



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS

LUIS EDUARDO FERREIRA NUNES
MATHEUS CLINTOM RAMALHO CUNHA

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE RESÍDUO SIDERÚRGICO EM MISTURAS
CIMENTÍCIAS PARA MELHORIA DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS

PALMAS – TO

2026

LUIS EDUARDO FERREIRA NUNES
MATHEUS CLINTOM RAMALHO CUNHA

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE RESÍDUO SIDERÚRGICO EM MISTURAS
CIMENTÍCIAS PARA MELHORIA DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica do Instituto Federal do
Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Doutor Antônio Marcelino da Silva
Filho

Coorientador: Esp. Matheus Gomes Arruda

PALMAS – TO

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

- C972a Cunha, Matheus Clitom Ramalho
 ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE RESÍDUO SIDERÚRGICO EM
 MISTURAS CIMENTÍCIAS PARA MELHORIA DE ATERRAMENTOS
 ELÉTRICOS / Matheus Clitom Ramalho Cunha, Luís Eduardo Ferreira
 Nunes. – Palmas, TO, 2026.
 69 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) –
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus
 Palmas, Palmas, TO, 2026.
- Orientador: Dr. Antônio Marcelino da Silva Filho
 Coorientador: Esp. Matheus Gomes Arruda
1. Sistemas de Aterramento Elétrico. 2. Resíduos Siderúrgicos. 3.
 Materiais de Melhoria de Sistemas de Aterramento Elétrico. I. Nunes, Luís
 Eduardo Ferreira. II. da Silva Filho, Antônio Marcelino III. Arruda, Matheus
 Gomes. IV. Título.

CDD 621

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

LUIS EDUARDO FERREIRA NUNES
MATHEUS CLINTOM RAMALHO CUNHA

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE RESÍDUO SIDERÚRGICO EM MISTURAS
CIMENTÍCIAS PARA MELHORIA DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica do Instituto Federal do
Tocantins, Campus Palmas.

Aprovado em: 22 / 06 / 2026

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO MARCELINO DA SILVA FILHO**
Data: 03/07/2026 17:06:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Antônio Marcelino da Silva Filho

Documento assinado digitalmente
 **HUMBERTO RODRIGUES MACEDO**
Data: 05/07/2026 07:44:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Humberto Rodrigues Macedo

Documento assinado digitalmente
 **KAISSON TEODORO DE SOUZA**
Data: 04/07/2026 11:50:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Kaison Teodoro Souza

Documento assinado digitalmente
 **MATHEUS GOMES ARRUDA**
Data: 05/07/2026 11:12:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Esp. Matheus Gomes Arruda

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradecemos a Deus por ter me concedido força, perseverança e a oportunidade de desenvolver este trabalho, que representa uma etapa muito importante em minha formação como engenheiro eletricista.

Às empresas Retífica Bandeirantes e Retífica Vitória por disponibilizarem os resíduos siderúrgicos utilizados nesta pesquisa, material que constituiu elemento fundamental para o desenvolvimento deste estudo.

À empresa Cromo Solar Energia Renovável, pelo fornecimento das hastes de cobre empregadas na construção dos sistemas de aterramento avaliados.

Ao José Ademilson dos Santos Junior, pelo auxílio prestado na disponibilização dos equipamentos utilizados na fabricação dos eletrodos e na realização dos ensaios de resistência à compressão.

Ao nosso orientador, Prof. Dr. Antônio Marcelino da Silva Filho, pela orientação, dedicação e apoio ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Seus conhecimentos, sugestões e contribuições foram fundamentais para a realização desta pesquisa.

Ao nosso coorientador, Matheus Gomes Arruda, pela colaboração e pelo suporte prestado durante a execução desta pesquisa. Sua participação foi essencial no esclarecimento de dúvidas, na discussão dos resultados e no aperfeiçoamento das atividades desenvolvidas, contribuindo significativamente para a concretização deste trabalho.

RESUMO

Em solos de alta resistividade, a obtenção de baixos valores de resistência de aterramento é limitada por questões técnicas e econômicas. Como solução, este trabalho avalia a aplicação de resíduo siderúrgico incorporado ao concreto para encapsulamento de hastes de aterramento, buscando reduzir a resistência de aterramento e verificar a viabilidade técnica e sustentável desse material como melhorador de sistemas de aterramento elétrico. Portanto, esse trabalho avaliou a aplicação de limalha de ferro em misturas cimentícias para o aprimoramento de sistemas de aterramento elétrico em solos de alta resistividade, como o solo predominante no Tocantins. A metodologia incluiu a construção e instalação de eletrodos em campo, no IFTO - Campus Palmas, comparando hastes de cobre nuas (H), hastes encapsuladas em concreto convencional (CT) e hastes encapsuladas com concreto contendo 10% (M1) e 20% (M2) de resíduo siderúrgico em relação à massa de cimento. Medições quinzenais da resistividade do solo e da resistência de aterramento foram realizadas em períodos seco e chuvoso para análise do desempenho dos materiais propostos. Os resultados demonstraram que o encapsulamento das hastes promoveu uma redução significativa da R_{terra} em comparação com as hastes convencionais. O sistema M2, com 20% de adição de resíduo, apresentou o melhor desempenho elétrico, com valores de R_{terra} situados entre 25% e 32% dos valores da haste de referência (H), indicando uma melhoria de 24% a 39% em relação ao concreto convencional (CT). Além disso, a incorporação de limalha de ferro em M2 manteve as propriedades de resistência à compressão do concreto. O estudo concluiu que a adição de resíduo siderúrgico em eletrodos de aterramento é uma alternativa técnica e ambientalmente viável para otimizar sistemas em solos de alta resistividade.

Palavras-chave: Sistema de aterramento. Resíduo Siderúrgico. Materiais de Melhoramento de Sistema de Aterramento Elétrico. Resistividade do solo. Resistência de aterramento.

ABSTRACT

In soils with high resistivity, achieving low grounding resistance values is limited by technical and economic factors. As a solution, this study evaluates the application of steelmaking waste incorporated into concrete for encapsulating grounding rods, aiming to reduce grounding resistance and verify the technical and sustainable feasibility of this material as an enhancer for electrical grounding systems. Therefore, this study evaluated the application of iron filings in cementitious mixtures to improve electrical grounding systems in soils with high resistivity, such as the predominant soil in Tocantins. The methodology included the construction and field installation of electrodes at IFTO – Palmas Campus, comparing bare copper rods (H), rods encapsulated in conventional concrete (CT), and rods encapsulated in concrete containing 10% (M1) and 20% (M2) steelmaking waste relative to the cement mass. Biweekly measurements of soil resistivity and grounding resistance were performed during dry and rainy periods to analyze the performance of the proposed materials. The results showed that rod encapsulation promoted a significant reduction in R_{terra} compared with conventional rods. The M2 system, with 20% waste addition, presented the best electrical performance, with R_{terra} values ranging from 25% to 32% of the reference rod (H) values, indicating an improvement of 24% to 39% compared with conventional concrete (CT). In addition, the incorporation of iron filings in M2 maintained the compressive strength properties of the concrete. The study concluded that the addition of steelmaking waste to grounding electrodes is a technically and environmentally feasible alternative for optimizing systems in soils with high resistivity.

Keywords: Grounding system. Steelmaking waste. Ground enhancement material. Soil resistivity. Grounding resistance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Haste vertical com destaque na conexão	17
Figura 2 – Ilustração do Método de Wenner	20
Figura 3 – Método de Queda de Potencial	23
Figura 4 – Curva de R_{terra} vs Distância	24
Figura 5 – Fluxograma metodológico	30
Figura 6 – Sistema de aterramento com haste única encapsulada com MMSAE	31
Figura 7 – Resíduo siderúrgico coletado	34
Figura 8 – Materiais utilizados para confecção das hastes encapsuladas	35
Figura 9 – Junção dos materiais em betoneira	36
Figura 10 – Estruturas para construção dos eletrodos pré-moldados	37
Figura 11 – Hastes encapsuladas	37
Figura 12 – Corpos de prova para ensaio de compressão	38
Figura 13 – Bancada para teste de compressão	39
Figura 14 – Disposição dos sistemas de aterramento	40
Figura 15 – Imagem aérea da área escolhida para o experimento	41
Figura 16 – Terrômetro Digital e Termo-higrômetro Digital	42
Figura 17 – Precipitação acumulada entre medições	44
Figura 18 – Resistividade do solo	45
Figura 19 – Evolução dos valores de R_{terra} a cada medição	47
Figura 20 – Sub-região destacada	49
Figura 21 – Gráfico da resistividade nas linhas original e alternativa	50
Figura 22 – Curvas de tensão do teste de compressão das amostras CT	51
Figura 23 – Curvas de tensão do teste de compressão das amostras M1	52
Figura 24 – Curvas de tensão do teste de compressão das amostras M2	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos corpos de prova	31
Tabela 2 – Condições climáticas e ambientais ao decorrer do experimento	43
Tabela 3 – Valores médios da medição da Resistência de aterramento	48
Tabela 4 – Valores medidos pelo método de Wenner	60
Tabela 5 – Valores medidos pelo método da queda de potencial	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

FEM – Finite Elements Method (Método dos Elementos Finitos)

FESEM – Field Emission Scanning Electron Microscopy (Microscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo)

GEM – Ground Enhancement Material (Material de Melhoramento do Solo)

GESEE – Grupo de Estudos em Sistemas de Energia Elétrica

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

MMSAE – Materiais de Melhoramento do Sistema de Aterramento Elétrico

MRT – Monofilar com Retorno por Terra

NBR – Norma Brasileira

PIBIC – Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica

R_{terra} – Resistência de aterramento ou resistência de terra

SEV – Sondagem Elétrica Vertical

Std – Standard (Padrão)

LISTA DE SÍMBOLOS

Ca^{2+} - Íon de cálcio

CuSO_4 – Sulfato de Cobre

K^+ - Íon de Potássio

MgCl_2 – Cloreto de Magnésio

Na^+ - Íon de Sódio

NaCl – Cloreto de Sódio

$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ – Tiosulfato de Sódio

NH_4Cl – Cloreto de Amônia

OH^- - Íon hidróxido

SO_4^{2-} - Íon sulfato

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	PROBLEMÁTICA	13
3	JUSTIFICATIVA	14
4	OBJETIVOS	15
4.1	Objetivo geral	15
4.2	Objetivos específicos	15
5	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
5.1	Sistemas de Aterramento Elétrico	16
5.2	Resistividade do Solo	18
5.2.1	Sondagem elétrica vertical	18
5.2.2	Método de Wenner	19
5.2.3	Estratificação do solo	21
5.3	Resistência de aterramento	22
5.3.1	Método da queda de potencial	23
5.4	Materiais de melhoramento do sistema de aterramento elétrico (MMSAE)	25
5.5	Resistência à compressão	29
6	METODOLOGIA	30
6.1	Definição dos MMSAE propostos	30
6.2	Projeto dos eletrodos de haste única	32
6.3	Coleta do resíduo siderúrgico	34
6.4	Fabricação dos eletrodos pré-moldados	35
6.5	Teste de compressão dos corpos de prova	39
6.6	Instalação dos sistemas de aterramento com eletrodo único	40
6.7	Medições da resistividade do solo e R_{terra}	42
7	RESULTADOS	43
7.1	Condições climáticas observadas durante a pesquisa	43
7.2	Medições da resistividade do solo	44
7.3	Medições de R_{terra}	46
7.4	Influência das variações locais do solo	48
7.5	Teste de resistência a compressão	50
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
8.1	Sugestões para trabalhos futuros	54
	REFERÊNCIAS	56
	APENDICE A	60
	APENDICE B	61
	APENDICE C	62
	APENDICE D	66

1 INTRODUÇÃO

O aterramento elétrico, conforme estabelecido na Norma Brasileira NBR 5410 (2004), é parte de um sistema de proteção, tendo como finalidade promover a segurança de pessoas e equipamentos. Para isso, conforme Kindermann e Campagnolo (1995), o sistema de aterramento deve cumprir os seguintes objetivos: obter o menor valor possível de resistência de aterramento; manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro dos limites de segurança; fazer com que os equipamentos de proteção sejam mais sensíveis e isolem rapidamente as falhas; proporcionar um caminho de escoamento para descargas atmosféricas; utilizar a terra como retorno de corrente em sistemas MRT (sistema de energia elétrica Monofilar com Retorno por Terra); e escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças e em torno de equipamentos.

Entretanto, a obtenção desse primeiro parâmetro está condicionada às propriedades do solo, uma vez que a resistência de aterramento é influenciada por sua composição química e física, pela umidade, pela temperatura e outros fatores sazonais. Mesmo em sistemas amplamente adotados, solos de elevada resistividade podem comprometer o desempenho do aterramento, exigindo técnicas construtivas que aprimorem não apenas o formato geométrico do eletrodo, mas também sua característica condutiva (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995). Nesse mesmo contexto, Visacro (2002) aponta que a efetividade do sistema de aterramento depende de sua capacidade de conduzir correntes de falta e descargas atmosféricas, o que torna necessário, em algumas regiões, o uso de materiais especiais além dos métodos tradicionais que auxiliem na redução da resistência de aterramento (R_{terra}).

