de estimação linear e local, fundamentado na autocorrelação espacial das variáveis. Segundo Landim (2003), a krigagem é não tendenciosa, de variância mínima e amplamente aplicada ao mapeamento de solos.

Segundo (FONTELES, 2003), a estimativa $z^*(x_0)$ de $z(x_0)$ consiste na solução de um sistema linear de equações que resulta na combinação linear dos pesos λ_i , ótimos, com os valores pertencentes à vizinhança local estabelecida (CRESSIE, 1993). Como o estimador Krigagem ordinária (KO) admite uma condição de não-vies, então:

$$E[Z^*(x_0)] - E[Z(x_0)] = 0 \quad (2.7)$$

Assim como $E[Z^*(x_0)] = m$, a condição de estacionaridade de segunda ordem é admitida, então:

$$E[Z^*(x_0)] = E \left[\lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \right] \Rightarrow m = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i m \quad (2.8)$$

Uma VR estacionária implica em uma mesma média m para $E[Z^*(x_0)]$ e $E[Z(x_0)]$, por força da seguinte condição de não-vies:

$$\lambda_0 = 0 \quad \text{e} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (2.9)$$

Entretanto, como a média m não é conhecida, a condição tem que ser rigidamente satisfeita (JOURNAL; HUIJBREGTS, 1978).

A estimativa $z^*(x_0)$ de $z(x_0)$ é dada por:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (2.10)$$

Conforme discutido por (FONTELES, 2003) A minimização da variância do erro da estimação baseia-se na premissa de estimativa do melhor conjunto de ponderadores para que a condição de não-vies seja mantida. Sendo assim, a variância de estimativa é:

$$\sigma_E^2 = C(0) - 2 \sum_i \lambda_i C(x_0 - x_i) + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j C(x_i - x_j) \quad (2.11)$$

com a seguinte restrição:

$$\sum_j \lambda_j = 1 \quad \text{ou} \quad \sum_j \lambda_j - 1 = 0$$

Segundo (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989), este incremento é representado pela introdução do operador de Lagrange (μ).

A equação do lagrangiano é:

$$L(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, \mu) = C(0) - 2 \sum_i \lambda_i C(x_0 - x_i) + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j C(x_i - x_j) - 2\mu \left(\sum_j \lambda_j - 1 \right) \quad (2.12)$$

Para minimizar o lagrangiano, faz-se cada uma das derivadas parciais iguais a zero:

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = -2C(x_0 - x_i) + 2 \sum_j \lambda_j C(x_i - x_j) - 2\mu = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = \sum_j \lambda_j - 1 = 0 \quad (2.14)$$

Com a minimização da variância do erro, isto resulta no sistema de equações de krigagem:

$$\begin{cases} \sum_j \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_0 - x_i), & i = 1, 2, \dots, n \\ \sum_j \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (2.15)$$

O sistema de equações de krigagem escrito em termos da função semivariograma é representado na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \vdots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{bmatrix}$$

A variância de krigagem ordinária (σ_{kO}^2) é dada por:

$$\sigma_{kO}^2 = C(0) - 2 \sum_i \lambda_i C(x_0 - x_i) + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j C(x_i - x_j) \quad (2.16)$$

O termo pode ser simplificado (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989):

$$\sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j C(x_i - x_j) = \sum_i \lambda_i C(x_0 - x_i) + \mu \quad (2.17)$$

Portanto:

$$\sigma_{kO}^2 = C(0) - \sum_i \lambda_i C(x_0 - x_i) + \mu \quad (2.18)$$

Ou em termos da função semivariograma:

$$\sigma_{kO}^2 = \sum_i \lambda_i \gamma(x_0 - x_i) + \mu \quad (2.19)$$

De acordo (FONTELES, 2003), problemas relacionados à robustez de estimadores lineares como a krigagem ordinária foram discutidos por (CRESSIE; HAWKINS, 1980) e (BARDOSSY, 1988).

O estimador KO é de longe o mais utilizado quando se emprega interpolação de dados cuja média não é conhecida, não obstante a estacionaridade seja admitida. (JOURNEL; ROSSI, 1989) discutem a comparação entre KO e krigagem universal.

Segundo (YAMAMOTO, 2000), a variância de KO depende diretamente do semi-variograma global, havendo incompatibilidade entre o erro estimado localmente e a estimativa realizada. O autor propõe a variância de interpolação:

$$S_o^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z(x_i) - Z^*(x_0)]^2 \quad (2.20)$$

Segundo (FONTELES, 2003), variância de interpolação permite reconhecimento do efeito proporcional devido ao elevado grau de assimetria de curvas de distribuição de frequência dos dados, corroborando (GOOVAERTS, 1997).

2.3.2 Variograma

Seja $Z(x)$ um processo estocástico estacionário de segunda ordem. O variograma é definido por:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \mathbb{E} \left[(Z(x) - Z(x+h))^2 \right].$$

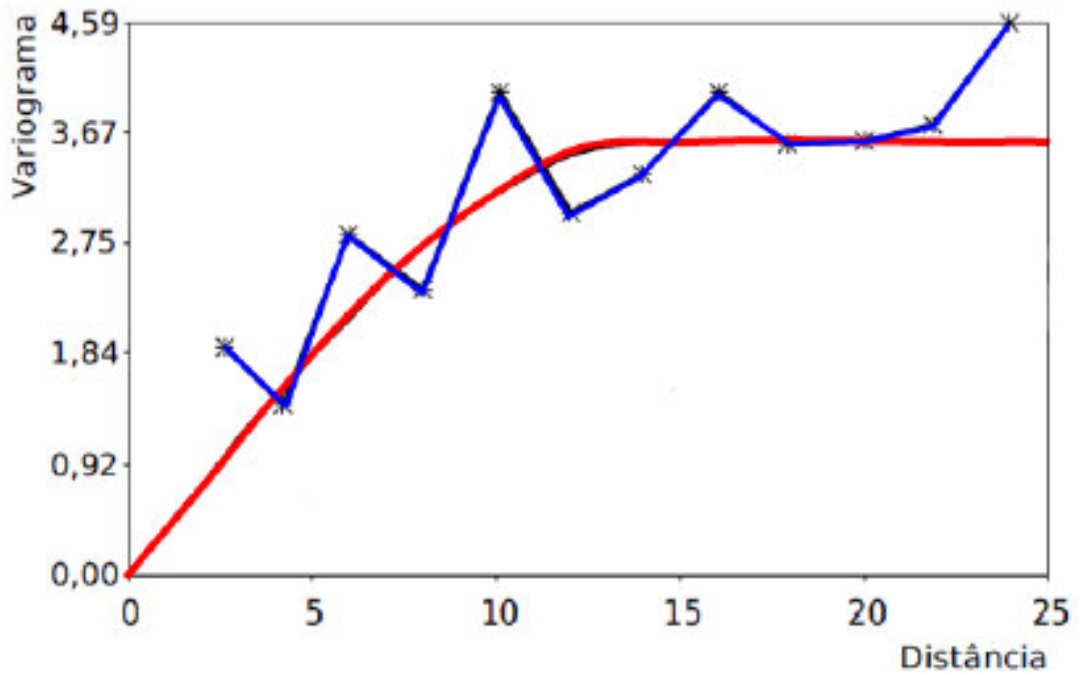
Se o processo for isotrópico:

$$\gamma(h) = \sigma^2 (1 - \rho(h)),$$

onde $\rho(h)$ é a função de correlação e σ^2 é a variância total.

O variograma constitui uma ferramenta fundamental para representar a estrutura espacial do fenômeno analisado, sendo indispensável na identificação e quantificação da variabilidade natural da variável observada. A análise inicia-se com a construção do variograma experimental, seguida do ajuste de um modelo teórico ao gráfico obtido, o qual descreve a correlação espacial entre pares de pontos localizados na área de amostragem, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Variograma experimental (azul) e modelo ajustado (vermelho)



Fonte: Yamamoto & Landim, 2013

Segundo Rendu (1978), o semivariograma aumenta à medida que cresce a distância entre as amostras, até atingir um patamar denominado *sill*, no qual se estabiliza. Esse patamar, teoricamente, deve corresponder à variância a priori da variável regionalizada. A distância na qual o semivariograma alcança esse valor é chamada de amplitude variográfica (*range*), representando o raio de influência espacial da variável em estudo.

Em geoestatística, o variograma é uma função fundamental usada para descrever a dependência espacial de uma variável regionalizada. Três modelos clássicos são amplamente utilizados: esférico, exponencial e gaussiano. A seguir, é possível observar as fórmulas de cada um através da tabela 3 abaixo em resumo comparativo.

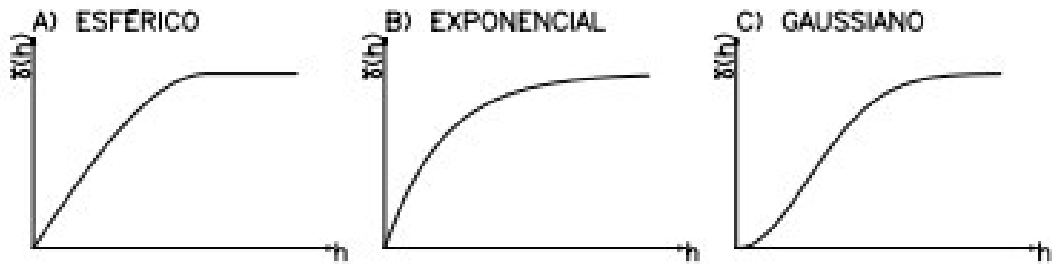
Tabela 3 – Modelos de variograma e suas respectivas fórmulas.

Modelo	Fórmula	Sill	Alcance
Exponencial	$c(1 - e^{-h/a})$	Assintótico	$\approx 3a$
Esférico	$c \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]$	Atingido	a
Gaussiano	$c(1 - e^{-(h/a)^2})$	Assintótico	$\approx 1,732a$

Fonte: adaptado de Isaaks e Srivastava (1989).

Na Figura 3, podemos observar os modelos variográficos e analisar a possibilidade de identificar o melhor gráfico para o estudo, conforme será abordado logo abaixo.

Figura 3 – Modelos Variográficos



Fonte: Yamamoto, 2001

2.3.3 Modelos Clássicos da Geoestatística

2.3.3.1 Modelo Exponencial

Assume-se, neste modelo, uma função de correlação do tipo:

$$\rho(h) = e^{-\frac{h}{a}},$$

em que h representa a distância entre os pontos amostrais e a é a constante de amplitude.