Em regiões que possuem alta resistividade do solo, torna-se desafiador o processo de obtenção de valores reduzidos de R_{terra} . A fim de solucionar este problema, um método aceito é o encapsulamento da haste de aterramento por meio de materiais de melhoramento do solo, mudando a característica do material em contato com a haste e melhorando seu desempenho (IEEE, 2015; SILVA FILHO, 2023). É comum o uso de concreto por sua capacidade de absorver umidade, aliada com sua rigidez física. Isso ajuda a reduzir a resistividade do solo ao redor da haste e, conseqüentemente, obter menores valores de R_{terra} .

A limalha de ferro, foco deste trabalho, é um resíduo siderúrgico gerado em grandes volumes por empresas metalúrgicas, principalmente durante os processos de usinagem (torneamento, fresagem, furação) de peças metálicas. Classificado como lixo industrial, este material é composto por pequenas lascas, fragmentos, rebarbas e pó de metal. A limalha de ferro possui características de alta condutividade elétrica e baixo custo, o que o torna um

material promissor para aplicação em sistemas de aterramento. Ao mesmo tempo é um resíduo de difícil e caro descarte por seu impacto ambiental, então oferecer um uso sustentável no aterramento contribui também para economia circular.

Portanto, este trabalho pretende avaliar a aplicação de resíduo siderúrgico em misturas cimentícias no encapsulamento de hastes de aterramento em campo, objetivando estudar a viabilidade dessa alternativa como solução para redução da resistência de aterramento.

2 PROBLEMÁTICA

Em regiões com alta resistividade do solo, a limitação espacial dificulta a execução de projetos de aterramento capazes de sustentar a demanda, ou tornam esses projetos excessivamente dispendiosos, uma vez que a solução comumente utilizada é a expansão da área coberta, com mais hastes de aterramento, ou a utilização de hastes mais profundas.

Nessas situações, a otimização do eletrodo de aterramento se apresenta como uma possível alternativa para melhorar o desempenho do sistema. Essa abordagem pode resultar em um projeto mais eficiente e econômico em comparação com as soluções tradicionais.

Com isso, este estudo pretende responder o seguinte questionamento: A adição de resíduo siderúrgico em misturas cimentícias como material de melhoramento do sistema de aterramento elétrico (MMSAE) possibilita atingir condições melhores de aterramento em um solo de alta resistividade e com limitações de espaço e orçamento?

3 JUSTIFICATIVA

O sistema de aterramento elétrico é um subsistema indispensável da instalação elétrica, responsável por escoar com segurança as correntes de falta para o solo, garantindo a proteção das pessoas e da própria instalação contra curtos-circuitos, choques elétricos e descargas atmosféricas que possam ocasionar sobretensões (VISACRO, 2002; IEEE, 2015). Nesse sentido, é desejável que o valor da resistência de aterramento R_{terra} seja o menor possível, o que tradicionalmente leva à adoção de técnicas como a instalação de um maior número de hastes ao sistema.

No entanto, por limitações de espaço disponível, inviabilidade econômica e aumento do efeito indutivo, nem sempre é possível reduzir a R_{terra} aumentando a quantidade de eletrodos em paralelo ou a profundidade. Portanto, a solução alternativa é aumentar o diâmetro efetivo do encapsulamento da haste promovendo modificações no solo ao redor da própria haste (IEEE, 2015).

Em razão da necessidade de estudar materiais capazes de modificar o meio circundante à haste de aterramento, de modo a aprimorar o desempenho do sistema, consolidou-se o interesse por esta pesquisa. Tal interesse emergiu a partir da participação de um dos integrantes em um projeto de iniciação científica desenvolvido no GESEE (Grupo de Estudos em Sistemas de Energia Elétrica) do Instituto Federal do Tocantins (IFTO), vinculado ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC). Essa linha de pesquisa tem como objetivo, por meio de métodos experimentais, analisar o comportamento de diferentes misturas de materiais e sua influência em sistemas de aterramento elétrico.

O trabalho experimental resultou no projeto intitulado “Análise da aplicação de concreto estrutural com restos de metais em sistemas de aterramento para redução da resistência elétrica”, cujo objetivo foi avaliar a eficácia de um concreto leve associado a resíduos metálicos na redução da resistência de aterramento. Entre as composições analisadas, a mistura de cimento, areia e limalha de ferro apresentou o melhor desempenho, destacando-se pela maior redução da resistência e pela estabilidade dos valores ao longo do tempo.

Dessa forma, considerando a lacuna existente na literatura quanto à aplicabilidade de hastes de aterramento encapsuladas em concreto contendo resíduo siderúrgico, bem como os resultados promissores obtidos na etapa laboratorial, este estudo propõe a continuidade do estudo no projeto de pesquisa com a aplicação desses materiais que foram analisados em bancada aplicando-os em campo no Instituto Federal do Tocantins – Campus Palmas.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste estudo é avaliar a aplicação de resíduo siderúrgico adicionado ao concreto no encapsulamento de hastes de aterramento, visando a redução da resistência de aterramento em solos de alta resistividade durante os períodos seco e chuvoso.

4.2 Objetivos específicos:

- Projetar, construir e instalar os eletrodos de aterramento, sendo constituídos por um par de hastes de cobre sem encapsulamento, um par de hastes de cobre encapsuladas com concreto convencional e dois pares de hastes de cobre encapsuladas com concreto contendo adição de resíduo siderúrgico.
- Testar a resistência a compressão dos materiais propostos e comparar os resultados com o concreto tradicional.
- Realizar medições quinzenais da resistência de aterramento (R_{terra}) de cada sistema implantado, bem como da resistividade do solo na região experimental, em semanas alternadas ao longo do período de monitoramento.
- Monitorar as condições climáticas, como temperatura ambiente, umidade do ambiente e precipitação pluviométrica durante o período das medições.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.1 Sistemas de aterramento elétrico

O aterramento elétrico consiste na ligação elétrica intencional de sistemas físicos (como sistemas elétricos, eletrônicos ou corpos metálicos) ao solo, com o objetivo de estabelecer uma rota para a dissipação de correntes elétricas (VISACRO, 2002; IEEE, 2007). O solo é o meio no qual os eletrodos de aterramento ficam imersos, sendo que suas propriedades elétricas são determinantes para o dimensionamento desses sistemas (LEITE; PEREIRA FILHO, 2001).

Nesse contexto, quando ocorre algum fenômeno de falha ou alteração nas características de tensão, a corrente elétrica tende a seguir o caminho de menor impedância. O sistema de aterramento, por possuir baixa impedância, fornece um percurso seguro para a circulação das correntes de falha ou transitórias. Em outras palavras, a corrente indesejada flui em direção à terra, cujo potencial é aproximadamente zero. Essa característica do sistema de aterramento contribui para evitar que pessoas próximas a equipamentos interligados ao sistema de proteção sofram choques elétricos provenientes de falhas no circuito.

Leite e Pereira Filho (2001), citam que o sistema de aterramento possui diversas funções essenciais para o bom funcionamento e a segurança das instalações elétricas. Entre suas principais aplicações, destacam-se: O uso da terra como condutor de retorno, garantindo o fechamento de circuitos elétricos de forma segura e eficiente; O aterramento de pontos específicos do sistema elétrico, com o intuito de otimizar o desempenho e a estabilidade de equipamentos eletroeletrônicos; A condução controlada de correntes de descarga, evitando a energização acidental de partes metálicas expostas e prevenindo riscos a pessoas, animais e equipamentos, além de minimizar o acúmulo de cargas estáticas que possam gerar faíscas ou interferências eletromagnéticas; O controle e a equalização dos potenciais elétricos, assegurando a integridade operacional do sistema por meio de práticas adequadas de aterramento.

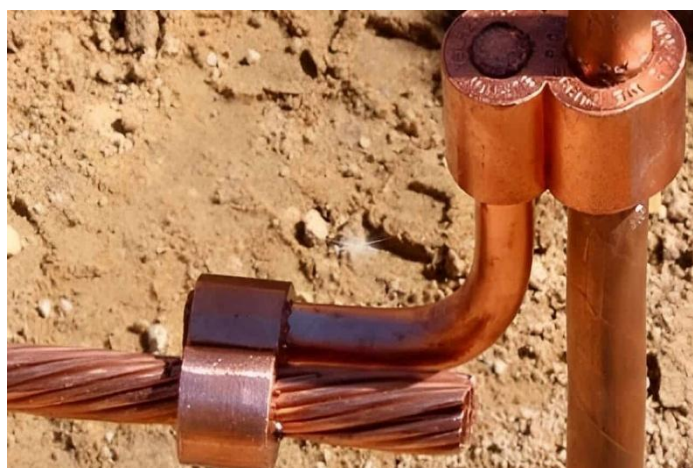
Reiterando, Visacro (2002), menciona que o aterramento pode desempenhar uma ampla gama de funções e pode assumir configurações bem diversificadas (em termos do posicionamento de seus eletrodos no solo e de sua dimensão), conforme a natureza dessa função. Em geral, as correspondentes aplicações estão sempre associadas a dois fatores fundamentais: desempenho do sistema ao qual o sistema de aterramento está conectado e; questões de segurança (dos seres vivos) e proteção dos equipamentos.

No primeiro caso, busca-se compreender como as questões associadas ao comportamento do sistema de aterramento afetam o desempenho do sistema elétrico. No que se refere à sua implantação, os aspectos podem ser analisados sob duas perspectivas distintas: na primeira, a motivação básica é a segurança, como ocorre nas conexões dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, projetadas para atuar como fator de segurança; já na segunda, o foco está na implantação de um aterramento destinado a assegurar o bom desempenho de sistemas elétricos ou eletrônicos, conhecido como aterramento de serviço (SANTOS et al., 2023).

Na literatura sobre aterramentos elétricos existem diversas geometrias construtivas que podem ser desenvolvidas para sistemas de aterramento, tais como: (i) haste simples, (ii) haste vertical, (iii) hastes paralelas, (iv) triângulo, (v) quadrado, (vi) circunferência e (vii) malha. Recomenda-se que sejam mantidos os espaçamentos entre as hastes para otimizar o desempenho das configurações. Dentre as formas citadas, a configuração mais eficiente é o sistema em malha (BEZERRA et al, 2020; KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

A Figura 1 apresenta um esquema de aterramento no qual está presente um dispositivo chamado eletrodo de aterramento, que é utilizado para fazer a conexão segura com a terra. Para fins de condução de corrente elétrica, o eletrodo é interligado a um conector apropriado, o qual permite a fixação do cabo condutor ao eletrodo de aterramento, assegurando a continuidade elétrica do sistema.

Figura 1 – Haste vertical com destaque na conexão



Fonte: Pasa, Axial Engenharia (2018).

A seleção do tipo e do material da haste é função de fatores como a resistividade do solo, a disponibilidade de espaço para instalação, a vida útil esperada e os custos envolvidos. Em ambientes corrosivos, recomenda-se a utilização de materiais com elevada resistência à

corrosão, de modo a garantir a durabilidade do sistema. Complementarmente, é essencial equilibrar os custos iniciais com os benefícios de longo prazo oferecidos por um sistema de aterramento eficiente e confiável (VISACRO, 2002; IEEE, 2007).

5.2 Resistividade do solo

É uma característica do solo apresentar-se como um meio de baixa condutividade elétrica. Em cenários em que o solo se encontra completamente seco, seu comportamento se assemelha ao de um material isolante para a circulação de correntes elétricas. Tal cenário justifica-se, conforme destaca Visacro (2002), por meio do comparativo entre a resistividade do solo e a de condutores convencionais, evidenciando que o solo pode ser, em média, 1,25 trilhão de vezes mais resistivo que o cobre e 740 bilhões de vezes mais resistivo que o alumínio.

Essa discrepância evidencia que o solo constitui um meio intrinsecamente heterogêneo, cuja composição físico-química e estrutura geológica apresentam variabilidade espacial significativa em diferentes escalas e contextos geográficos. Essa heterogeneidade exerce influência direta sobre os valores de resistividade do meio. Nesse sentido, os principais fatores a serem considerados são: o tipo de solo, o teor de umidade, a presença de sais solúveis, a compactidade, a granulometria, a temperatura e a estrutura geológica da região (VISACRO, 2002).

O teor de umidade é o fator que mais impacta a resistividade do solo, exercendo influência particularmente significativa em meios porosos e permeáveis, como certos tipos de solos e rochas. Já o efeito da temperatura sobre a resistividade segue o mesmo comportamento observado para a água presente no meio poroso, mantendo relação direta com as variações térmicas no intervalo compreendido entre o ponto de congelamento e o ponto de ebulição (KIZHLO; KANBERGS, 2009).

5.2.1 Sondagem elétrica vertical

A ABNT NBR 7117-1 (2020) define Sondagem Elétrica Vertical (SEV) como o conjunto de leituras feitas na superfície do terreno pelo método da eletrorresistividade, com um alinhamento simétrico de eletrodos e variando o espaçamento entre eles, conforme o arranjo de medição adotado, sendo o modelo geoeletrico obtido (1D) atribuído ao ponto central do arranjo. SEVs são usadas para investigar a resistividade do solo a diferentes profundidades.

A resistência do sistema de aterramento é diretamente proporcional ao valor da resistividade do solo. Para um mesmo eletrodo de aterramento, quanto maior a resistividade do solo, maior, será a resistência de aterramento do eletrodo (LEITE; PEREIRA FILHO, 2007). Como pode ser observado na Equação 1 a seguir, usada para representar a resistência de terra de forma generalizada:

$$R_{terra} = \rho * \frac{L}{S} [\Omega] \quad (1)$$

onde:

ρ : resistividade aparente do solo;

L: comprimento da haste;

S: área da seção transversal da haste;

A norma IEEE Std 80 (2015) recomenda que sejam realizadas medições de resistividade do solo a fim de identificar possíveis variações significativas ao longo da profundidade. Existem diferentes técnicas para realizar essas medições, porém a mais utilizada e que será aplicada neste estudo é o método de Wenner, cuja descrição é apresentada a seguir.