Substituindo essa expressão na definição do variograma, obtém-se:

$$\gamma(h) = \sigma^2 \left(1 - e^{-\frac{h}{a}}\right).$$

Adotando $c = \sigma^2$, a fórmula do variograma pode ser reescrita como:

$$\gamma(h) = c \left(1 - e^{-\frac{h}{a}}\right), \quad (2.21)$$

caracterizando o ajuste por meio de uma curva exponencial. O valor de c , denominado *sill*, corresponde ao patamar assintótico da curva, enquanto a constante a representa a amplitude variográfica (*range*), associada ao ponto onde a tangente da curva na origem intercepta o patamar.

- O *sill* (c) é atingido de forma assintótica, ou seja, o variograma se aproxima de c sem alcançá-lo exatamente.
- O modelo não possui alcance definido; considera-se como *range prático* aproximadamente $3a$.

A inclinação da tangente à curva no ponto de origem é dada por:

$$\left. \frac{d\gamma(h)}{dh} \right|_{h=0} = \frac{c}{a}. \quad (2.22)$$

Definições dos parâmetros:

- h : distância entre dois pontos amostrais.

- $\rho(h)$: função de correlação para a distância h .
- $\gamma(h)$: variograma em função da distância h .
- σ^2 : variância dos dados.
- c : *sill* ou patamar do variograma, valor assintótico que o variograma atinge.
- a : parâmetro de alcance (*range*), relacionado à distância na qual há perda de correlação espacial.

2.3.3.2 Modelo Esférico

Matematicamente, a fórmula do modelo esférico é dada por:

$$\gamma(h) = \begin{cases} c \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & \text{se } h \leq a, \\ c, & \text{se } h > a, \end{cases} \quad (2.23)$$

onde:

- c representa o *sill*, isto é, o patamar da variância a priori;
- a corresponde à *amplitude variográfica* (*range*), ou alcance.

Esse modelo apresenta crescimento cúbico até atingir o patamar c exatamente no alcance a , mantendo-se constante a partir desse ponto. Trata-se de uma função contínua com derivada contínua no ponto de junção, o que confere suavidade ao modelo. Destaca-se que:

- O *sill* é atingido em $h = a$.
- Possui alcance bem definido.
- É o modelo mais utilizado na prática geoestatística, especialmente em estudos de depósitos minerais Davis (1986).

A inclinação da tangente à curva no ponto de origem é dada por:

$$\left. \frac{d\gamma(h)}{dh} \right|_{h=0} = \frac{3c}{2a}. \quad (2.24)$$

Definições dos parâmetros:

- h : distância entre dois pontos amostrais.
- $\gamma(h)$: variograma em função da distância h .
- c : *sill*, valor máximo (patamar) do variograma.
- a : *range* ou alcance, distância a partir da qual não existe mais correlação espacial.

2.3.3.3 Modelo Gaussiano

A função de correlação para o modelo gaussiano assume a forma:

$$\rho(h) = e^{-\left(\frac{h}{a}\right)^2}.$$

Substituindo essa expressão na definição do variograma, obtém-se:

$$\gamma(h) = \sigma^2 \left(1 - e^{-\left(\frac{h}{a}\right)^2} \right).$$

Adotando $c = \sigma^2$, a equação do variograma pode ser reescrita como:

$$\gamma(h) = c \left(1 - e^{-\left(\frac{h}{a}\right)^2} \right), \quad (2.25)$$

caracterizando um ajuste por meio de uma curva suavemente crescente com comportamento quadrático. O parâmetro c , denominado *sill*, representa o patamar assintótico da curva, enquanto a corresponde à amplitude variográfica (*range*), associada ao ponto em que a tangente na origem interceptaria esse patamar. Destaca-se que:

- Apresenta crescimento suave, de forma quadrática, próximo à origem.
- Indicado para processos regionalizados com alta continuidade espacial.

A inclinação da tangente da curva na origem é dada por:

$$\left. \frac{d\gamma(h)}{dh} \right|_{h=0} = 0. \quad (2.26)$$

Definições dos parâmetros:

- h : distância entre dois pontos amostrais.
- $\gamma(h)$: variograma em função da distância h .
- c : *sill*, valor máximo (patamar) do variograma.
- a : *range* ou alcance, distância a partir da qual a correlação espacial se torna desprezível.

2.3.4 Validação cruzada

Segundo Yamamoto e Landim (2013), a validação cruzada é uma técnica semelhante ao método de *jackknifing*, consistindo na realização de estimativas sucessivas com a remoção, em cada iteração, de um ou mais pontos do conjunto amostral. No contexto da análise variográfica, esse procedimento é aplicado de forma sistemática, considerando a exclusão controlada de amostras individuais ou múltiplas do conjunto de dados, com o objetivo de avaliar a capacidade preditiva do modelo ajustado.

Após a execução da validação cruzada, alguns indicadores estatísticos são calculados para mensurar a qualidade das estimativas. Entre os principais, destacam-se:

Erro médio (ME - Mean Error)

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i)),$$

onde $Z^*(x_i)$ representa o valor estimado na localização x_i e $Z(x_i)$ o valor observado. Um ME próximo de zero indica ausência de viés nas estimativas. E n é o número de pares ordenados.

Raiz do erro quadrático médio (RMSE - Root Mean Squared Error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i))^2}.$$

O RMSE quantifica o erro médio absoluto das estimativas. Valores menores indicam melhor desempenho do modelo.

Coefficiente de Determinação (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - Z^*(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - \bar{Z})^2},$$

onde \bar{Z} é a média dos valores observados. Valores próximos de 1 indicam boa capacidade preditiva do modelo.

Esses indicadores auxiliam na escolha do modelo variográfico mais adequado e no ajuste dos parâmetros da krigagem, permitindo a seleção de um modelo que apresente bom equilíbrio entre precisão e robustez na interpolação espacial.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho está estruturada em quatro etapas principais: definição da área de estudo, coleta dos dados de sondagens, análise estatística dos dados geotécnicos e geração de mapas georreferenciados. A pesquisa tem caráter quantitativo, com foco na aplicação de técnicas descritivas e geoestatísticas para estimar a resistência do subsolo da cidade de Fortaleza, CE, a partir de dados obtidos por ensaios de SPT (Standard Penetration Test).

Inicialmente, apresenta-se a área geográfica de abrangência da pesquisa e sua relevância para a engenharia civil local. Em seguida, descrevem-se os procedimentos de obtenção, organização e depuração dos dados, fornecidos por uma empresa especializada. A etapa analítica foi conduzida com o auxílio da linguagem estatística R (R Core Team, 2024), utilizando pacotes específicos para análise descritiva, modelagem de variogramas, krigagem e validação cruzada, com o objetivo de representar a distribuição espacial da resistência do solo.

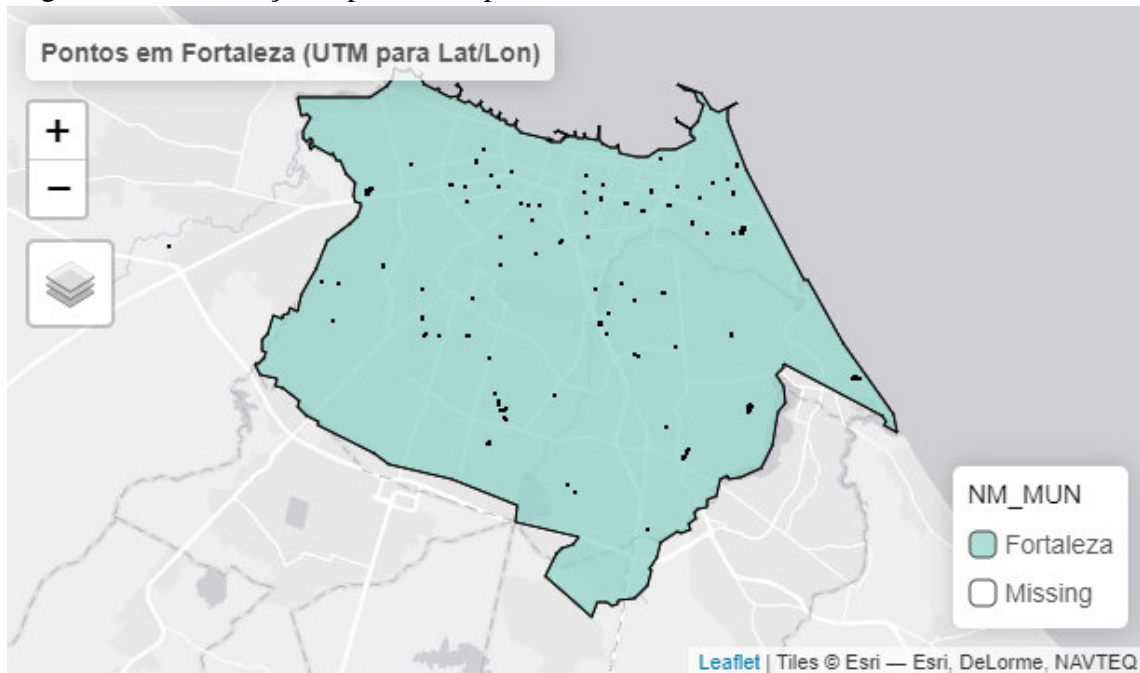
3.1 Área de estudo

3.1.1 *Localização da área de estudo*

O município de Fortaleza está situado em uma planície litorânea na porção norte do estado do Ceará, na região Nordeste do Brasil, possuindo aproximadamente 32 km de linha costeira. Faz limite ao norte com o Oceano Atlântico; ao sul com os municípios de Maracanaú, Itaitinga e Pacatuba; a oeste com Eusébio e Aquiraz; e a leste com o município de Caucaia.

A cidade de Fortaleza (Figura 4) constitui-se como um dos principais centros urbanos do estado do Ceará, reunindo o maior contingente populacional da unidade federativa. De acordo com dados do INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) (2024), Fortaleza ocupa a quinta posição entre as maiores cidades do Brasil, com uma população estimada de 2.574.412 habitantes.

Figura 4 – Localização espacial dos pontos de ensaio coletados.



Fonte: autora.

3.2 Coleta dos dados

3.2.1 Coleta das amostras

Os dados utilizados neste trabalho foram fornecidos pela empresa *Geologic Geotécnica LTDA*. Ao todo, foram disponibilizados 281 ensaios de sondagem à percussão, realizados em diferentes áreas da cidade de Fortaleza - Ce.

Os valores de N_{spt} foram extraídos diretamente dos relatórios técnicos de sondagem, a partir dos quais foi construído um banco de dados georreferenciado em planilha eletrônica. Posteriormente, esse banco foi importado e manipulado usando a linguagem R, com o objetivo de realizar análises descritivas e geoestatísticas.

Os relatórios de sondagem continham informações sobre o índice de resistência à penetração (N_{SPT}), o tipo de solo encontrado, o nível d'água presente no local do furo, além das coordenadas geográficas correspondentes a cada ponto amostrado.

Para fins de padronização e comparabilidade, adotou-se como variável principal o valor de (N_{SPT}) a 3 metros

3.2.2 *Materias utilizados*

No presente trabalho, foram utilizados perfis de sondagens SPT referentes a diferentes regiões da cidade de Fortaleza - Ce, disponibilizados pela empresa mencionada anteriormente. Os dados foram inicialmente compilados e organizados em planilha eletrônica, servindo como base para as análises estatísticas subsequentes.

Para o processamento e análise desses dados, utilizou-se o ambiente estatístico R (R Core Team, 2024), com o apoio de pacotes específicos e adequados à natureza geoestatística da pesquisa. Essa abordagem possibilitou a obtenção de resultados consistentes e relevantes para o levantamento da resistência do subsolo.

Após a análise estatística, os dados foram integrados a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), sendo carregados no *software* (QGIS Development Team, 2023), versão 3.34.2 – Prizren, com o intuito de realizar a visualização espacial e a elaboração de mapas temáticos.

3.3 *Análise dos dados*

3.3.1 *Análise descritiva*

Após a etapa de coleta, foi realizada uma análise descritiva com o banco de dados montado em planilha eletrônica, foi possível, com o uso do *software* R identificar padrões, tendências e possíveis anomalias. Essa análise foi dividida em três etapas principais: visualização de dados, estatísticas descritivas e mapeamento espacial.

- **Visualização de dados:** foram elaborados gráficos de dispersão para examinar a distribuição dos valores do índice de resistência à penetração (N_{spt}), bem como sua relação com a profundidade dos furos e a localização geográfica dos pontos amostrados.
- **Estatísticas descritivas:** foram calculadas medidas como média, mediana, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, entre outras, a fim de resumir as características centrais e a variabilidade dos dados coletados.
- **Mapeamento espacial:** foram produzidos mapas preliminares representando a distribuição espacial dos pontos de sondagem e dos respectivos valores de N_{spt} , permitindo uma visualização inicial da variabilidade geotécnica na área de estudo.

3.3.2 *Análise Geoestatística*

Foi aplicado técnicas de interpolação geoestatística, como a krigagem ordinária, para modelar a distribuição espacial da resistência do subsolo. Nessa análise, estimaram-se os valores de resistência do solo em locais não amostrados com base nos dados das sondagens SPT, utilizando os modelos geoestatísticos desenvolvidos.

As **Variáveis Regionalizadas (VR's)**, diferentemente das **Variáveis Aleatórias (VA's)**, apresentam condicionantes espaciais que influenciam a distribuição dos fenômenos naturais. A **Teoria das Variáveis Regionalizadas** fundamenta a **Geoestatística**, ao propor uma abordagem estocástica que considera tanto a variabilidade quanto a dependência espacial entre as observações.

Conforme Journel e Huijbregts (1978), uma variável regionalizada é definida como uma função $f(x)$, que assume um valor específico em cada ponto x , descrito por coordenadas (x_1, x_2, \dots, x_n) em um espaço \mathbb{R}^n , onde $n = 1, 2, 3$. Assim, destaca-se a importância de compreender não apenas os valores pontuais da variável, mas também as relações espaciais entre eles — aspecto essencial na modelagem geoestatística.

A análise do variograma experimental da variável **Nspt3m**, obtida a partir das sondagens, permitiu o ajuste de um modelo teórico, representado por uma curva (em vermelho, nos gráficos), sobreposta aos valores experimentais (representados por pontos em forma de estrela conectados por linhas azuis). Esse gráfico expressa a variabilidade espacial da variável em função da distância, sendo peça fundamental no processo de interpolação por krigagem.

A análise direcional dos variogramas permite verificar a presença de anisotropia, isto é, se o grau de correlação espacial da variável transformada varia de acordo com a direção do espaço geográfico. Em um campo isotrópico, a estrutura de dependência espacial (alcance, patamar e efeito pepita) deveria ser semelhante em todas as direções.

A verificação da isotropia espacial é uma etapa fundamental na modelagem geoestatística, uma vez que o uso de modelos isotrópicos pressupõe que a estrutura de dependência espacial da variável seja semelhante em todas as direções. Quando essa suposição não é válida, é necessário adotar modelos anisotrópicos, ajustando o alcance e a semivariância de acordo com a direção do espaço.

3.3.3 Validação de modelos

Na etapa de validação dos modelos, os dados foram divididos em dois subconjuntos: um conjunto de treinamento, utilizado para ajustar os modelos geoestatísticos, e um conjunto de teste, empregado para avaliar sua capacidade preditiva. A seguir, as estimativas de resistência do solo obtidas pelos modelos foram comparadas com os valores observados nos pontos pertencentes ao conjunto de teste.

Para mensurar o desempenho dos modelos, foram utilizadas métricas estatísticas tradicionais, como o erro médio (ME), a raiz do erro médio quadrático (RMSE), o erro médio absoluto (MAE) e o coeficiente de determinação (R^2). Essas métricas permitiram avaliar a acurácia e a robustez das estimativas, além de auxiliar na seleção do modelo mais adequado para representar a distribuição espacial da resistência do subsolo.

3.3.4 Uso de Ferramentas de Inteligência Artificial

Durante o desenvolvimento desta monografia foram utilizadas ferramentas de Inteligência Artificial (IA), em especial o *ChatGPT - 5 (OpenAI)*, como apoio técnico e redacional em diversas etapas do processo. O uso dessas ferramentas foi realizado de forma responsável, com supervisão constante do autor e revisão crítica de todos os conteúdos gerados. A seguir, detalham-se as principais formas de utilização:

Assistência na Programação

A ferramenta foi utilizada para aprimorar trechos de código em linguagem R, especialmente na definição de funções auxiliares e no uso do pacote `ggplot2`.

Apoio à Redação Científica

A IA foi empregada como recurso de apoio para melhorar a clareza e coesão de trechos técnicos, especialmente na introdução, fundamentação teórica e descrição dos métodos. Foram também sugeridas reformulações textuais para adequação ao estilo acadêmico e à norma culta da língua portuguesa. **Em todas as etapas, o uso da IA teve caráter complementar, preservando-se o protagonismo intelectual e a análise crítica por parte do autor. O conteúdo final do trabalho reflete decisões fundamentadas no conhecimento estatístico e na revisão cuidadosa das contribuições assistidas.**

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do banco de dados estruturado e com o auxílio dos programas computacionais mencionados, foi possível processar os dados e obter informações espaciais sobre o índice de resistência à penetração (N_{spt}), a tensão admissível do solo e o nível do lençol freático nos locais ensaiados.

Considerando a variável do número de golpes do ensaio de sondagem à percussão (SPT) na profundidade de 3 m (N_{spt3m}), pois, em termos de engenharia geotécnica, esse valor corresponde a um limite prático para a decisão entre a utilização de fundações rasas ou profundas.

Antes da aplicação dos métodos geoestatísticos, realizou-se uma análise exploratória da variável N_{spt3m} . O objetivo dessa etapa é avaliar a adequação estatística dos dados para a aplicação da krigagem, especialmente quanto à distribuição dos valores e à presença de outliers.

4.1 Análise Estatística

4.1.1 Análise descritiva

Nos métodos de krigagem, é recomendável que a variável de interesse apresente distribuição aproximadamente normal. Caso essa condição não seja atendida, torna-se necessário aplicar uma transformação nos dados que aproxime a distribuição da normalidade. É fundamental, contudo, que essa transformação seja invertível, permitindo a posterior reexpressão das estimativas no domínio original dos dados.

Na Tabela 4 a análise estatística da variável N_{spt3m} apresentou média de 12,51 e desvio padrão de 9,04, resultando em um coeficiente de variação (CV) de 72,26%, o que indica elevada dispersão dos dados. A assimetria foi positiva (1,40), sugerindo uma distribuição assimétrica à direita, enquanto a curtose foi de 2,28, valor próximo ao de uma distribuição mesocúrtica.

Tabela 4 – Análise descritiva da variável geotécnica.

Variável	Média	Mediana	Moda	Desv. Padrão	CV (%)	Mín.	Máx.	Assim.	Curt.
N_{spt3m}	12,51	10	10	9,04	72,26	1	52	1,40	2,28

Fonte:Elaborado pela autora.

Após a transformação, a variável passou a apresentar uma distribuição mais próxima da normalidade, condição importante para a aplicação dos métodos de krigagem, uma vez que

estes assumem, preferencialmente, variáveis aproximadamente normais. Essa transformação é *invertível*, o que garante que as estimativas obtidas no domínio transformado possam ser reexpressas para o domínio original dos dados, preservando a interpretação prática dos resultados.

Na Tabela 5 a análise estatística da variável transformada apresentou média de **2,39** e desvio padrão de **0,68**, resultando em um coeficiente de variação (CV) de **28,68%**, o que indica uma dispersão considerada baixa em relação à média. A assimetria foi negativa (**-0,26**), sugerindo uma distribuição levemente assimétrica à esquerda, enquanto a curtose foi de **2,75**, valor próximo ao de uma distribuição mesocúrtica.

Tabela 5 – Análise descritiva da variável geotécnica após a transformação logarítmica dos dados.

Variável	Média	Mediana	Moda	Desv. Padrão	CV (%)	Mín.	Máx.	Amplitude	Assim.	Curt.
Variável X	2,39	2,40	2,40	0,68	28,68	0,69	3,97	3,28	-0,26	2,75

Fonte: Elaborado pela autora.