5.2.2 Método de Wenner

O método de Wenner é uma metodologia designada a desenvolver ensaios em sistemas de aterramento aplicados ao solo, originalmente denominado método das quatro hastes. Essa técnica, proposta pelo Dr. Frank Wenner em 1916, é empregada para a determinação da resistividade elétrica do solo, parâmetro fundamental na análise e no dimensionamento de sistemas de aterramento (VALENCIA; GARCIA, 2011). No presente trabalho, o método de Wenner será aplicado ao longo de todo o processo de levantamento de dados para obtenção da resistividade do solo. A Figura 2 apresenta a disposição das hastes e a forma de conexão do terrômetro, evidenciando seu funcionamento elétrico como fonte de corrente e instrumentos de medição de corrente e tensão.

A técnica de sondagem elétrica vertical consiste na inserção de quatro eletrodos no solo ou corpo de prova onde se deseja determinar a resistividade elétrica. Esses eletrodos são cravados no terreno com profundidade h , dispostos em linha reta e espaçados de forma equidistante por uma distância a . Nesse arranjo, injeta-se uma corrente elétrica pelo eletrodo 1,

a qual se dissipa pelo solo descrevendo um semicírculo de fluxo até alcançar o eletrodo 4. A circulação dessa corrente estabelece uma diferença de potencial entre os eletrodos 2 e 3. Conhecidos os valores da corrente injetada e da tensão medida entre esses dois eletrodos, determina-se a resistência aparente do solo R_{terra} . Com a obtenção valor de R_{terra} estabelecido, calcula-se a ρ , utilizando a Equação 2 a seguir:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4h^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4h^2}}} \quad (2)$$

Sendo:

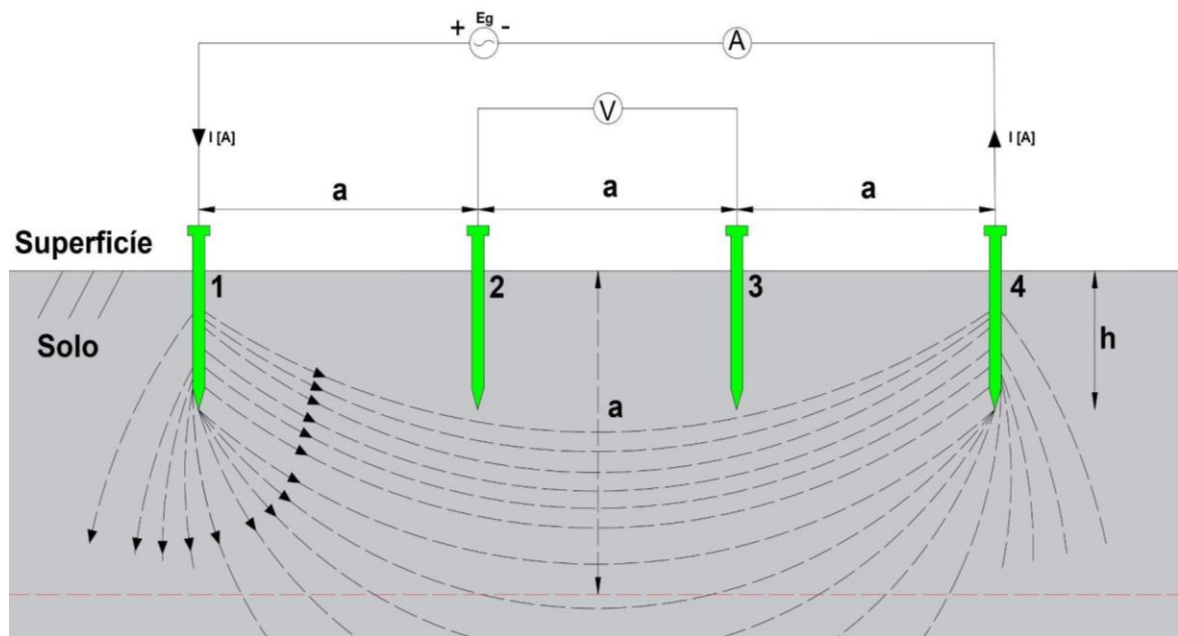
ρ : resistividade aparente do solo;

R: Resistência elétrica;

a: Distância entre os eletrodos;

h: Profundidade de penetração dos eletrodos.

Figura 2 – Ilustração do Método de Wenner



Fonte: Adaptado de Dias (2011)

Para o emprego dessa metodologia, é recomendável que a haste tenha diâmetro menor ou igual a $10^{-2} \times a$. Além disso, para um afastamento relativamente grande entre as hastes, isto é, com $a > 20 \times h$, a Equação 2 se reduz a Equação 3, apresentada a seguir, a qual fornece,

aproximadamente, a resistividade média do solo semelhante ao espaçamento “a” (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995; IEEE Std 81, 2025).

$$\rho = 2\pi aR \quad (3)$$

Em que:

ρ : resistividade aparente do solo;

a: Distância entre os eletrodos;

R: Resistência elétrica;

Ainda no que se refere a recomendações normativas, a NBR 7117-1 da ABNT (2020) orienta que a aplicação prática dessa técnica deve ser realizada com o solo em condição seca na região do objeto de estudo. Este fato ocorre em razão de ser necessário considerar a variação sazonal da resistividade do solo, podendo ser influenciada pela umidade e pelos períodos chuvosos. Tais fatores representam pontos de vulnerabilidade nas medições, podendo interferir significativamente nos resultados devido à alteração da condutividade do solo.

A mesma norma, menciona também que, na formulação do arranjo do método de Wenner, cada linha de medição abranja diferentes distâncias entre os eletrodos, de modo a garantir a cobertura máxima da área (diagonal) do terreno onde será implantada a malha. Os espaçamentos devem ser definidos a partir de 1 metro e, sempre que possível, seguir uma progressão em potências de 2, ou seja: 2 m, 4 m, 8 m, 16 m, 32 m e 64 m.

5.2.3 Estratificação do solo

Uma vez obtidos os resultados da SEV, é preciso processar as informações em busca de um modelo de solo. O primeiro passo é a produção das curvas de resistividade aparente em relação a profundidade, para cada direção medida. Depois filtram-se os valores extremos e obtêm-se a curva média de resistividades aparentes (ABNT, 2020). O número de camadas do modelo de solo pode ser obtido pelo número de pontos de inflexão da curva média de resistividades aparentes.

Para sistemas de aterramento simples é amplamente adotado o modelo de duas camadas, “O modelo de duas camadas consiste em uma camada superior de profundidade finita e resistividade diferente da de uma camada inferior de profundidade infinita” (IEEE Std. 80, 2015). A profundidade da primeira camada e a resistividade de cada camada pode ser encontrada por diversos métodos, desde métodos visuais, comparando curvas, métodos de

otimização, como o de Hooke-Jeeves, até métodos computacionais (KINDERMANN; CAMPAGNOLLO, 1995; TELLÓ, 2017). A resistividade da primeira camada é comumente usada para o cálculo das tensões de passo e toque.

5.3 Resistência de aterramento

É uma característica dos sistemas de aterramento comportarem-se com impedância complexa quando submetidos a sinais elétricos de diferentes frequências, uma vez que a interação com o solo apresenta efeitos combinados de resistência, indutância e capacitância. No entanto, em aplicações de baixa frequência, o valor da impedância pode ser aproximado pelo valor da resistência elétrica do eletrodo (VISACRO, 2002).

Assim, a resistência de terra dos eletrodos pode ser compreendida como a combinação de três parcelas fundamentais: a resistência de conexão metálica entre as hastes e o sistema de distribuição de cabos da edificação; a resistência de contato estabelecida entre os eletrodos e o solo; e a resistência distribuída no volume de solo adjacente à malha de aterramento. De modo geral, o sistema de aterramento desempenha a função de estabelecer um ponto de referência equipotencial em relação ao potencial da terra, além de atuar na dissipação e neutralização de cargas elétricas indesejáveis (PEREIRA, 2008).

Portanto, Kindermann e Campagnolo (1995), citam que o valor da R_{terra} de única haste de aterramento pode ser em um solo homogênea é dada pela Equação 4:

$$R_{terra} = \frac{\rho_a}{2\pi H} \times \ln\left(\frac{4H}{D}\right) \quad (4)$$

em que:

H: comprimento;

D: Diâmetro da haste;

ρ_a : Resistividade elétrica aparente do solo.

A SEV da resistência de aterramento é uma forma de avaliar se os critérios adotados no projeto de aterramento foram adequadamente selecionados (TELLÓ, 2017). Nesse contexto, Kindermann e Campagnolo enfatizam que é uma prática essencial programar medições ao longo do tempo, a fim de manter um histórico do comportamento da resistência de terra e acompanhar possíveis variações decorrentes das condições do solo ou da própria instalação.

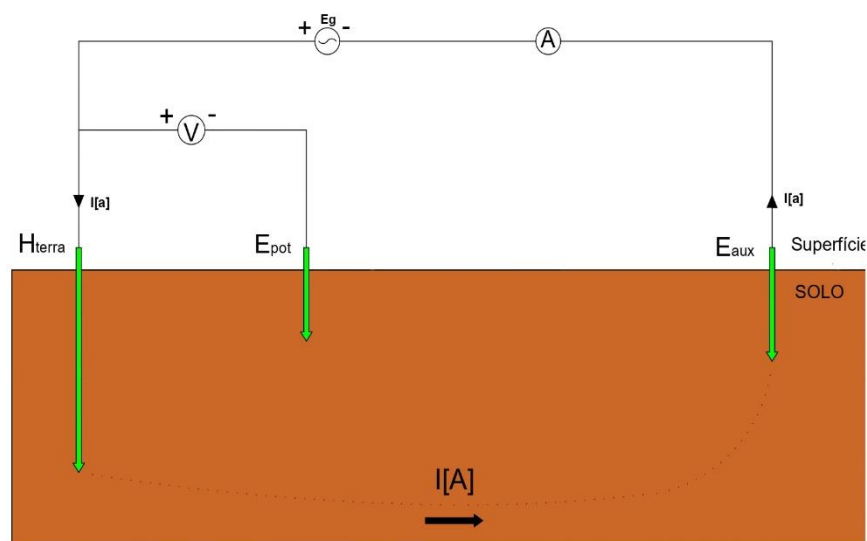
Na literatura específica sobre SEV são apresentados diversos métodos empregados na análise da R_{terra} . Entre os métodos mais utilizados, destacam-se o método dos dois pontos (Ampère-Volt ou Volt-Amperímetro) e o método dos três pontos, denominado método da Queda de Potencial. Neste trabalho, adota-se o método da Queda de Potencial como procedimento de SEV das hastes encapsuladas com material de aprimoramento da R_{terra} , cuja descrição é apresentada na seção seguinte.

5.3.1 Método da Queda de Potencial

O método da queda de potencial é uma metodologia destinada à medição da resistência de terra em sistemas de aterramento. A técnica consiste em fazer circular uma corrente entre o eletrodo sob teste e o eletrodo de corrente. Em seguida, mede-se a tensão entre o sistema de aterramento e o eletrodo de potencial, deslocando-se este último ao longo do alinhamento em direção ao eletrodo auxiliar (ABNT, 2009).

Embora inicialmente concebido para determinar a resistência do solo, ao longo do tempo esse método passou por adaptações que permitiram sua aplicação na medição da resistência de diferentes corpos de prova. Entre essas aplicações, destacam-se estudos voltados a sistemas de aterramento que utilizam materiais redutores de resistência, como concreto, bentonita, argila expandida e outros materiais com propriedades higroscópicas (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

Figura 3 – Método Queda de Potencial



Fonte: Adaptado de Kindermann e Campagnolo (1995).

A Figura 3 ilustra o método da queda de potencial, no qual H_{terra} representa o eletrodo de aterramento a ser medido, por onde circula uma corrente de magnitude I na região denominada região de patamar, com o auxílio do eletrodo auxiliar E_{aux} , que estabelece o caminho de retorno da corrente pelo solo. Esse fluxo de corrente gera potenciais na superfície, os quais serão medidos pelo eletrodo de potencial E_{pot} . Assim, o valor de R_{terra} pode ser numericamente calculado por meio da relação entre a tensão medida e a corrente injetada, conforme apresentado na Equação 5, com base na lei de Ohm.

$$R_{TERRA}(x) = \frac{V(x)}{I} [\Omega] \quad (5)$$

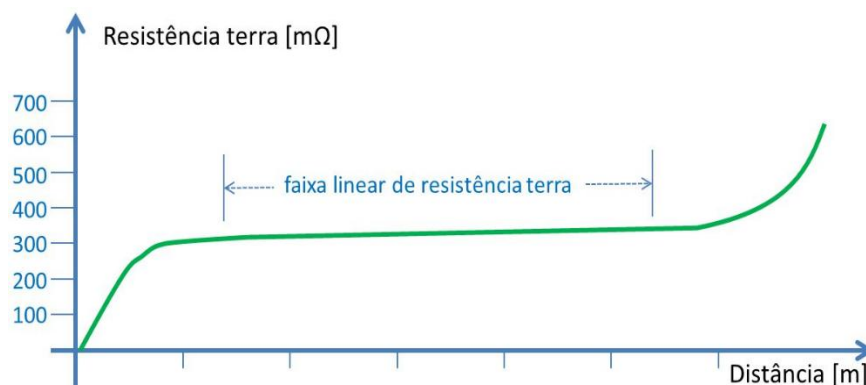
Onde:

$V(x)$: potencial produzido na superfície em função da distância “x”

I : corrente injetada no sistema de aterramento

A variação da posição do eletrodo de potencial é essencial para a obtenção da curva característica do método. Assim, quando as leituras passam a apresentar valores praticamente constantes, considera-se esse valor como a resistência de sistema de aterramento, conforme demonstrado na Figura 4. A distância no eixo das abscissas representa a distância entre o sistema de aterramento H_{terra} e o condutor de retorno de corrente E_{aux} e o das ordenadas representa o valor da resistência calculada a partir dos potenciais medidos.