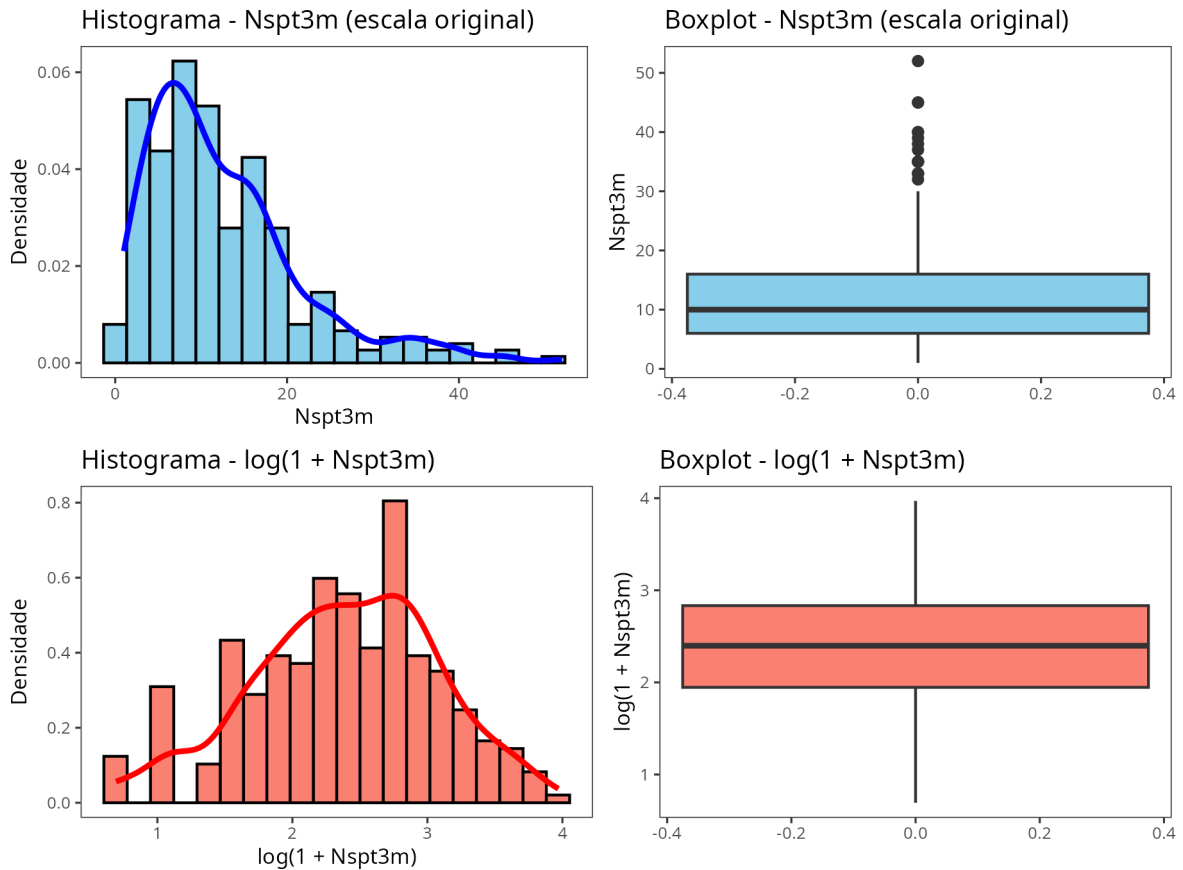
A comparação dos valores estatísticos obtidos com as faixas de ajuste da distribuição lognormal (Tabela 2) revelou que os dados originais não atendem ao critério de lognormalidade. A assimetria foi positiva e elevada (1,40), acima do limite máximo recomendado (0,4), enquanto a curtose (2,28) ficou abaixo do intervalo estabelecido (2,4 a -3,7). Conseqüentemente, a razão Curtose/Assimetria ($\approx 1,63$) apresentou valor bastante inferior ao intervalo de referência (4,5 a -6,0). Esses resultados indicam que os dados não transformados não podem ser ajustados a uma distribuição lognormal.

Após a aplicação da transformação logarítmica, observou-se melhora nos resultados: a curtose apresentou valor de 2,75, dentro da faixa de ajuste (2,4–3,7). Entretanto, a assimetria tornou-se negativa ($-0,26$), permanecendo fora do intervalo recomendado (0,0 a -0,4), o que inviabilizou o cálculo da razão Curtose/Assimetria. Dessa forma, embora a transformação tenha aproximado os dados da distribuição lognormal, as condições estabelecidas pela literatura não foram plenamente satisfeitas.

Na Figura 5, observa-se o histograma e o boxplot da variável Nspt3m em sua escala original e na escala logarítmica. A distribuição apresenta forte assimetria positiva, com concentração de valores entre 0 e 20, além de uma cauda longa à direita. O boxplot confirma a assimetria, com a mediana deslocada para a parte inferior da caixa e presença de diversos valores extremos, alguns superiores a 50 golpes. Essa assimetria foi confirmada pelo teste de Cramér–von Mises, que resultou em $\omega^2 = 1.2865$ e valor- $p = 0,0005$, indicando rejeição da hipótese nula de normalidade ao nível de 5%. Essa característica indica que a variável, em

sua forma original, não atende a recomendação dos dados serem aproximadamente normais recomendado por métodos como a krigagem ordinária.

Figura 5 – Boxplot e histograma da variáveis $Nspt3m$ na escala original e na escala logarítmica.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com o intuito de corrigir essa assimetria e estabilizar a variância, aplicou-se a transformação logarítmica natural do tipo $\log(1 + Nspt3m)$, que mantém a escala dos valores não nulos e permite reversão posterior. Após a transformação, o histograma revela uma distribuição mais simétrica, com formato próximo ao de uma curva normal. O boxplot da variável transformada mostra redução substancial dos outliers e centralização da mediana, reforçando a melhoria na distribuição, conforme demonstrado nos gráficos da Figura 5. O mesmo teste aplicado aos dados transformados resultou em $\omega^2 = 0,1461$ e valor- $p = 0,402$, não rejeitando ao nível de 5% a hipótese de normalidade.

Portanto, conclui-se que a aplicação da transformação logarítmica mostrou-se adequada neste caso, uma vez que promove aproximação à normalidade, reduz a influência de valores extremos e contribui para a estabilidade estatística dos modelos geoestatísticos subsequentes. A interpolação por krigagem será, portanto, realizada sobre os valores transformados,

com posterior retorno à escala original por meio da função exponencial.

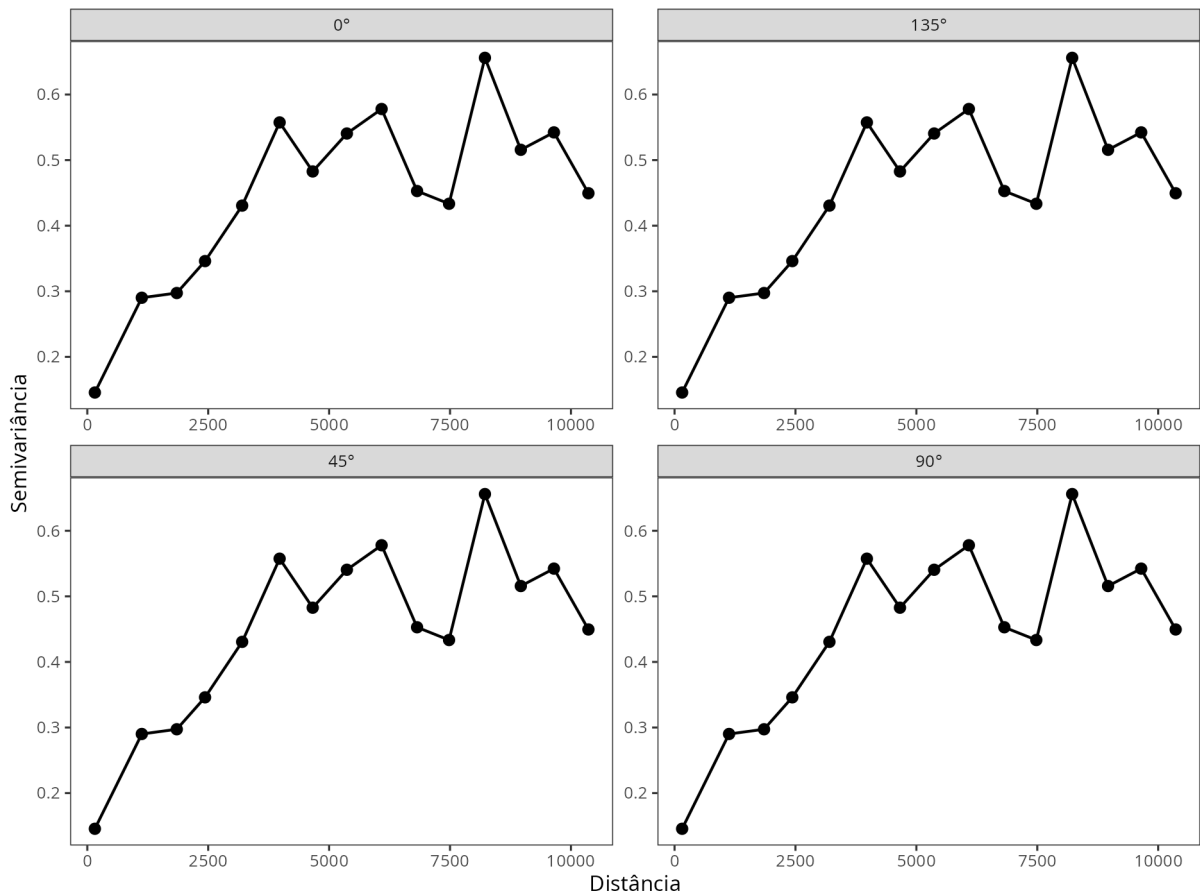
4.2 Análise Geoestatística

4.2.1 Análise Direcional do Variograma

Para investigar a presença de *anisotropia* na variável $\log(1 + N_{spt3m})$, foram construídos **variogramas experimentais em quatro direções principais: 0°, 45°, 90° e 135°**.

A Figura 6 apresenta os gráficos resultantes dessa análise.

Figura 6 – Variogramas experimentais da variável $\log(1 + N_{spt3m})$ nas direções 0°, 45°, 90° e 135°.



Fonte: Elaborado pela autora.

De modo geral, os variogramas experimentais nas diferentes direções exibem comportamentos bastante similares, com crescimento da semivariância até atingir um patamar relativamente constante a partir de aproximadamente 7.500 a 9.000 metros. O **alcance** e o **patamar** são comparáveis entre os quatro gráficos, assim como o **efeito pepita** (nível da semivariância no início), indicando que a variabilidade dos dados no nível local também é semelhante em todas as direções.

Não se observa nenhuma direção com comportamento marcadamente distinto em termos de forma, amplitude ou estrutura de correlação. As pequenas flutuações nos valores de semivariância em distâncias maiores (acima de 6.000 metros) são esperadas devido à menor quantidade de pares de pontos utilizados nesses intervalos, não sendo suficientes para indicar a presença de anisotropia sistemática.

Dessa forma, com base nessa evidência visual, conclui-se que não há indícios relevantes de anisotropia geométrica ou zonal na variável estudada. Assim, opta-se pela adoção de um modelo isotrópico de variograma para a etapa subsequente de interpolação via krigagem ordinária, o que simplifica o processo e mantém a consistência com as suposições do modelo.

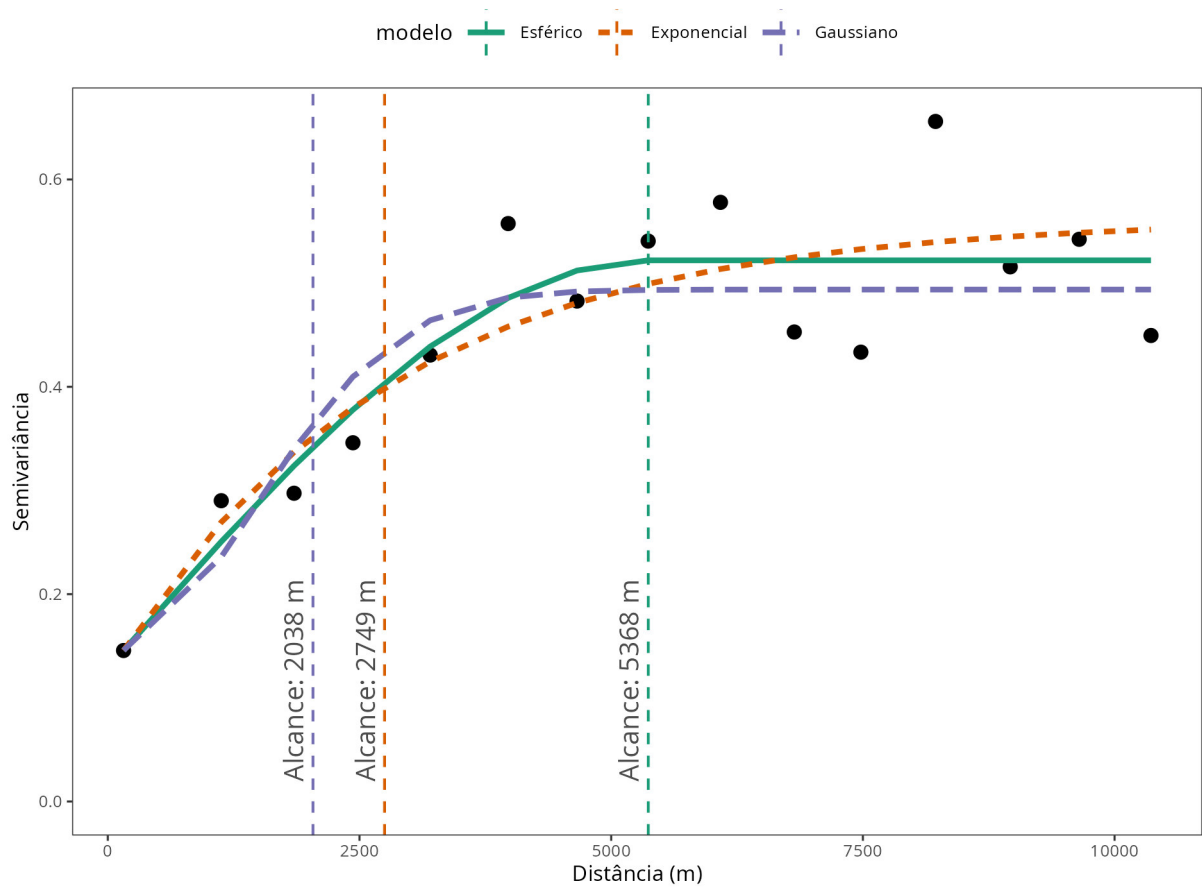
4.2.2 Ajuste de Modelo Teórico ao Variograma Experimental

A Figura 7 apresenta o variograma experimental da variável transformada $\log(1 + Nspt3m)$, juntamente com os ajustes dos modelos teóricos esférico, exponencial e gaussiano. Esses modelos têm como objetivo capturar a estrutura de dependência espacial da variável em análise, elemento fundamental para a etapa de interpolação geoestatística via krigagem.

O variograma experimental evidencia um comportamento típico de fenômenos espaciais naturais: crescimento da semivariância com o aumento da distância entre os pontos, até atingir um platô (sill), indicando a perda de autocorrelação espacial. Esse comportamento é particularmente bem representado pelo modelo esférico, o qual mostra um crescimento consistente da semivariância até cerca de 5300 metros, onde se estabiliza.

O modelo esférico apresentou o melhor ajuste visual ao variograma experimental. Esse modelo é caracterizado por uma função que cresce de forma suave até atingir o patamar, refletindo adequadamente a ideia de que pontos próximos possuem valores mais similares entre si, e que essa similaridade se reduz progressivamente até certo limite espacial (alcance). Esse limite foi estimado em 5368 metros, valor que define a distância máxima até a qual se observa dependência espacial significativa.

Figura 7 – Ajuste de Modelos Teóricos ao Variograma Experimental.



Fonte: Elaborado pela autora.

Já o modelo exponencial apresentou um crescimento mais gradual e contínuo da semivariância, sem atingir claramente o patamar observado no experimental, o que pode levar à superestimação da semivariância em longas distâncias. Seu alcance efetivo foi estimado em 2749 metros, inferior ao do modelo esférico, o que pode limitar sua capacidade de captar relações espaciais mais distantes.

Por outro lado, o modelo gaussiano apresentou um crescimento muito rápido no início, estabilizando precocemente a semivariância por volta dos 2000 metros, o que levou à subestimação da semivariância em médias e longas distâncias. Esse comportamento pode ser inadequado quando se deseja representar fenômenos com continuidade espacial média ou longa, como é o caso da variável em estudo.

A Tabela 6 resume os parâmetros ajustados de cada modelo. O efeito pepita (*nugget*) foi relativamente baixo em todos os casos, indicando uma baixa variabilidade aleatória ou erro de medição. O patamar total (soma de *nugget* e *sill parcial*) foi semelhante entre os modelos, variando entre 0,49 e 0,56, mas o alcance estimado variou significativamente, sendo maior no modelo esférico.

O modelo exponencial apresentou o maior *sill* total (0,5618), indicando que conseguiu captar a maior variabilidade dos dados em relação aos outros modelos. Seu alcance foi intermediário (2749 m), sugerindo uma dependência espacial de médio porte, maior que a indicada pelo modelo gaussiano, mas menor que a do modelo esférico. O *nugget* relativamente baixo (0,1212) reforça que o modelo consegue explicar de forma consistente a estrutura espacial observada.

Tabela 6 – Parâmetros ajustados dos modelos de variograma.

Modelo	Nugget	Sill total	Alcance (m)
Esférico	0,1285	0,5220	5368
Exponencial	0,1212	0,5618	2749
Gaussiano	0,1437	0,4938	2038

Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, a análise visual dos variogramas experimentais, com a sobreposição dos modelos teóricos ajustados, permitiu uma primeira verificação da aderência entre os dados observados e o comportamento previsto pelos modelos. Como essa inspeção não substitui as métricas quantitativas de validação, os ajustes realizados serão comparados por meio de validação cruzada, conforme abordado nos itens a seguir.

4.2.3 Validação Cruzada (Cross-Validation)

A Tabela 7 apresenta os resultados da validação cruzada tipo *leave-one-out* (LO-OCV) para os modelos de variograma esférico, exponencial e gaussiano, ajustados à variável transformada $\log(1 + Nspt3m)$. O *Erro Médio* (ME) foi próximo de zero em todos os modelos, o que indica ausência de viés sistemático nas previsões. No entanto, ao considerar métricas de erro como o MAE e o RMSE, bem como o pseudo R^2 , observa-se que o modelo exponencial apresentou o melhor desempenho preditivo.

Especificamente, o modelo exponencial apresentou o menor MAE (0,279) e RMSE (0,370), além do maior pseudo R^2 (0,714), o que indica maior precisão nas estimativas geradas e maior capacidade explicativa da variabilidade espacial dos dados. Apesar de o modelo esférico ter apresentado um ajuste visual mais aderente ao variograma experimental, os resultados quantitativos da validação cruzada indicam que o modelo exponencial é mais eficiente para fins de krigagem. Por outro lado, o modelo gaussiano obteve os piores resultados em todas as métricas analisadas, sendo, portanto, o menos indicado para este contexto.

Tabela 7 – Resultados da validação cruzada (LOOCV) para os modelos de variograma ajustados à variável $\log(1 + N_{spt3m})$.

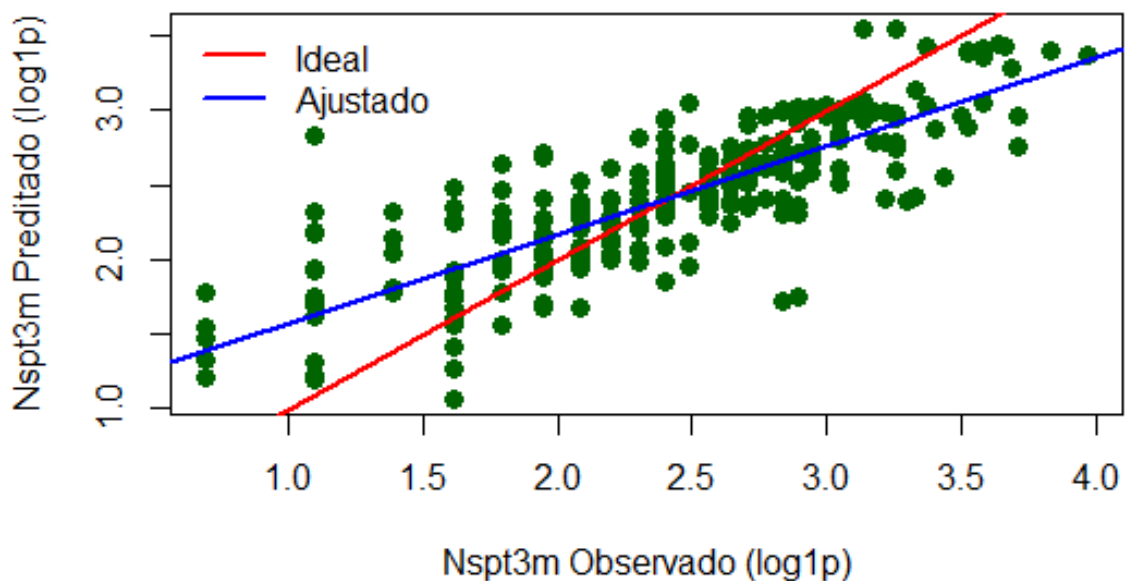
Modelo	Erro Médio (ME)	MAE	RMSE	Pseudo R ²
Esférico	-0,0056	0,291	0,386	0,687
Exponencial	-0,0060	0,279	0,370	0,714
Gaussiano	-0,0060	0,341	0,458	0,551

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.4 Validação Cruzada - modelo exponencial

A Figura 8 apresenta o gráfico de validação cruzada da krigagem ordinária com modelo exponencial, onde os valores observados de N_{spt} a 3 metros de profundidade (eixo x) são comparados aos valores preditos pelo modelo (eixo y).

Figura 8 – Validação Cruzada - Exponencial.



Fonte: Elaborado pela autora.

A linha vermelha representa a condição ideal, ou seja, a situação em que os valores preditos coincidiriam exatamente com os valores observados, sendo usada como referência de predição perfeita. Já a linha azul mostra a reta de regressão ajustada aos dados obtidos por validação cruzada e expressa a tendência geral entre os valores observados e preditos na escala transformada. Quanto mais próxima essa linha estiver da linha ideal, melhor é o desempenho do modelo na escala logarítmica. Os pontos verdes correspondem aos pares de valores observados e preditos transformados, e sua dispersão em torno da linha vermelha revela a magnitude e o padrão dos erros de predição. A concentração dos pontos ao longo da linha azul indica a qualidade do ajuste do modelo.