Figura 4 – Curva de R_{terra} vs Distância



Fonte: Paulino e Junior (2012)

Para minimizar as influências entre eletrodos devido às resistências mútuas, o teste geralmente é realizado adotando-se uma distância considerável entre o sistema de aterramento

e o eletrodo de retorno de corrente. Divergir dessa prática pode impedir a estabilização da curva característica, tornando impossível determinar com precisão o valor da resistência do sistema de aterramento elétrico. Normalmente, a distância do eletrodo de corrente deve ser, no mínimo, cinco vezes a maior dimensão do sistema de aterramento em teste (IEEE Std 81, 2025).

5.4 Materiais de Melhoramento do Sistema de Aterramento Elétrico (MMSAE)

Em sistemas de aterramento instalados em solos com alta resistividade, muitas vezes é inviável reduzir a resistência de terra por meio do aumento do número de hastes, do incremento do diâmetro efetivo do eletrodo ou pela adoção de soluções convencionais, especialmente quando há pouca disponibilidade recursos financeiros, decorrentes do alto custo de insumos. Diante dessas limitações, a comunidade científica tem buscado alternativas viáveis que permitam equilibrar o desempenho técnico e o custo da instalação. Uma dessas soluções consiste no encapsulamento da haste com materiais de melhoramento do sistema de aterramento elétrico (Ground Enhancement Materials – GEM), visando reduzir os valores de resistência de terra. Nesse contexto, a norma IEEE Std 80 recomenda, entre os GEMs, o uso de bentonita e concreto como meios eficazes para a obtenção de menores valores de resistência de aterramento (IEEE, 2015).

A metodologia de encapsulamento de hastes com materiais de melhoria do solo, como o GEM, embora pouco difundida no mercado, é uma técnica antiga que remonta aos experimentos de Herbert G. Ufer em 1941, durante a Segunda Guerra Mundial. Suas pesquisas evidenciaram que o metal envolto em concreto proporciona uma redução expressiva da resistência de aterramento, configurando um avanço relevante para a tecnologia de aterramentos elétricos. Na comparação entre uma haste encapsulada por cerca de duas polegadas de concreto e outra sem encapsulamento, Ufer constatou que o eletrodo envolto em concreto apresentou desempenho de 10 a 20 vezes superior, demonstrando a eficácia desse método (UFER, 1964).

Atualmente, é estabelecido na literatura a importância do concreto em sistemas de aterramento, o que tem motivado diversas pesquisas voltadas à comparação de sua eficiência. Um dos principais fatores que justificam o uso do concreto é sua natureza higroscópica, com grande capacidade de absorver umidade do ambiente e liberá-la de forma gradativa (SOUZA et al., 2007). Além disso, o desempenho do aterramento da haste encapsulada com concreto também está associado às propriedades físicas e químicas da pasta de cimento, principalmente pela presença de íons (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , OH^- e SO_4^{2-}) que facilitam a mobilidade dos elétrons, conforme destacado por Whittington et al. (1981), Simon e Vass (2012).

Ainda no contexto das práticas experimentais relacionadas ao aterramento Ufer, Souza (2025) realizou uma análise ao longo de 360 dias (tanto em períodos chuvosos quanto seco), utilizando métodos de sondagens elétricas verticais quinzenais para avaliar a influência da variação do encapsulamento da haste com concreto. O estudo considerou diferentes diâmetros (D) para encapsulamento da haste sendo (i) 75 mm, (ii) 100 mm, (iii) 150 mm, (iv) 200 mm e (v) haste sem encapsulamento, mantendo-se constantes a profundidade ($P = 25$ cm) e a altura do eletrodo ($H = 1,5$ m). A análise comparativa dos resultados entre os sistemas encapsulados e sem encapsulamento mostrou que o uso do invólucro de concreto é eficaz na redução da resistência de aterramento, além de promover uma maior constância dos valores R_{terra} ao longo de todo o período observado. Verificou-se, ainda, que o encapsulamento com 200 mm apresentou o melhor desempenho, comprovando que o aumento do diâmetro do invólucro de concreto contribui para a redução dos valores de resistência de aterramento R_{terra} .

Além desse recurso, Hasni (2020) realizou a avaliação de diferentes quantidades e orientações de concreto como reforço em sistemas de aterramento por meio de simulações realizadas pelo Método dos Elementos Finitos (FEM). Foram definidas quatro proporções para as aplicações: (i) concreto total, (ii) meio concreto, (iii) três quartos e (vi) um quarto de concreto. No que se refere a orientações, foram realizadas simulações de aplicações de concreto na base, no topo e na parte central dos elementos (haste encapsulada). Os resultados desse estudo indicaram que o uso de concreto reduz significativamente o campo elétrico em todas as situações analisadas. No entanto, a configuração em que o eletrodo foi totalmente encapsulado por concreto apresentou melhor desempenho na redução do campo elétrico.

Por outro lado, Lim, Gomes e Kadir (2013), verificaram que a aplicação bentonita como material de aprimoramento de aterramento possui propriedades químicas, físicas e elétricas que contribuem para a redução da resistência de terra e estabilidade do sistema de aterramento ao absorver e reter água, além de inchar, dependendo do tipo de bentonita utilizado. A pesquisa destaca que a bentonita em conjunto com sódio possui maior eficiência em comparação à combinada com cálcio na função de material de melhoramento em sistema de aterramento.

Ainda nessa mesma linha Ahmad et al. (2023) investigou o comportamento de sistemas de aterramento aprimorados com bentonita e vermiculita, aplicando o método da queda de potencial com ângulo de separação de 0° para avaliar o desempenho elétrico. Esse estudo, além de caracterizar a condutividade dos elementos, caracterizou também as partes física e química desses materiais, utilizando técnicas como microscopia eletrônica de varredura (FESEM), espectrometria de dispersão de energia (EDS), determinação da densidade volumétrica e análise da capacidade de retenção de umidade. As análises mostraram reduções expressivas na

resistência de aterramento em relação ao sistema de referência, com a bentonita apresentando o comportamento mais eficiente, seguida pelas combinações bentonita-vermiculita e pela vermiculita isolada.

O estudo de Wahba et al. (2023) apresenta uma revisão aprofundada sobre materiais de melhoria aplicados a solos de alta resistividade, organizando-os em três categorias principais: naturais, químicos e resíduos. Os testes de outros trabalhos que esse trabalho verificou, demonstraram que a bentonita e cinzas de madeira podem reduzir significativamente a resistência de aterramento, atingindo reduções superiores a 70% em determinadas condições. Ressalta-se que materiais naturais e oriundos de resíduos tendem a apresentar bom desempenho em diferentes condições climáticas, contribuindo para estabilizar a impedância de aterramento diante das variações de temperatura e umidade ao longo do ano.

Ahmad (2010) analisou a aplicação de materiais químicos de melhoramento de solo (Chemical Enhancement Materials – CEM) com o objetivo de reduzir a resistência de terra R_{terra} em sistemas de aterramento. No estudo, foram utilizados NaCl, $Na_2S_2O_3$, $MgCl_2$, $CuSO_4$ e NH_4Cl , aplicados na circunvizinhança das hastes por meio de uma trincheira com 0,15 m de profundidade e 0,23 m de diâmetro. Os sistemas tratados com $Na_2S_2O_3$, $MgCl_2$, $CuSO_4$ e NH_4Cl apresentaram reduções de resistência de 67%, 59,85%, 58,74% e 7,88%, respectivamente. Apenas o NaCl apresentou desempenho negativo, com aumento de 15,64% na resistência, quando comparado à haste de referência sem tratamento químico. Dentre os materiais analisados, o $Na_2S_2O_3$ constituiu as melhores propriedades na redução da taxa de R_{terra} em comparação com materiais que foram analisados.

Por outro lado, Sinchi S. et al. (2018) avaliaram, em nove terrenos distintos, a eficiência de materiais de baixa resistividade (LRM), tanto na forma pré-misturada quanto em pó, aplicados em diferentes configurações de aterramento, incluindo: (i) haste vertical; (ii) duas hastes interligadas; (iii) três hastes em arranjo linear; (iv) três hastes em arranjo triangular; e (v) malha quadrada. Os resultados mostraram que a utilização de LRM proporcionou reduções iniciais entre 35% e 46% na resistência de aterramento. Contudo, medições realizadas após 13 meses indicaram uma diminuição no desempenho desses materiais, com reduções passando para valores entre 18% e 31%, respectivamente.

Embora o tratamento químico do solo seja uma alternativa para reduzir o valor de R_{terra} , trata-se de uma prática pouco efetiva ao longo do tempo, pois os produtos utilizados tendem a ser carregados ou lixiviados pelo solo. Em algumas situações, além de ser uma solução corrosiva à haste, esses materiais podem se dispersar completamente, enquanto em outros casos os materiais podem se aglomerar e tornar-se rígidos, como ocorre com o concreto, agride bem

menos haste e mantêm-se no ponto no qual foi fixado. Com o passar do tempo, o solo absorve o agente químico redutor da R_{terra} gradualmente, fazendo com que a resistência volte a aumentar. Portanto, esse tipo de solução deve ser considerado apenas como último recurso (CAPELLI, 2013).

Atualmente, algumas pesquisas estão inovando quanto a aplicações no GEM utilizado como proposta alternativa para redução da R_{terra} com uso de limalha de ferro como proposta de material condutivo para o aterramento. Nesse sentido, Armoosh e Oltulu (2019), por meio de sondagens elétricas impulsivas e em frequências médias e altas (1, 10 e 100 kHz), verificou as propriedades elétricas de pastas de cimento contendo diferentes tipos de adições metálicas, como pó de cobre e pó de ferro, nas proporções de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% em relação à massa do cimento. Os corpos de prova foram moldados com características construtivas de misturas da pasta de cimento com limalha de ferro, limalha de cobre e a combinação de cobre com ferro (conjunto híbrido). Para a avaliação, empregou-se o método das quatro hastes inseridos, com medições realizadas aos 3, 7 e 15 dias de cura. Os resultados indicaram que os corpos de prova com adição metálica apresentaram potencial para reduzir a resistividade elétrica em até 47%, com destaque para as misturas com maior teor de limalha.

Ainda no mesmo cenário, CUNHA et al. (2025) analisaram a aplicabilidade de misturas de cimento, areia e restos metálicos. Os corpos de prova foram avaliados em triplicata por meio do método de Wenner, sendo constituídos em: (i) concreto convencional, utilizado como referência; (ii) mistura de cimento e areia com adição de restos de alumínio; e (iii) mistura de cimento e areia com adição de restos de ferro. Os valores de resistência de terra foram monitorados semanalmente durante um período de 45 dias. Os resultados dessa avaliação mostraram que o ferro apresentou o melhor desempenho como agente redutor da resistência de aterramento, seguido do concreto convencional e do alumínio. Um aspecto relevante do estudo é que, embora o alumínio apresente maior condutividade elétrica que o ferro, a pior condição foi observada nos corpos com sua adição, fato atribuído à perda de umidade e ao aumento da temperatura, indicando que a incorporação desse material à mistura promove uma reação de caráter exotérmico.

Santos e Fonseca (IFTO, 2026), ao analisar a influência da adição de resíduo siderúrgico na redução da resistividade elétrica do concreto para aplicações em aterramento concluíram que a proporção ótima de limalha de ferro em relação a massa de cimento é de 10%, tendo obtido resultados piores que o concreto de referência nas outras concentrações testadas.

Portanto, este trabalho irá analisar a aplicabilidade do resíduo siderúrgico metálico (constituído principalmente de limalha de ferro) como principal elemento redutor da resistência

de aterramento, além de destacar aspectos relevantes relacionados à sustentabilidade ambiental e ao baixo custo, quando comparado a outros materiais metálicos.

5.5 Resistência à compressão

Na indústria de produção mecânica, é muito comum práticas de análise do material o qual foi desenvolvido, como alternativa, os engenheiros realizam ensaios mecânicos que buscam entender as características e particularidade físicas do material, e certificar que peça foi produzida da maneira desejada conforme citam Corrêa e Guimarães (2018).

Ainda o mesmo autor descreve o ensaio de compressão é um ensaio mecânico destrutivo que consiste em avaliar como um corpo de prova reage quando submetido a um esforço axial. Esse ensaio pode ser aplicado a materiais como madeira, concreto, metais, plásticos e compósitos. Seu objetivo é obter a curva tensão-deformação da amostra. As finalidades deste ensaio são:

- testar a qualidade do material;
- avaliar a durabilidade do material;
- avaliar materiais estruturais;
- testar materiais para construção;
- desenvolver novos materiais.