A análise do gráfico mostra que o modelo de krigagem com variograma exponencial apresenta um desempenho consistente na escala transformada. A reta ajustada possui uma tendência linear crescente e razoavelmente próxima da linha ideal, sugerindo que o modelo é capaz de capturar a estrutura espacial da variável $\log(1 + N_{spt3m})$ com boa precisão.

Entretanto, observa-se certa dispersão dos pontos, especialmente nos extremos da escala. Na porção inferior (valores transformados mais baixos), há indícios de superestimação, enquanto na porção superior (valores mais altos), nota-se uma leve subestimação, evidenciada pelos pontos abaixo da linha ideal. Esses desvios podem estar relacionados à variabilidade espacial local ou à limitação da transformação logarítmica na preservação de diferenças em valores extremos.

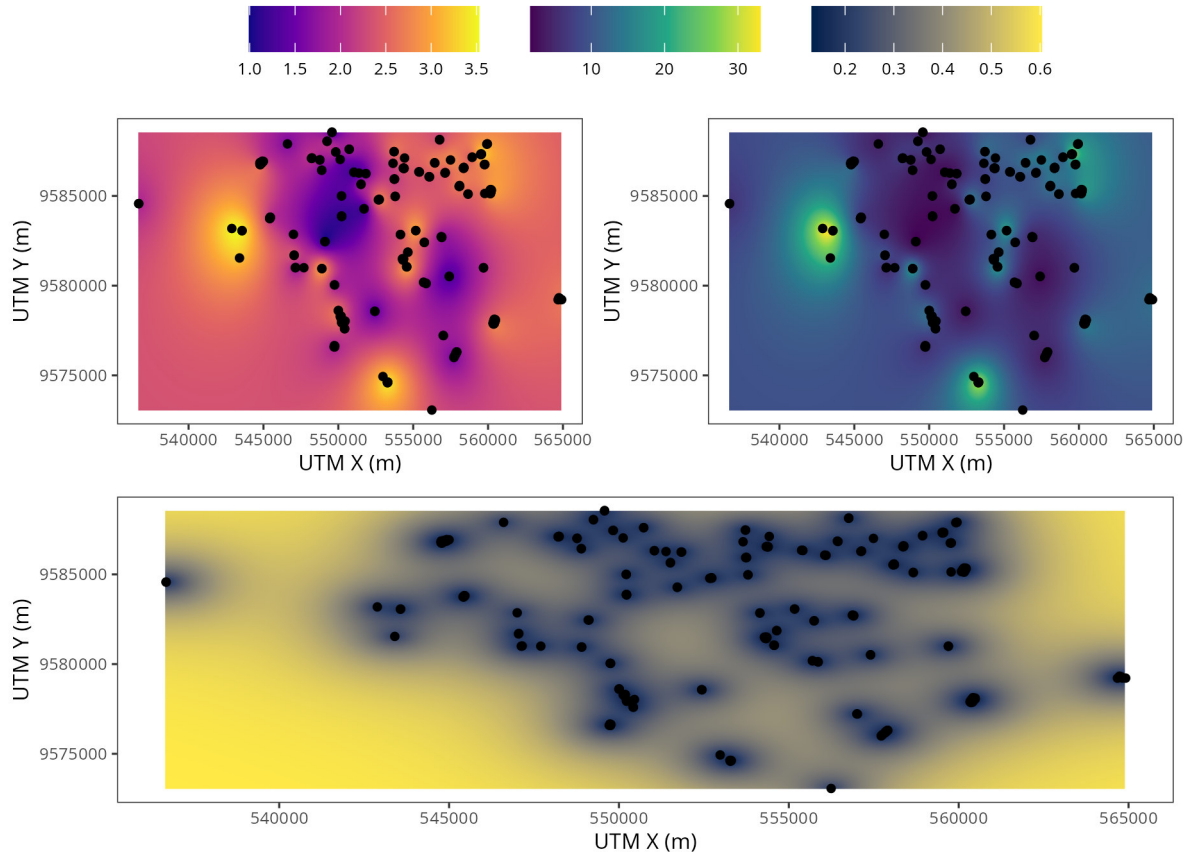
Em síntese, o modelo apresenta um ajuste satisfatório e estatisticamente coerente com os dados transformados, sendo adequado para aplicações exploratórias em análises geoestatísticas. A utilização da transformação logarítmica contribui para estabilizar a variância e melhorar a distribuição dos resíduos, favorecendo uma modelagem mais robusta.

4.2.5 Interpolação Espacial por Krigagem

A Figura 9 apresenta os resultados da krigagem ordinária da variável N_{spt} , usada como medida da resistência do solo até 3 metros de profundidade. O mapa à esquerda mostra a interpolação realizada na escala transformada $\log(1 + N_{spt3m})$, que foi utilizada para ajuste do modelo geoestatístico. À direita, observa-se a retransformação para a escala original (N_{spt}), que facilita a interpretação técnica dos resultados. Por fim, o mapa inferior apresenta a variância da predição, evidenciando maior incerteza nas regiões periféricas ou distantes dos pontos amostrados, o que reforça a importância da densidade amostral para garantir precisão espacial

nas estimativas.

Figura 9 – Krigagem Ordinária ($\log(1 + N_{spt3m})$) - topo a esquerda e Krigagem Ordinária (N_{spt3m} - escala original) - no topo a direita e Variância da Krigagem Ordinária - parte inferior.



Fonte: Elaborado pela autora.

A variância associada à predição, calculada no espaço transformado $\log(1 + N_{spt3m})$, variou entre aproximadamente 0,03 e 0,6, conforme ilustrado na Figura 9. Esse resultado evidencia que a incerteza associada à interpolação foi significativamente menor nas regiões próximas aos pontos de sondagem e mais elevada nas áreas periféricas, onde há escassez de dados observacionais. Tal padrão é consistente com o comportamento esperado da krigagem, uma vez que a confiabilidade das estimativas decai à medida que aumenta a distância dos pontos amostrados.

Na Figura 9, observa-se o mapa preditivo da variável N_{spt3m} , obtido por meio da técnica de krigagem ordinária, aplicada aos dados de campo. A interpolação foi realizada com base nos pontos amostrados, gerando uma superfície contínua que estima os valores de resistência à penetração em toda a área de estudo.

O mapa utiliza uma escala contínua de cores, na qual os tons mais escuros indicam

valores mais baixos de N_{SPT} associados a solos menos resistentes ou mais fofos e os tons mais claros correspondem a valores mais elevados, representando solos mais compactos ou consistentes.

Apesar que o mapa não estar dividido em faixas discretas, a variação interpolada abrange valores típicos de interpretação geotécnica, permitindo uma leitura qualitativa conforme a seguinte referência:

- Menor que 10 – solo fofo ou com baixa resistência;
- Entre 10 e 20 – solo com resistência média;
- Acima de 20 – solo resistente ou muito resistente.

4.2.6 Análise dos Resultados Espaciais

A Figura 10 apresenta a carta geotécnica de Fortaleza - Ce referente à resistência do solo a 3,0 metros de profundidade, expressa em termos do número de golpes do ensaio de Sondagem à Percussão (SPT). Os dados foram interpolados por meio da técnica de krigagem ordinária, com base em um modelo geoestatístico ajustado ao variograma experimental, permitindo a representação contínua da variabilidade espacial do parâmetro N_{spt} em toda a área urbana do município.

Observa-se que a classificação dos valores de N_{spt} foi organizada em faixas representativas de resistência relativa, conforme a legenda do mapa. As zonas em que predominam valores de $N_{spt} \leq 10$ golpes (tons de vermelho e laranja escuro) concentram-se, sobretudo, em áreas centrais e no setor oeste de Fortaleza. Esses resultados indicam a ocorrência de solos de baixa resistência e elevada compressibilidade, que demandam soluções de fundações mais profundas ou técnicas de melhoramento do solo, sobretudo em regiões sujeitas a edificações de maior porte.

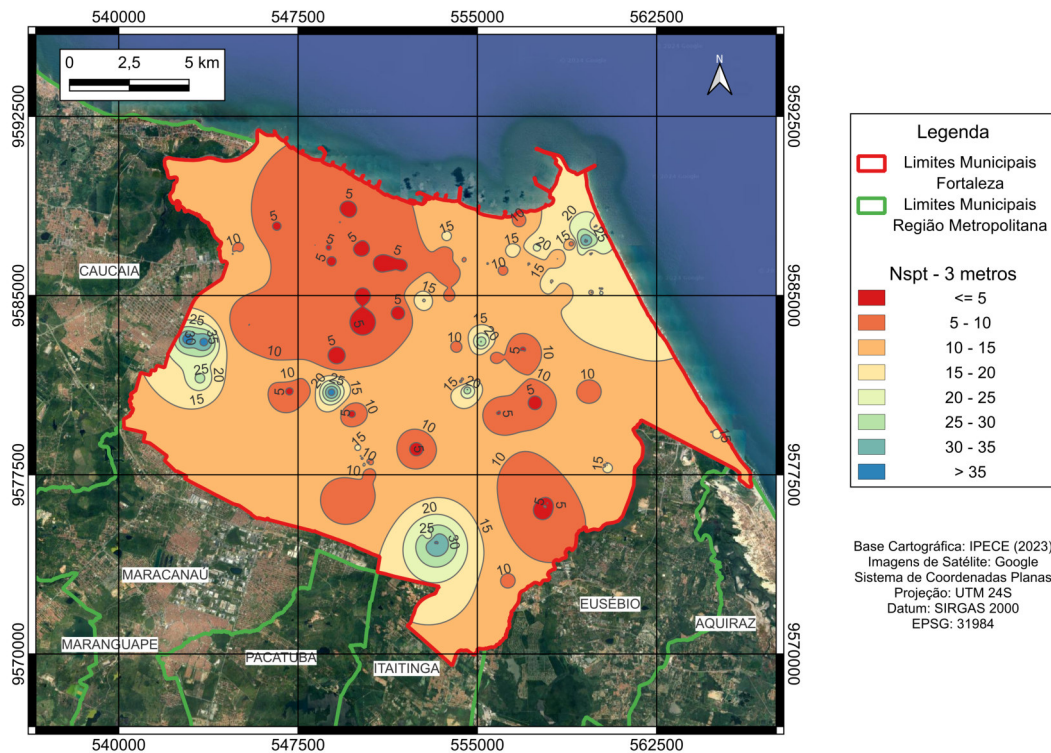
Nas áreas em que o N_{spt} varia entre 10 e 25 golpes (tons de laranja claro e amarelo), observa-se uma predominância intermediária de resistência, característica de solos que, em determinadas condições de carga, podem viabilizar fundações diretas rasas, desde que acompanhadas de análises detalhadas de projeto e controle tecnológico rigoroso. Essas faixas configuram transições importantes na carta, representando solos mais heterogêneos e de comportamento variável em função da litologia local.

Por fim, as regiões em que o N_{spt} ultrapassa 25 golpes (tons de verde a azul), embora pontuais, destacam áreas com solos mais compactos e competentes, favoráveis à execução de

fundações superficiais com maior segurança e economia. Tais zonas funcionam como referências estratégicas para o planejamento urbano, uma vez que oferecem maior capacidade de suporte e menor risco de recalques diferenciais.

As isolinhas de Nspt, traçadas como contornos de valores iguais, permitem identificar os gradientes de resistência e a variabilidade espacial do solo, evidenciando zonas de transição abrupta e regiões mais homogêneas. Esse recurso gráfico é fundamental para a compreensão da distribuição geotécnica do subsolo, possibilitando o delineamento de áreas de maior ou menor restrição para ocupação urbana e infraestrutura.

Figura 10 – Isovalor de NSPT na profundidade de 3 m.



Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, a presente carta geotécnica não apenas sintetiza os resultados da interpolação espacial, mas também constitui um instrumento de apoio ao planejamento urbano e à engenharia geotécnica, fornecendo subsídios para a tomada de decisão quanto ao dimensionamento seguro e econômico das fundações em Fortaleza - Ce.

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados alcançados evidenciam o potencial das técnicas estatísticas e geoestatísticas na análise de dados geotécnicos, mesmo diante de desafios como a densidade amostral limitada e a heterogeneidade do subsolo urbano. A metodologia adotada mostrou-se robusta e eficaz como ferramenta de apoio à engenharia civil, contribuindo para o planejamento urbano e a mitigação de riscos.

Inicialmente, a análise descritiva dos dados permitiu identificar padrões, tendências e anomalias da variável N_{spt} , revelando assimetria positiva nos dados e motivando a aplicação de uma transformação logarítmica para melhorar o ajuste à distribuição lognormal. Essa etapa demonstrou ser fundamental para caracterizar estatisticamente a variabilidade local dos dados geotécnicos, fornecendo uma visão da heterogeneidade intrínseca dos valores observados, sem considerar sua posição espacial.

Do ponto de vista prático, a assimetria positiva indicou que os valores mais frequentes de resistência à penetração são baixos a moderados, com a ocorrência pontual de valores elevados. Esse comportamento revela a heterogeneidade do subsolo da cidade de Fortaleza, com presença de solos predominantemente menos resistentes, intercalados por zonas pontuais de maior compacidade, o que demanda atenção especial no planejamento de fundações e infraestrutura urbana.

Na etapa de modelagem geoestatística, foi possível aplicar a teoria das variáveis regionalizadas e ajustar diferentes modelos teóricos de variograma. Dentre os modelos testados, o exponencial foi o que apresentou melhor desempenho com base nas métricas de validação cruzada. Diferentemente da análise descritiva, a modelagem geoestatística permitiu quantificar a dependência espacial entre as observações, fornecendo informações sobre como a semelhança entre os dados se altera conforme a distância.

Na prática, o modelo exponencial indicou que a resistência do solo apresenta um padrão de variação contínua, com elevada semelhança entre pontos próximos e uma redução progressiva dessa semelhança à medida que a distância aumenta. Esse comportamento é coerente com a natureza geotécnica dos solos urbanos, nos quais as propriedades do subsolo variam de forma gradual, permitindo estimativas mais confiáveis em regiões não amostradas e subsidiando decisões técnicas mais embasadas para obras de engenharia.

A aplicação da krigagem ordinária com o modelo de variograma selecionado possibilitou a geração de mapas preditivos da resistência do subsolo a 3 metros de profundidade.

Esses mapas forneceram uma visualização contínua da distribuição espacial da capacidade de suporte do solo em Fortaleza, revelando que grande parte da área urbana é composta por solos de resistência intermediária.

Como continuidade deste trabalho, pretende-se elaborar um artigo científico para divulgação dos resultados. Também se recomenda, como desdobramento futuro, a ampliação da base de dados geotécnicos para outras profundidades e regiões da cidade, bem como a integração com variáveis complementares (como tipo de solo ou nível d'água), de modo a enriquecer os modelos e os mapas gerados.

REFERÊNCIAS

- ABGE. **Manual de Sondagens**. 4. ed. ed. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1999. 73 p. ISBN 85-7270-003-X.
- BARDOSSY, A. Robust estimation of variograms. **Mathematical Geology**, v. 20, n. 2, p. 201–225, 1988.
- BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.
- COSTA, J. F. C. L.; YAMAMOTO, J. K. **Geoestatística aplicada**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- CRESSIE, N. **Statistics for Spatial Data**. [S. l.]: Wiley, 1993.
- CRESSIE, N.; HAWKINS, D. M. Robust estimation of the variogram. **Mathematical Geology**, v. 12, n. 2, p. 115–125, 1980.
- DAVIS, J. **Statistics and Data Analysis in Geology**. 2nd. ed. [S. l.]: John Wiley and Sons, 1986.
- DÉCOURT, L.; QUARESMA, A. R. Capacidade de carga de fundações diretas. In: ABMS. **2º Simpósio de Solos Tropicais**. Rio de Janeiro, 1978.
- FONTELES, H. R. da N. **Caracterização geotécnica do subsolo da porção nordeste do município de Fortaleza (CE) com base em geoestatística**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- GEOLOGIC GEOTECNICA LTDA. **Relatório técnico ou comunicação pessoal**. Rua Zeza Pontes, 77, Luciano Cavalcante - Fortaleza/CE, CEP 60811-220: [S. n.], 2025. Fone: (85) 98510-4845, E-mail: raimundogeologia@gmail.com.
- GOOVAERTS, P. **Geostatistics for Natural Resources Evaluation**. [S. l.]: Oxford University Press, 1997.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas da população residente nos municípios brasileiros – data de referência 1º de julho de 2024**. 2024. Rio de Janeiro: IBGE. Fortaleza: 2574412 habitantes.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. [S. l.]: Oxford University Press, 1989.
- JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining Geostatistics**. London: Academic Press, 1978.
- JOURNEL, A. G.; ROSSI, M. E. When do we need a trend model in kriging? **Mathematical Geology**, v. 21, n. 7, p. 715–739, 1989.
- JR., J. F. H.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. **Análise Multivariada de Dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2. ed. [S. l.]: Editora UNESP, 2003. 254 p.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, p. 1246–1266, 1963.

- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to Linear Regression Analysis**. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
- Odebrecht. **Manual de Fundações**. Salvador: Odebrecht, 2003.
- PEARSON, E.; HARTLEY, H. **Biometrika Tables for Statisticians**. [S. l.]: Cambridge University Press, 1976.
- PEARSON, E. S.; HARTLEY, H. O. **Biometrika Tables for Statisticians**. Cambridge: Cambridge University Press, 1966.
- PIMENTEL, H. W.; MOURA, A. S.; CARNEIRO, A. d. A. Proposta de uma carta geotécnica preliminar de fundações para a região centro-norte de fortaleza-ce. **Revista de Geociências do Nordeste**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 83–90, 2020.
- PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- PRESTON, D. **FORTTRAN IV Program for Sample Normality Tests**. [S. l.], 1970.
- QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System (versão 3.34.2)**. [S. l.], 2023. Software de geoprocessamento livre. Disponível em: <https://www.qgis.org>.
- R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.
- RENDU, J.-M. **An Introduction to Geostatistical Methods of Mineral Evaluation**. Johannesburg: Institute of Mining and Metallurgy, 1978. 83 p.
- RODRIGUES, J. E.; FILHO, E. E. S.; LIMA, A. M. M. Modelagem geoestatística aplicada à geologia de engenharia. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 73, n. 1, p. 33–44, 2015. ISSN 0067-964X. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/geociencias/article/view/43417>.
- SCHNAID, F. **Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2000.
- SIEGEL, S. **Estatística Não-Paramétrica para as Ciências do Comportamento**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.
- SPIEGELHALTER, D. **A arte da estatística: como aprender a partir de dados**. Rio de Janeiro: Zahar, 2022.
- TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- VALENTE, J. **Geomatemática - Lições de Geoestatística**. 2. ed. Ouro Preto: Editora da Fundação Gorceix, 1989.
- VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: Teoria e Prática**. 8. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.
- YAMAMOTO, J. K. An alternative measure of the reliability of ordinary kriging estimates. **Mathematical Geology**, v. 32, n. 4, p. 489–509, 2000.
- YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. M. **Geoestatística – conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215 p.

APÊNDICE A – KRIGAGEM ORDINÁRIA

```

1  g <- gstat(id="Nspt3m", formula = logNspt3m ~ x+y, data = Dados
    _SPT);g
2  data:
3  Nspt3m : formula = logNspt3m`~`x + y ; data dim = 281 x 8
4  > variog <- gstat::variogram(g)
5  > variog
6      np      dist      gamma dir.hor dir.ver      id
7  1  1537   156.5187 0.1457488      0      0 Nspt3m
8  2   555  1126.6958 0.2834081      0      0 Nspt3m
9  3  1026  1849.9821 0.2993748      0      0 Nspt3m
10 4  1133  2434.7255 0.3395324      0      0 Nspt3m
11 5  1569  3202.1765 0.4073622      0      0 Nspt3m
12 6  1517  3976.5890 0.5330096      0      0 Nspt3m
13 7  1723  4660.7352 0.4796664      0      0 Nspt3m
14 8  2007  5367.4251 0.5240114      0      0 Nspt3m
15 9  2272  6085.2616 0.5817852      0      0 Nspt3m
16 10 2605  6818.6730 0.4194396      0      0 Nspt3m
17 11 2322  7479.9265 0.4266649      0      0 Nspt3m
18 12 1876  8221.7146 0.6029893      0      0 Nspt3m
19 13 2039  8963.5969 0.4667193      0      0 Nspt3m
20 14 2347  9648.4008 0.4498593      0      0 Nspt3m
21 15 2243 10361.5376 0.3871010      0      0 Nspt3m

```

```

1 > ### krigagem dados transformados
2 > kriging_result = krige(logNspt3m ~1,Dados_SPT,grd,model=
  fitted_model)
3 [using ordinary kriging]
4 > kriging_result
5 class      : SpatialPointsDataFrame
6 features   : 43865
7 extent     : 536668, 564868, 9573067, 9588467 (xmin, xmax,
  ymin, ymax)
8 crs       : +proj=utm +zone=24 +south +ellps=GRS80 +units=m +
  no_defs
9 variables  : 2
10 names     :          var1.pred,          var1.var
11 min values : 1.06313968361009, 28.2757467328631
12 max values : 3.43034077894705, 73.8083922638463