Neste trabalho, essa metodologia será empregada para analisar e comparar as propriedades físicas dos diferentes materiais produzidos para encapsular a haste de aterramento.

6 METODOLOGIA

Esta seção apresenta a metodologia utilizada para analisar a utilização de hastes de aterramento encapsuladas em concreto com e sem adição de resíduo siderúrgico e hastes sem encapsulamento em sistemas de aterramento. O experimento de campo tem como objetivo avaliar a influência dos MMSAE na redução da R_{terra} , considerando as condições do solo do Instituto Federal do Tocantins – Campus Palmas, ao longo de um período de um semestre.

Diante disso, elaborou-se um processo metodológico para guiar todo o estudo, desde a etapa de projeto dos sistemas de aterramento até a execução e a coleta dos resultados. O procedimento consiste, basicamente, na definição dos materiais propostos que serão utilizados, no projeto dos sistemas de aterramento com eletrodo único, na medição da resistividade do solo e das resistências de aterramento, bem como na análise dos dados obtidos nas medições de aterramento conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma metodológico



Fonte: Autores (2026).

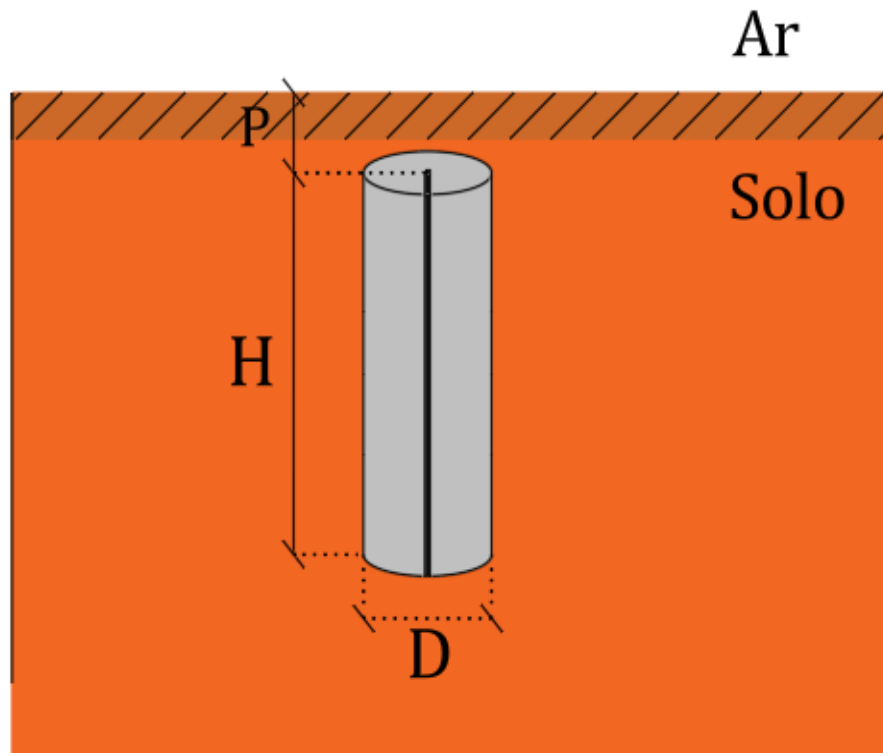
Neste estudo, serão realizadas medições das resistências de aterramento em sistemas de aterramento de eletrodo único ao longo de quatro meses. Posteriormente, será comparado o comportamento da resistência de aterramento em função das variações observadas entre os diferentes protótipos construídos com resíduo siderúrgico, a haste concretada comum e em relação à haste sem encapsulamento.

6.1 Definição dos MMSAE propostos

Para a realização do estudo em campo, foram projetados sistemas de aterramento pré-moldados de haste única, conforme ilustrado na Figura 6. Nessa representação, P corresponde à profundidade de instalação do eletrodo em relação a superfície, H ao seu comprimento e D ao diâmetro do eletrodo envolvido pelo MMSAE. Neste trabalho, adotam-se valores constantes

para esses parâmetros, sendo estabelecidos 1 cm de profundidade, 1 m de comprimento e 15 cm de diâmetro, respectivamente.

Figura 6 – Sistema de aterramento com haste única encapsulada



Fonte: Autores (2025).

Os eletrodos serão confeccionados utilizando hastes de cobre com comprimento de 1 m e $\frac{3}{8}$ de polegada de diâmetro. Para referência, será confeccionado um eletrodo envolvendo a haste por concreto composto por cimento, areia e brita nas proporções de 1:2:3 em volume, com um diâmetro total de 15 cm. Os eletrodos seguirão o indicado na tabela a seguir:

Tabela 1 – Características dos corpos de prova.

Sistema de aterramento	Matriz	Proporção (Traço – Cimento:Areia: Brita)	Quantidade de resíduo siderúrgico em relação a massa de cimento
CT	Concreto	1:2:3	0%
M1	Concreto + resíduo siderúrgico	1:2:3	10%
M2	Concreto + resíduo siderúrgico	1:2:3	20%

Fonte: Autores (2025).

6.2 Projeto dos eletrodos de haste única

Para a determinação do quantitativo de materiais, procedeu-se inicialmente ao cálculo do volume dos eletrodos de aterramento, considerando invólucros cilíndricos com diâmetro de 150 mm e altura de 0,95 m. Desprezando-se o volume ocupado pela haste de cobre inserida axialmente, o volume foi obtido por meio da expressão geométrica na Equação 6:

$$V = \pi r^2 h \quad (6)$$

$$V = 0,01679 \text{ m}^3$$

Onde:

V = volume de um eletrodo

r = raio do eletrodo

h = altura do eletrodo

Considerando a moldagem de dois corpos de prova por traço, o volume total destinado aos eletrodos corresponde a 0,03358 m³. Adicionalmente, foi considerado o volume dos corpos de prova destinados aos ensaios de resistência à compressão, sendo o volume unitário igual a 0,00157 m³. Para três corpos de prova por traço, obtém-se um volume total de 0,00471 m³.

Dessa forma, o volume total de material requerido por traço é de 0,03829 m³. A fim de compensar perdas inerentes às etapas de mistura, transporte e moldagem, adotou-se um acréscimo de 10%, resultando em um volume final de 0,0421 m³ de concreto por traço, equivalente a 42,1 litros. A conversão do volume total em massas dos materiais constituintes foi realizada por meio da equação do volume absoluto, expressa pela Equação 7:

$$V = \frac{M_{\text{cimento}}}{\rho_{\text{cimento}}} + \frac{M_{\text{areia}}}{\rho_{\text{areia}}} + \frac{M_{\text{brita}}}{\rho_{\text{brita}}} + \frac{M_{\text{água}}}{\rho_{\text{água}}} \quad (7)$$

em que:

M – É a massa do material

ρ – É a massa específica de cada material

Foram adotados valores médios de massa específica, resultando na relação expressa na Equação 8:

$$0,0421 = \frac{M_{\text{cimento}}}{3150} + \frac{M_{\text{areia}}}{2650} + \frac{M_{\text{brita}}}{2700} + \frac{M_{\text{água}}}{1000} \quad (8)$$

Considerando o traço em massa 1:2:3:0,5 (cimento:areia:brita:água) e tomando a massa de cimento (C) como variável de referência, a equação pode ser reescrita como mostrado na Equação 9:

$$0,0421 = \frac{C}{3150} + \frac{2C}{2650} + \frac{3C}{2700} + \frac{0,50C}{1000} \quad (9)$$

A solução da equação fornece $C = 15,6897$ kg. Assim, as massas dos materiais constituintes para cada lote são:

- Cimento: 15,68 kg
- Areia: 31,37 kg
- Brita: 47,06 kg
- Água: 7,84 kg

Para as composições modificadas, foi incorporado resíduo siderúrgico como adição condutiva, sendo 1,54 kg para o traço M1 e 3,08 kg para o traço M2, correspondendo, respectivamente, a 10% e 20% da massa de cimento.

6.3 Coleta do resíduo siderúrgico

O resíduo siderúrgico utilizado neste estudo foi coletado nas retíficas Bandeirantes e Vitória, localizadas no município de Palmas, na Quadra 212 Sul. Foi dada preferência à coleta de material recém-gerado, em detrimento aos resíduos siderúrgicos do depósito, por estarem antigos e em estado de oxidação. A Figura 7 apresenta o equipamento do qual foi coletado o resíduo siderúrgico metálico, identificado pelo funcionário como limalha de ferro, utilizada neste estudo, proveniente do processo de retificação dos cilindros de blocos de motor, componentes fabricados em ferro fundido.

Figura 7 – Resíduo siderúrgico coletado



Fonte: Autores (2026).

Após o procedimento de coleta, o resíduo siderúrgico foi acondicionado em recipiente devidamente vedado, permanecendo armazenado até sua utilização na fabricação dos eletrodos de aterramento.

6.4. Fabricação dos eletrodos pré-moldados

Para a construção dos eletrodos foram utilizados tubos de PVC com diâmetro de 150 mm, vedados em uma das extremidades com tampas do tipo cap. O comprimento adotado para os moldes foi de 0,95 m, sendo os tubos cortados com auxílio de uma serra de bancada. Também foram empregadas hastes cobreadas com comprimento de 1 m. Os materiais utilizados para a produção do concreto foram cimento, areia, brita, água e, quando aplicável, resíduo siderúrgico, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Materiais utilizados para confecção das hastes encapsuladas



Fonte: Autores (2026).

Antes do início da fabricação dos eletrodos, definiu-se o procedimento experimental a ser adotado. Foram utilizadas duas betoneiras de média capacidade operando simultaneamente, permitindo a produção de massa suficiente para o preenchimento dos moldes dos eletrodos e para a moldagem dos corpos de prova destinados aos ensaios de resistência à compressão. Inicialmente, realizou-se a pesagem dos materiais secos utilizando uma balança com precisão de três casas decimais, bem como a medição da água necessária para cada traço. As proporções adotadas foram de 7,5 kg de areia, 11,25 kg de brita, 3,75 kg de cimento e 1,875 L de água.

As betoneiras foram previamente preparadas por meio da lavagem interna com água e brita, procedimento realizado para remoção de resíduos de concreto provenientes de utilizações

anteriores e para saturação do equipamento, evitando interferências na proporção de água da mistura. Em seguida, os materiais secos (cimento, areia, brita e resíduo siderúrgico), foram adicionados às betoneiras ainda desligadas e misturados por aproximadamente 1 minuto, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Junção dos materiais em betoneira



Fonte: Autores (2026).

Após a homogeneização, a massa foi transferida diretamente das betoneiras para os moldes. O concreto foi vertido em estruturas confeccionadas com tubos de PVC, previamente vedadas com tampa do tipo cap, a fim de evitar vazamentos durante o preenchimento, conforme apresentado na Figura 10. Durante o preenchimento dos moldes, as hastes cobreadas foram posicionadas no eixo central dos cilindros.

Com o objetivo de promover maior compacidade e uniformidade da massa, foram aplicadas leves percussões na superfície externa dos moldes com auxílio de uma marreta de borracha, induzindo a vibração manual do concreto e contribuindo para a redução da formação

de vazios internos. A fabricação dos eletrodos foi realizada ao longo de dois dias consecutivos. A Figura 11 apresenta o aspecto final das hastes encapsuladas.

Figura 10 – Estruturas para construção das eletrodos pré-moldados



Fonte: Autores (2026).

Figura 11 – Hastes encapsuladas



Fonte: Autores (2026).

Para o concreto de referência, o concreto com adição de 10% de resíduo siderúrgico e o concreto com adição de 20% de resíduo siderúrgico, foram moldados corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à compressão. O preenchimento e adensamento dos corpos de prova foram realizados mediante aplicação de golpes com haste metálica, sendo uma etapa executada com metade do volume preenchido e outra após o completo preenchimento do molde, conforme ilustrado na Figura 12. Para cada composição, os ensaios foram realizados em triplicata, sendo adotado como resultado o valor médio obtido entre os três corpos de prova.

Figura 12 – Corpos de prova para ensaio de compressão



Fonte: Autores (2026).

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram em estufa úmida por 24 horas. Em seguida, foram desmoldados e mantidos submersos em água até a data de realização dos ensaios de resistência à compressão. Os eletrodos encapsulados, por sua vez, foram armazenados em local protegido da chuva, permanecendo em processo de cura por um período de duas semanas.

6.5 Teste de compressão dos corpos de prova

Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas da moldagem e, em seguida, submetidos ao processo de cura por imersão em água durante 28 dias. Após esse período, as amostras foram retiradas da água, secas superficialmente com o auxílio de um pano e encaminhadas para o ensaio de resistência à compressão. Os ensaios foram realizados na Máquina Universal de Ensaio Composta PC 200, da fabricante Emic, na qual os corpos de prova foram submetidos à aplicação de cargas axiais crescentes até a ruptura. A Figura 13 apresenta um dos corpos de prova posicionado na máquina PC 200 para a realização do ensaio.

Figura 13 – Bancada para teste de compressão



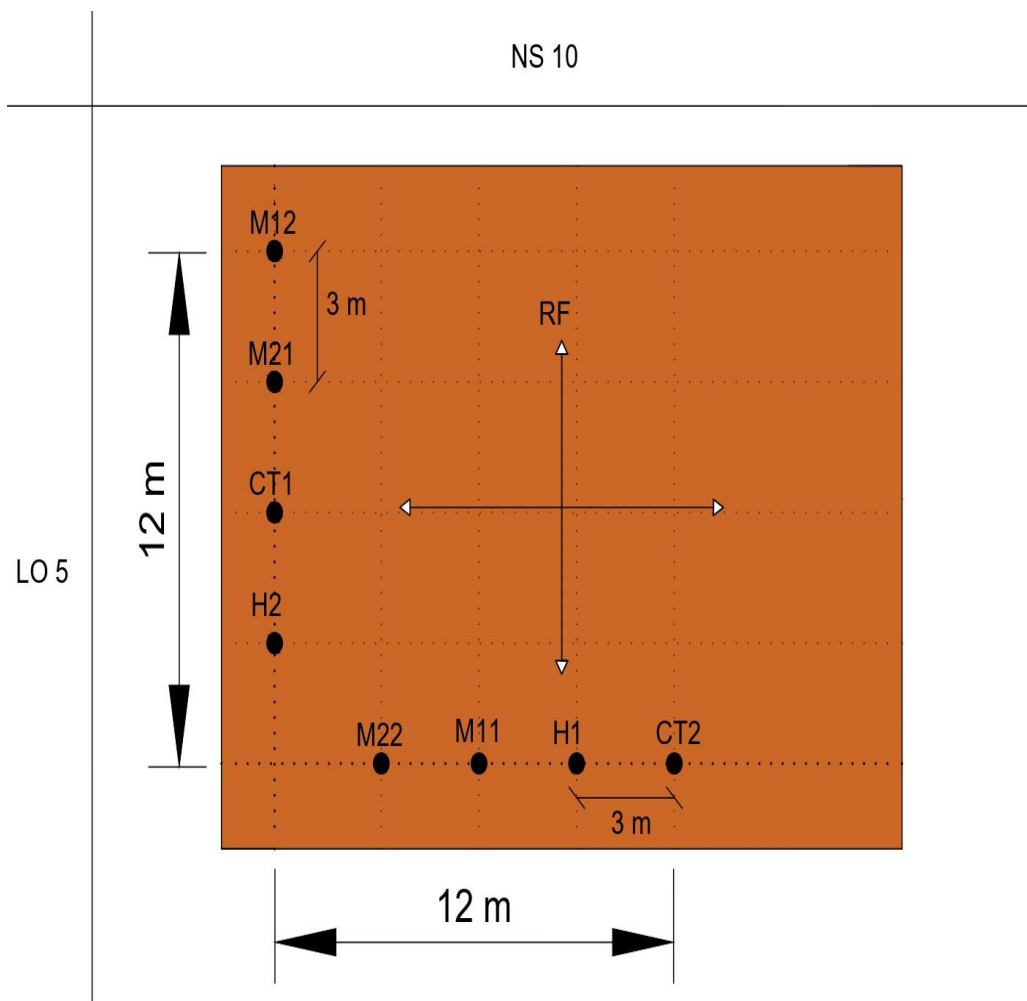
Fonte: Autores (2026).

Para cada composição de concreto (CT, M1 e M2), os ensaios de resistência à compressão foram realizados em triplicata, sendo testado um corpo de prova por vez. A partir desse ensaio, é possível avaliar o comportamento mecânico dos concretos contendo adição de resíduo siderúrgico em relação ao concreto convencional.

6.6 Instalação dos sistemas de aterramento com haste ou eletrodo único

A implantação dos sistemas de aterramento foi conforme o ilustrado na Figura 13, foram instalados quatro sistemas de aterramento: o sistema de referência (H1 e H2), composto por uma haste sem encapsulamento; o sistema encapsulado com concreto (CT1 e CT2); o sistema encapsulado com concreto e adição de resíduo siderúrgico na proporção de 10% da massa de cimento (M11 e M12); e o sistema formado por uma mistura de cimento, areia e resíduo siderúrgico na proporção de 20% da massa de cimento (M21 e M22). Foram seguidos os princípios do Delineamento em Blocos Casualizados (DBC), onde as posições relativas dos sistemas foram escolhidas de forma aleatória e o processo foi repetido em dois grupos distintos. Os eletrodos H1, H2, CT1 e CT2 correspondem a configurações amplamente utilizados em sistemas de aterramento, servindo como referência para comparação com os protótipos propostos.

Figura 14 – Disposição dos sistemas de aterramento



Fonte: Autores (2026).

A área usada no experimento se encontra na parte nordeste do Campus Palmas do IFTO, como mostrado na Figura 14. Os eletrodos foram posicionados ocupando lados distintos, desenvolvendo um formato geométrico do tipo “L”, a fim de ocupar um território menos acessível ao público e evitar possíveis interferência ao longo do estudo, enquanto continuam ocupando um solo de características semelhantes. Essa área em “L” ocupa um espaço de 12 m em cada lado de seus vértices, com 3 m de espaçamento entre os eletrodos de um mesmo grupo, separando os grupos de prova.

Figura 15 – Imagem aérea da área escolhida para o experimento



Fonte: Autores (2026).

A posição dos sistemas em cada agrupamento foi definida de forma aleatória, em seguida foram escavados seis buracos de 1 m de profundidade onde foram colocados os eletrodos produzidos. Os buracos foram preenchidos pela terra removida e foi feita, também, a compactação da terra ao redor dos eletrodos. Também foram instaladas hastes cobreadas nas devidas posições.

6.7 Medições resistividade do solo e resistência de terra

Quinzenalmente, em semanas alternadas, foram realizados ensaios de resistividade do solo na área do experimento, bem como medições da resistência de aterramentos dos sistemas implantados. Para as medições da resistividade do solo e de R_{terra} utilizou-se o terrômetro MTD20KWe da MEGABRAS e para registro da temperatura e umidade ambiente utilizou-se o termo-higrômetro HOLDA, mostrados na Figura 15.

Durante o período de medição da resistividade do solo e da resistência de aterramento, são observadas as condições climáticas, as condições do solo e os dados de precipitação, uma vez que esses fatores podem influenciar a umidade do solo e, conseqüentemente, os valores de resistência de aterramento R_{terra} .

Figura 16 – Terrômetro Digital e Termo-higrômetro Digital



Fonte: Autores (2026).

Neste estudo, como estratégia para as medições da resistividade do solo ρ_{terra} , utilizou-se o método de Wenner, conforme descrito na Seção 5.2.2. Complementarmente, a medição da resistência de aterramento R_{terra} dos sistemas foi realizada por meio do método da queda de potencial, em conformidade com o procedimento apresentado na Seção 5.3.1.

As medições foram realizadas semanalmente ao longo de um semestre, com início no período chuvoso e término no período seco. Durante esse intervalo, foram observadas e registradas as condições climáticas e a umidade do ambiente. Além disso, também foram verificados os dados de precipitação referentes à semana anterior a cada medição, tanto para a determinação da resistividade do solo ρ_{terra} quanto da resistência de aterramento R_{terra} .

7. RESULTADOS

Esta seção apresentará os resultados do monitoramento da resistividade do solo e R_{terra} nos sistemas de aterramentos propostos. As medições deste estudo iniciaram no período chuvoso e prosseguiram até o período de seco.

7.1. | Resultados das condições climáticas observadas durante a pesquisa

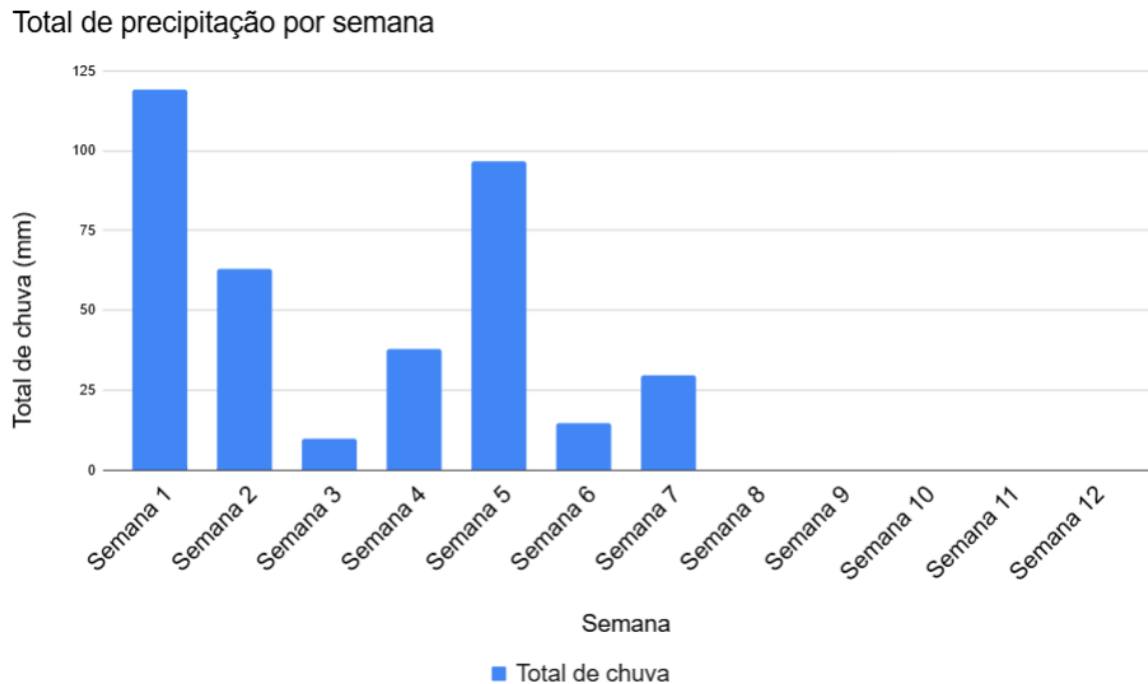
Durante o período de medições, foram realizados registros das condições ambientais presentes, visando identificar possíveis influências sobre os valores medidos e estão discriminadas na Tabela 2, no qual o dia 0 se refere a data de instalação dos sistemas de aterramento e, conseqüentemente, o monitoramento semanal da R_{terra} e ρ_{terra} , que perdurou por um período de 75 dias corridos, abrangendo quatro meses.

Tabela 2 – Condições climáticas e ambientais ao decorrer do experimento

Idade do sistema	Condições climáticas	Condição do solo	Ocorrência de chuva na semana anterior a medição	Precipitação total nas 24h anteriores a medição [mm]	Temperatura ambiente [°C]	Umidade ambiente [%]
0	Ensolarado	Úmido	Sim	0,2	33	25
7	Ensolarado	Úmido	Sim	15	34	24
12	Nublado	Úmido	Sim	0,2	29	41
19	Ensolarado	Úmido	Sim	1,4	35	57
28	Nublado	Úmido	Sim	17,2	27	64
33	Ensolarado	Úmido	Sim	0,4	29	41
40	Ensolarado	Úmido	Sim	0,8	31	43
47	Ensolarado	Seco	Não	0	32	30
54	Ensolarado	Seco	Não	0	30	34
62	Ensolarado	Seco	Não	0	33	39
69	Ensolarado	Seco	Não	0	30	40
75	Ensolarado	Seco	Não	0	30	53

Fonte: Autores (2026).

A Figura 16 apresenta os dados de precipitação acumulada entre cada campanha de medição e a medição subsequente, referentes à localização geográfica -10.147934, -48.314529 (UTM 22L X: 794283.22, Y: 8877015.56), situada na cidade de Palmas, Tocantins, onde está localizada a estação meteorológica A009. Os dados de precipitação apresentados foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (BRASIL, 2026).

Figura 17 – Precipitação acumulada entre medições

Fonte: INMET (2026).

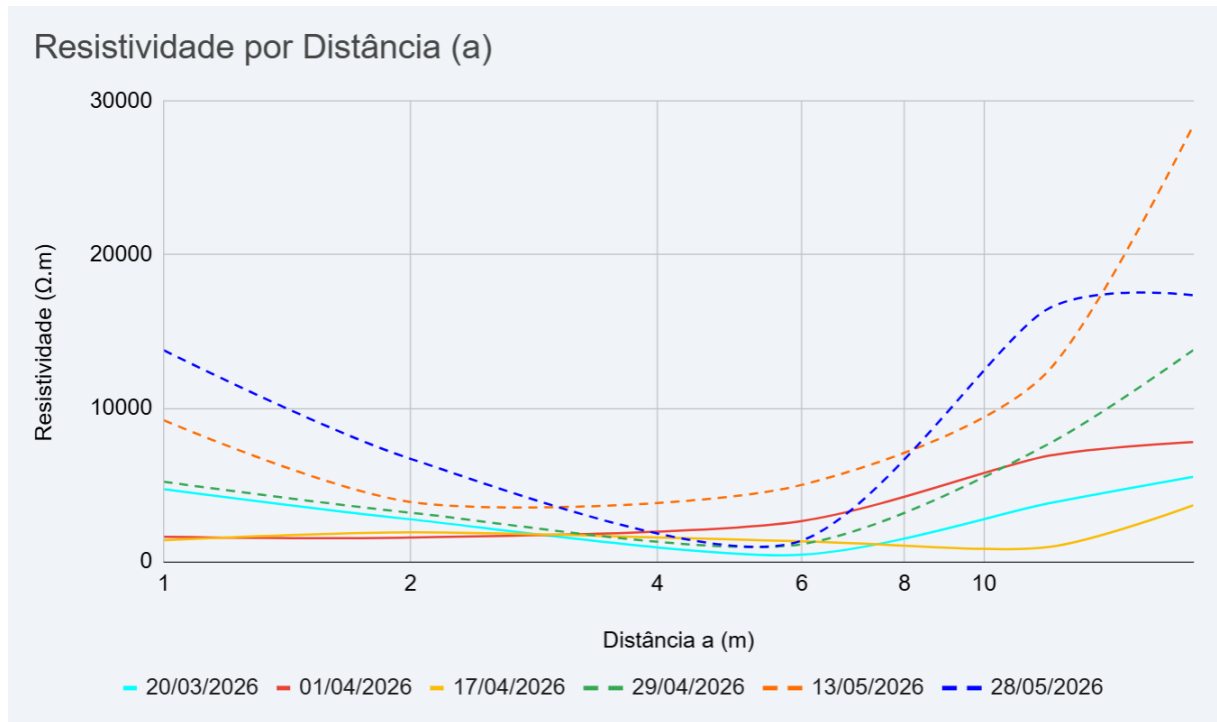
Simultaneamente, durante as campanhas de medição, foram analisados os dados de precipitação acumulada nas 24 horas anteriores a cada monitoramento da resistência de aterramento, bem como a ocorrência de chuvas na semana antecedente às medições, conforme apresentado na Tabela 1 e na Figura 16. Observou-se que o período chuvoso compreendeu a 1^a, 2^a, 3^a, 4^a, 5^a, 6^a e 7^a semanas de medição. A transição para o período seco foi identificada entre a 7^a e a 8^a semana, estendendo-se até a 12^a semana de monitoramento, correspondente à última campanha de medição realizada neste estudo.