```

```

1 > fit.variogram(vg_exp, model = vgm("Exp"))
2   model    psill    range
3 1  Nug 0.1212456    0.000
4 2  Exp 0.4405309 2748.996
5 > fit.variogram(vg_sph, model = vgm("Sph"))
6   model    psill    range
7 1  Nug 0.1285220    0.000
8 2  Sph 0.3934561 5368.211
9 > fit.variogram(vg_gau, model = vgm("Gau"))
10  model    psill    range
11 1  Nug 0.1437043    0.000
12 2  Gau 0.3500780 2038.027

```

APÊNDICE B – VALIDAÇÃO CRUZADA

```
1 > crossval_exp
2 class      : SpatialPointsDataFrame
3 features   : 281
4 extent     : 536668, 564916, 9573067, 9588560 (xmin, xmax,
           ymin, ymax)
5 crs        : +proj=utm +zone=24 +south +ellps=GRS80 +units=m +
           no_defs
6 variables  : 6
7 names      :      var1.pred,      var1.var,
           observed,      residual,      zscore, fold
8 min values : 1.05751578939535, 27.0778633850695, 0.693147180559
           945, -1.68934740082753, -0.285798748341205, 1
9 max values : 3.47052708477949, 91.4179659623621, 3.97029191355
           212, 0.970522025829955, 0.176902489708065, 10
```

ANEXO A – RELATÓRIO

Figura 11 – Relatório de Sondagem



1: INTRODUÇÃO

Apresento o relatório de execução de 01 (um) furo de sondagem a percussão, em um terreno localizado na Rua Rocha Lima, 849, Aldeota – Fortaleza/CE.

2: SONDAGEM A PERCUSSÃO

Para a realização da sondagem, ensaios e caracterização de materiais foram seguidas as normas NBR 6502/95 e NBR 6484/2020 da ABNT.

A execução dos serviços de sondagem à percussão iniciou-se pelo posicionamento da torre (tripé) num ponto locado e nivelado em relação a um RN fixo e bem determinado no terreno.

O posicionamento da torre de sondagem em terra firme foi realizado, com o levantamento e o nivelamento da torre (tripé) sobre a superfície do terreno, tendo-se o cuidado de que as pernas de apoio estejam firmemente assentadas.

A perfuração foi executada por percussão com avanço à seco (avanço por meio de trado Ø4”), até a profundidade permitida pela resistência do terreno ou até que se encontrasse o nível d’água. Depois disso, a perfuração foi feita através do processo de circulação de água.

O ensaio de penetração SPT foi iniciado, com a descida das hastes, por dentro do furo, acopladas ao amostrador padrão, que foi posicionado no fundo do furo. A cabeça de bater foi conectada no topo da haste, com o peso batente apoiado sobre ela devendo ser anotada uma eventual penetração do amostrador no terreno.

O topo do tubo de revestimento de 2 1/2” de diâmetro foi usado como nível de referência, e na haste de perfuração marcou-se de forma visível (com giz), um segmento de 0,45m, dividido em três segmentos iguais de 0,15m cada um. A cravação do mostrador foi feita através de queda livre de um peso batente de 65Kg é levantado por meio de corda e sarilho, até a altura de 0,75m, marcada na haste guia do peso, de forma que os eixos longitudinais do peso batente e a composição de cravação do amostrador, estejam rigorosamente coincidentes e verticalizados, anotando-se assim separadamente o número de golpes necessários para a cravação de cada segmento de 0,15m. De acordo como definido por Terzaghi-Peck (Soil Mechanics in Engineering Practice), e normalizado pela NBR 6484, o índice de resistência a penetração, foi a soma do

AP

Figura 12 – Relatório



número de golpes necessários para cravação no solo dos 0,30m finais do amostrador Terzaghi de 34,9mm (1 3/8") e 50,8mm (2") de diâmetros interno e externo respectivamente.

Após a realização do ensaio de penetração, a composição da sondagem, composta pelas hastes e mostrador, foram retirada do subsolo através de manobra com auxílio da torre, hastes, cabo de aço, sarilho e chaves.

O amostrador bipartido foi aberto para retirada da amostra, tendo-se o cuidado de anotar uma possível mudança de material, na amostra coletada. Uma parte representativa da amostra é colocada em saco plástico próprio, etiquetado, principalmente a parte relativa ao bico do amostrador. Na etiqueta gomada utilizada consta o número do furo, o número da amostra, a profundidade, relativos a cada segmento de 0.15m.

Sempre que a penetração do amostrador se mostrou diferente de 30cm, o SPT será representado por números fracionários que indicam, no numerador, o número dos golpes, e no denominador a penetração correspondente em centímetros.

Registrou-se o "SPT" para cada metro de perfuração.

O resultado das sondagens encontra-se em perfis anexo à um relatório, juntamente com a sua Planta de localização e uma seção transversal.

2: SERVIÇOS EXECUTADOS

Para a investigação do subsolo foram feitos 01 (um) furo de sondagem a percussão, cujas profundidades seguem abaixo:

SP.01	14,23m
A profundidade total de sondagem a percussão foi de	14,23m

(Catorze metros e vinte e três centímetros)

Figura 13 – Relatório



5: CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 - Com base nos resultados das sondagens, foi preparada uma seção esquemática do subsolo, indicada no desenho n.º 01. Esta seção representa apenas o desenvolvimento provável das camadas do subsolo, constatadas somente nas verticais das sondagens, e foi elaborada visando permitir uma melhor visualização da natureza geral do subsolo local

5.2 - O nível d'água no furo de sondagem está com 9,00 metros de profundidade.

5.3 - Observando o resultado das sondagens executadas, sugere-se para a área do terreno, a seguinte fundação, abaixo descrita:

- Fundação direta em sapata quadrada, assentada na profundidade de **1,20 metros** com uma taxa de trabalho igual a **1,00 Kg/cm²**.
- Fundação indireta em estaca raiz com **15,00 metros** de comprimento
- *Torna-se necessária a presença de um técnico durante a construção das cavas de fundação, para identificar situações particulares no terreno, tais como: Zonas de aterro com lixo ou entulho, poços aterrados com entulho presença de formigueiros, ou até mesmo terreno de má qualidade de ocorrência localizada.*

6: ANEXOS

- Anexo 01 - Planta de Localização dos furos de sondagem.
- Anexo 02 - Perfil Individual dos furos de sondagem.
- Anexo 03 - Acervo fotográfico

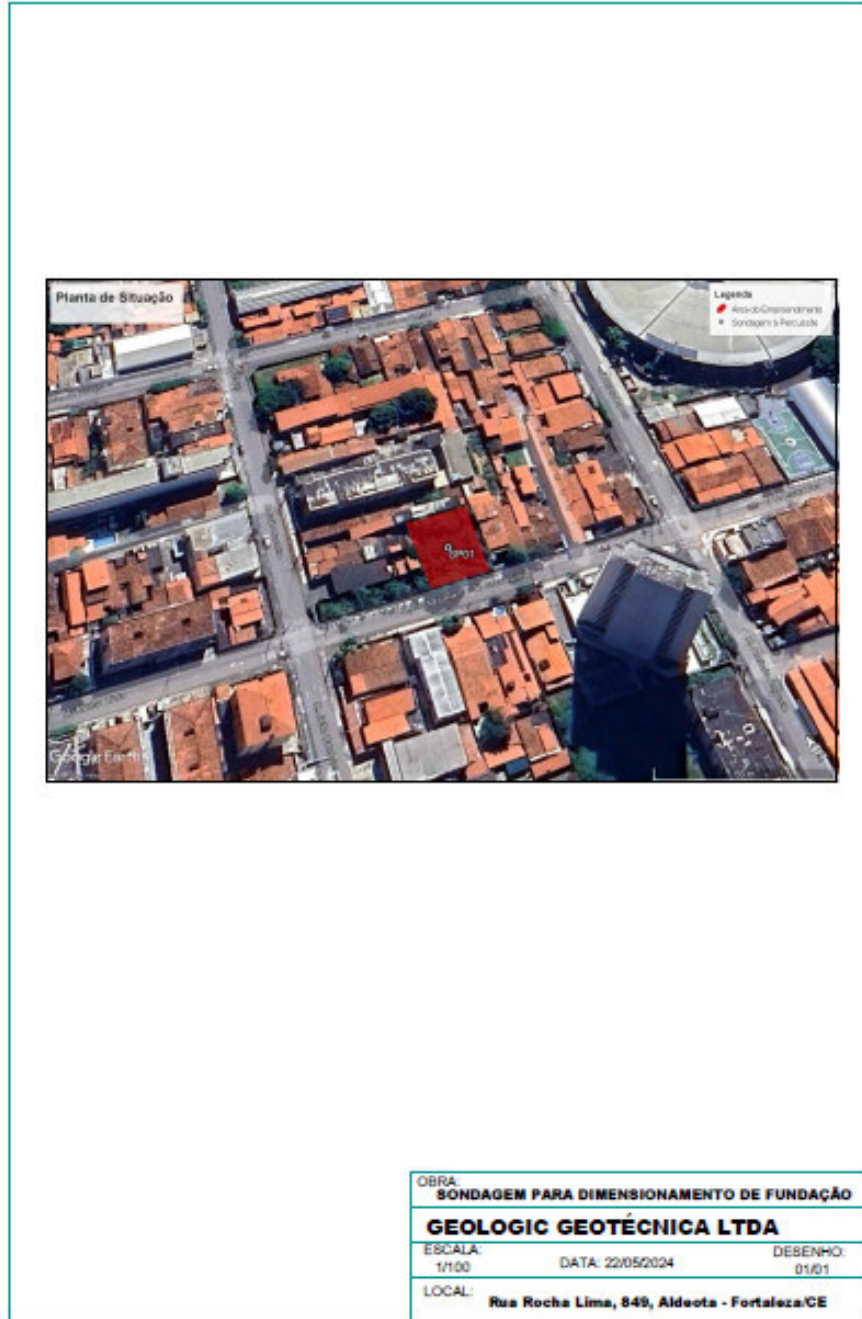
Atenciosamente

Geólogo Raimundo Correlá da Silva Neto

CREA-CE Nº 45802

ANEXO B – PLANTA DE SITUAÇÃO

Figura 14 – Planta de situação



Fonte: (GEOLOGIC GEOTECNICA LTDA, 2025)

ANEXO D – ACERVO FOTOGRÁFICO

Figura 16 – Acervo fotográfico



Foto 01 e 02: Sondagem à Percussão.



Fotos 03, 04 e 05: Amostra de solo do local.



Fonte: (GEOLOGIC GEOTECNICA LTDA, 2025)