7.2. Resultados das medições da resistividade do solo

Os resultados das sondagens elétricas verticais, realizadas pelo método de Wenner para avaliação dos sistemas de aterramento com hastes encapsuladas, estão apresentados na Figura 17. A primeira etapa de medição deste estudo foi executada em 20 de março, em momento anterior à instalação dos sistemas de aterramento. As medições iniciais ocorreram durante um intervalo caracterizado por elevada precipitação pluviométrica, condição que influenciou

significativamente os valores de resistividade aparente do solo, em decorrência do aumento do teor de umidade nas camadas superficiais do solo na região do estudo.

Figura 18 – Resistividade do solo



Fonte: Autores (2026).

As medições de resistividade do solo foram realizadas em intervalos quinzenais, utilizando o arranjo de Wenner para diferentes espaçamentos entre eletrodos (a). Os resultados obtidos apresentam comportamento coerente com a resposta eletrogeológica esperada para variações sazonais de umidade do solo. Verificou-se maior sensibilidade das medições correspondentes aos espaçamentos $a = 1$ m e $a = 18$ m às alterações no teor de umidade, devido à predominância da influência das camadas mais superficiais do solo nesses arranjos. A partir de 29 de abril observou-se o estabelecimento do período seco, associado à sazonalidade climática regional, resultando em elevação progressiva dos valores de resistividade aparente ao longo das campanhas subsequentes.

Adotando-se a média dos valores obtidos em cada campanha de medição como indicador, observa-se a evolução temporal das condições elétricas do solo ao longo do período analisado. Na medição realizada em 20/03/2026 foi registrado valor médio de 3463,83 $\Omega.m$.

Posteriormente, em 01/04/2026, verificou-se leve aumento para 4119,37 Ω , principalmente pelo efeito das medições com “a” superior a 6m, correspondendo a um aumento de 18,93% em relação à medição anterior. Na medição subsequente, realizada em 17/04/2026, o valor médio obtido foi de 1862,98 Ω .m, representando nova redução de 54,78% em relação à medição anterior, associada à elevada umidade do solo decorrente de chuvas volumosas nesse período.

A partir da medição realizada em 29/04/2026, observou-se aumento expressivo dos valores medidos, atingindo 6210,23 Ω .m na média dos valores desse dia, correspondente a um acréscimo de 233,35% em relação à campanha anterior ou 79,29% em relação a primeira medição (20/03). Na medição seguinte, realizada em 13/05/2026, registrou-se valor médio de 11811,38 Ω .m, representando aumento de 90,19%. Na última medição realizada, em 28/05/2026, o valor médio foi 11152,18 Ω .m, uma leve redução de 5,58% em relação à medição anterior, variação que pode estar associada à ocorrência de precipitação de baixa duração não registrada pela estação meteorológica utilizada no estudo. Esse comportamento evidencia a influência das condições sazonais e da redução do teor de umidade do solo sobre os parâmetros elétricos medidos, uma vez que quanto maior o tempo de estiagem maiores são os valores medidos. Os valores detalhados das jornadas de medição encontram-se no APÊNDICE A.

7.3. Resultados das medições da resistência de aterramento

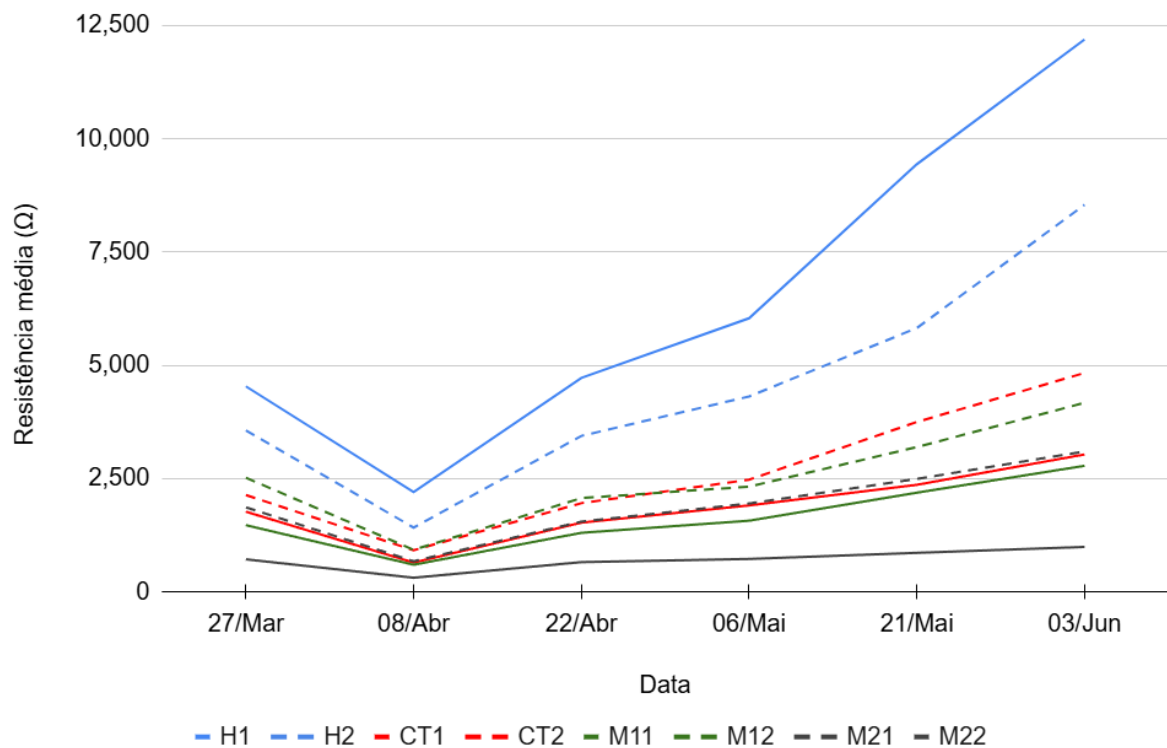
Os sistemas de aterramento implantados passaram a ser monitorados quanto à resistência de aterramento após o período de uma semana da instalação em campo, utilizando o método da queda de potencial. A primeira jornada de medição foi realizada em 27 de março. Já na primeira medição, os resultados indicaram que os sistemas com encapsulamento das hastes apresentaram menor resistência de aterramento quando comparados às hastes convencionais (H1 e H2) sem encapsulamento.

No alinhamento paralelo à Avenida NS-10, destacou-se o desempenho da haste encapsulada M22, que apresentou resistência média de aterramento de 715 Ω , seguida pelos sistemas M11, com 1469 Ω , e CT1, com 1766 Ω , todos inferiores ao valor obtido para a haste convencional H1, que apresentou resistência média de 4533 Ω . De forma semelhante, no alinhamento paralelo à LO-05, verificou-se que o sistema CT1 apresentou resistência média de

1767 Ω , seguido por M21, com 1863 Ω , e M12, com 2517 Ω , enquanto a haste convencional H2 apresentou resistência média de 3560 Ω .

Os valores de R_{terra} foram monitorados quinzenalmente ao longo do período experimental. A Figura 18 apresenta a evolução temporal dos valores medidos para cada sistema de aterramento avaliado, permitindo a análise comparativa do desempenho dos eletrodos diante das condições ambientais observadas durante o estudo.

Figura 19 – Evolução dos valores de R_{terra} a cada medição



Fonte: Autores (2026).

Os menores valores de resistência de aterramento foram registrados na campanha de medição realizada em 08 de abril, período em que ocorreram muitas chuvas, impactando significativamente os resultados. No trecho paralelo à Avenida NS-10, o eletrodo M22 apresentou o melhor desempenho, com resistência média de 309 Ω , seguido por M11, com 596 Ω , enquanto o traço CT2 apresentou melhor desempenho em relação à haste H1, registrando 916 Ω e 2200 Ω , respectivamente. Já no trecho paralelo à Avenida LO-05, o traço CT1 apresentou os menores valores de resistência dentro do seu grupo, com média de 643 Ω ,

aproximando-se dos resultados obtidos por M21, com 674 Ω , enquanto M12 apresentou média de 925 Ω .

Durante o período de monitoramento, o sistema de aterramento M22 apresentou o menor valor médio R_{terra} , demonstrando desempenho superior em relação aos demais sistemas avaliados. Enquanto as hastes de referência H1 e H2 registraram os maiores valores médios de resistência, evidenciando menor eficiência na dissipação de corrente elétrica para o solo. A Tabela 3 apresenta os valores médios de R_{terra} obtidos para todos os sistemas de aterramento implantados e monitorados ao longo do estudo.

Tabela 3 – Valores médios da medição da Resistência de aterramento

Sistema de aterramento	Média de R_{terra} no período chuvoso (Ω)	Média de R_{terra} no período seco (Ω)
H1	3818	9221
H2	2806	6223
CT1	1312	2432
CT2	1668	3683
M11	1122	2178
M12	1836	3228
M21	1362	2511
M22	559	857

Fonte: Autores (2026).

Os resultados obtidos indicam que o encapsulamento das hastes contribuiu significativamente para a redução da resistência de aterramento, evidenciando a influência das características do material cimentício no desempenho elétrico dos eletrodos.

7.4 Influência das variações locais do solo no desempenho dos sistemas de aterramento

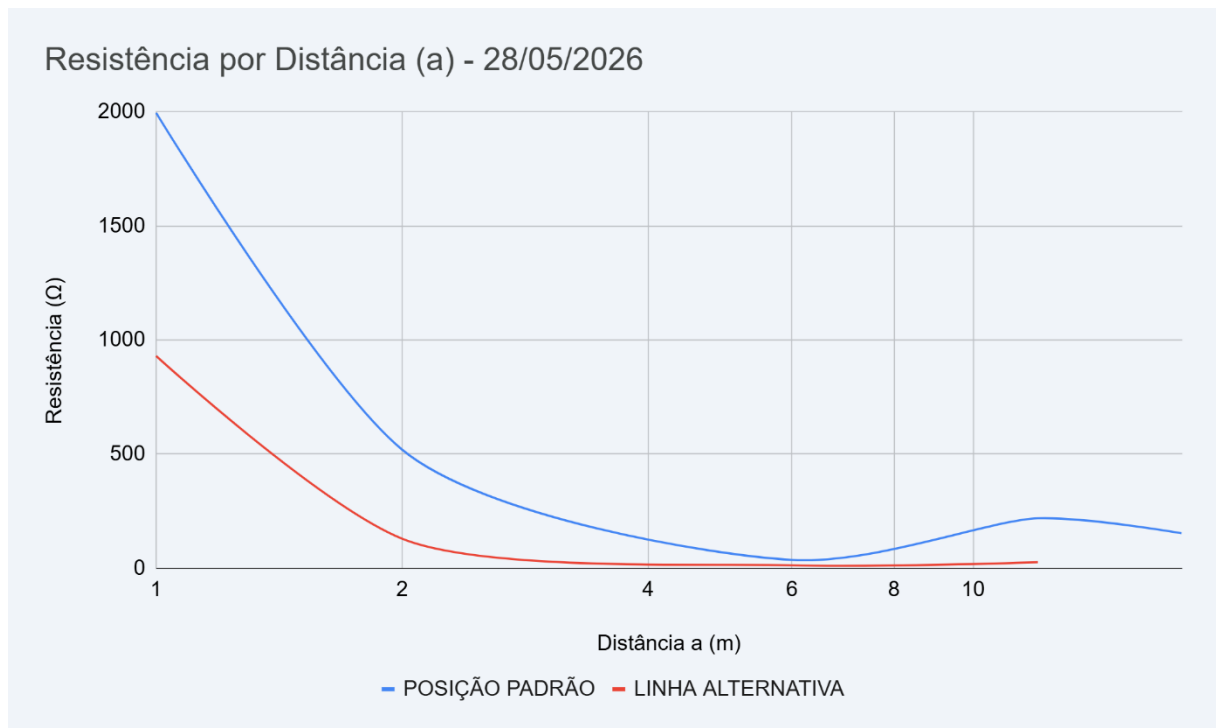
Após a análise dos resultados, observa-se que um subgrupo de eletrodos, composto por um representante de cada par avaliado (H2, CT1, M11, M22), apresentou desempenho superior ao de suas respectivas contrapartes. Verifica-se ainda que esse subgrupo está localizado em uma região central da área experimental, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 20 –Sub-região destacada



Fonte: Autores (2026).

A partir dessa observação, realizou-se uma medição complementar do solo pelo método de Wenner em uma linha alternativa, posicionada de forma centralizada na sub-região destacada. Os resultados obtidos, apresentados na Figura 20, corroboram a hipótese levantada, evidenciando valores de resistividade do solo inferiores ao observado na medição realizada no local padrão utilizado para as determinações de resistividade ao longo deste estudo.

Figura 21 – Gráfico da resistividade nas linhas original e alternativa

Fonte: Autores (2026).

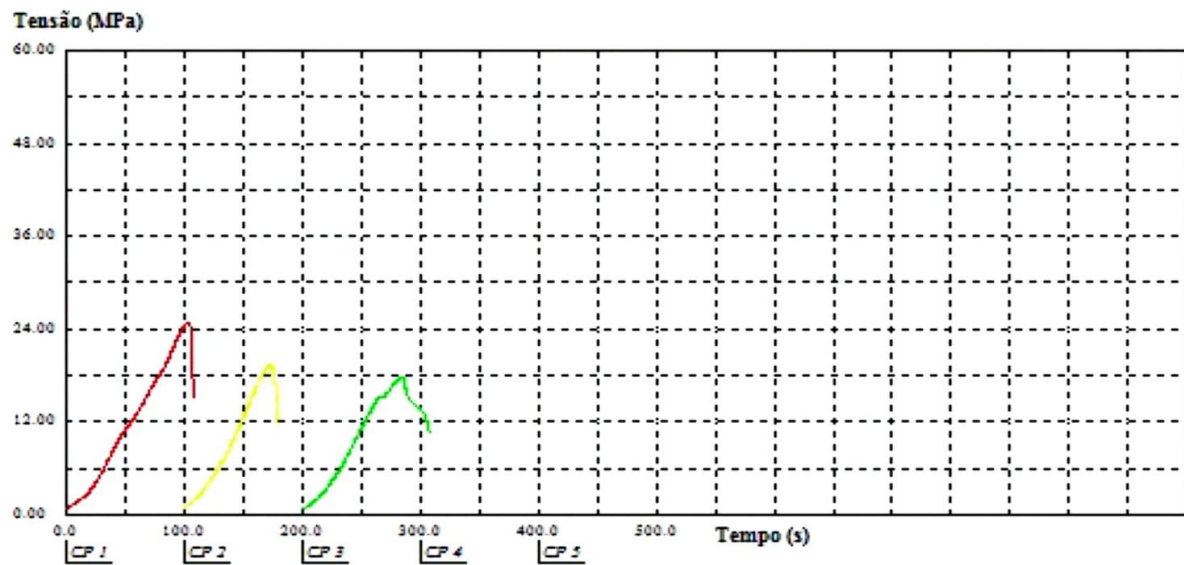
Em suma, a correlação entre os resultados de R_{terra} dos eletrodos instalados na sub-região e o perfil de resistividade obtido pelo método de Wenner ratifica a hipótese da existência de uma anomalia favorável no terreno localizado na área central do experimento. Evidencia-se que as características intrínsecas da região analisada proporcionam melhores condições de condutividade elétrica quando comparadas às da região de referência previamente estabelecida.

7.5. Resistência à compressão dos moldes projetados

Complementarmente, foi realizada a verificação da resistência à compressão dos materiais empregados na confecção dos eletrodos. Os resultados obtidos indicaram que as amostras M1 e M2 apresentaram valores dentro de uma margem aproximada de 10% em relação aos valores registrados para as amostras de concreto convencional (CT), evidenciando comportamento mecânico semelhante entre os compostos analisados. As Figuras 21, 22 e 23 apresentam os gráficos gerados pelo equipamento de ensaio durante as medições de resistência à compressão.

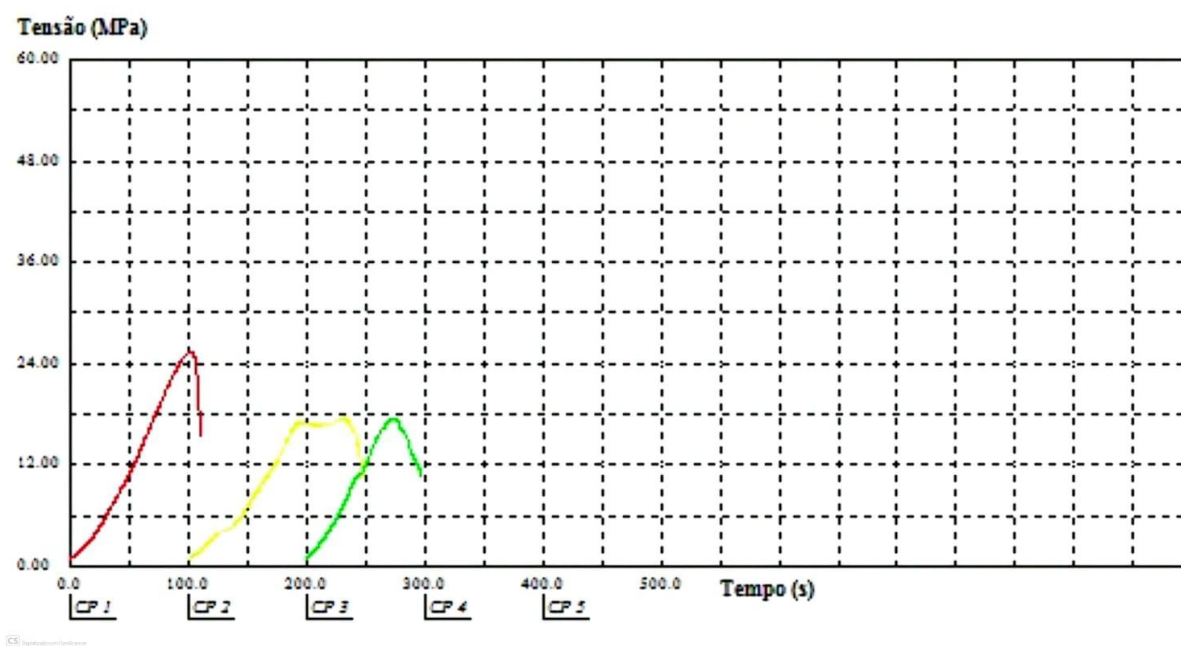
Os valores médios de tensão suportada pelos corpos de prova, após o descarte dos exemplares que apresentaram os resultados menos representativos, foram de 168.918,30 N para o concreto convencional (CT), 154.557,95 N para o material M1 e 174.025,70 N para o material M2. Observa-se que o compósito M2 apresentou o maior valor médio de resistência mecânica, enquanto o material M1 registrou o menor desempenho entre as composições avaliadas.

Figura 22 – Curvas de tensão do teste de compressão das amostras de concreto



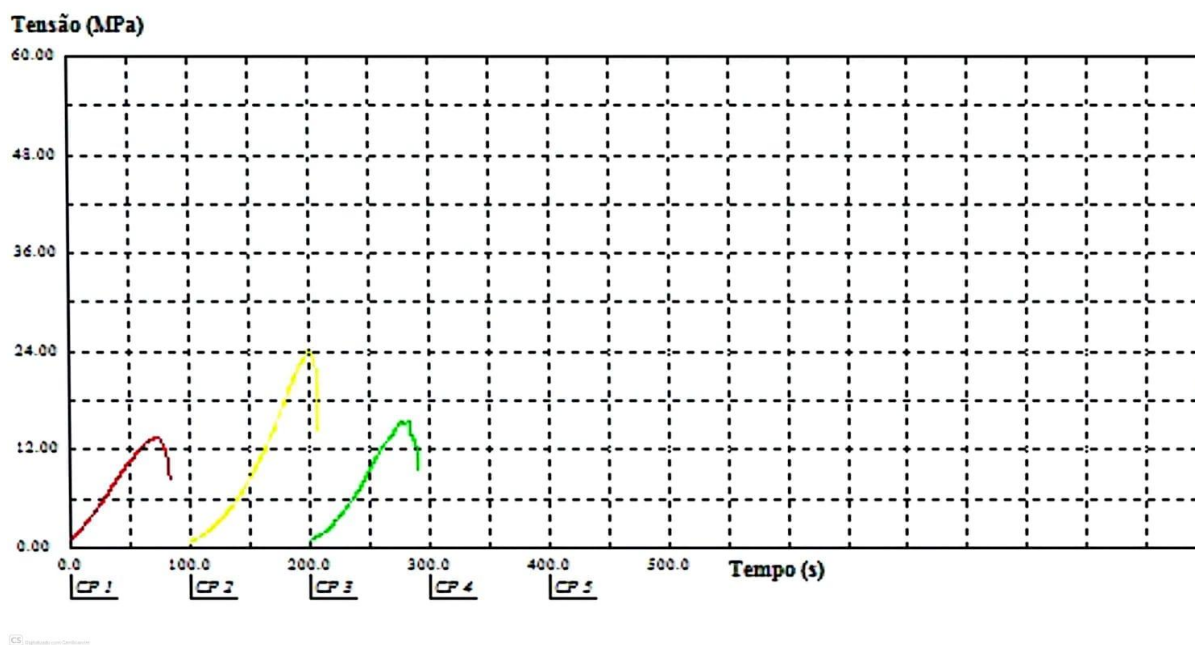
Fonte: Autores (2026).

Figura 23 – Curvas de tensão do teste de compressão das amostras de concreto com adição de 10% resíduo siderúrgico



Fonte: Autores (2026).

Figura 24 – Curvas de tensão do teste de compressão das amostras de concreto com adição de 20% resíduo siderúrgico



Fonte: Autores (2026)

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre as atividades desenvolvidas neste estudo, evidenciou-se que os sistemas de aterramento compostos por hastes encapsuladas em concreto apresentaram melhoria de desempenho, promovendo redução significativa da resistência de aterramento quando comparados às hastes de referência sem encapsulamento. Esse resultado reafirma a eficiência do conhecimento relacionado às técnicas de aterramento do tipo Ufer, nas quais a higroscopicidade dos materiais cimentícios contribui para a melhoria das características elétricas do sistema e mantém a resistência com maior constância durante o período de estiagem. Além disso, observou-se que todos os sistemas analisados apresentaram sensibilidade quanto a variações sazonais e às condições de umidade do solo.

Outro ponto a ser mencionado neste estudo refere-se à comparação das resistências médias obtidas para cada material cimentício utilizado. Observou-se que o sistema M1 apresentou valores próximos aos registrados para CT, fato que pode estar relacionado à menor quantidade de material siderúrgico empregado em sua composição. Por outro lado, o sistema M2 demonstrou desempenho superior em todas as datas analisadas. Os valores de resistência de aterramento (R_{terra}) obtidos por M2 situaram - se entre 25% e 32% dos valores medidos para H, enquanto CT apresentou resultados entre 35% e 48% em relação a H. A diferença de desempenho entre M2 e CT, correspondente a uma faixa de 10% a 16% em relação aos valores de H, representa uma melhoria direta de aproximadamente 24% a 39% do sistema M2 em comparação ao CT.

Vale ressaltar que nos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, verificou-se que a incorporação de resíduo siderúrgico ao material cimentício possibilitou manter propriedades mecânicas dos corpos de prova analisados em relação ao concreto tradicional. Os valores médios de resistência obtidos para as composições contendo limalha permaneceram próximos aos registrados para o concreto convencional, mantendo-se dentro de uma faixa compatível para aplicações estruturais. Destaca-se, ainda, que a composição M2 apresentou desempenho mecânico superior ao traço de referência CT. Dessa forma, os resultados obtidos sugerem a viabilidade técnica da utilização desse resíduo metálico em composições cimentícias destinadas a aplicações estruturais.

Observou-se a existência de uma sub-região do solo que apresentou desempenho significativamente superior em relação às demais áreas avaliadas. Essa região corresponde à porção central dos agrupamentos, onde, coincidentemente, encontra-se um exemplar de cada

configuração de aterramento analisada (H2, CT1, M22 e M11). Todos esses sistemas apresentaram resultados superiores quando comparados aos respectivos pares instalados em outras posições. Considerando que não existem diferenças construtivas relevantes entre os eletrodos fabricados e, principalmente, entre as hastes utilizadas, infere-se que as características do solo nessa região proporcionaram condições mais favoráveis à dissipação de corrente elétrica, contribuindo diretamente para a redução da resistência de aterramento dos sistemas instalados. A Figura 18 apresenta um esboço da região analisada.

Portanto, acredita-se que essa diferença seja decorrente das variações naturais do próprio solo, que pode apresentar diferentes níveis de porosidade e concentrações de materiais rochosos, fatores que influenciam diretamente na condução da corrente elétrica, influenciando também nas características elétricas do terreno.

Conclui-se que a incorporação de resíduo siderúrgico ao concreto utilizado no encapsulamento de eletrodos de aterramento apresenta potencial para melhorar o desempenho dos sistemas em comparação ao concreto convencional. Esse comportamento é atribuído ao aumento da condutividade elétrica proporcionado pela presença dos resíduos siderúrgicos metálicos na matriz cimentícia. Além disso, em nenhuma das condições analisadas foi observada redução significativa no desempenho dos eletrodos, evidenciando a viabilidade técnica da utilização desse material.

8.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Continuar as medições por um período adicional de seis meses, a fim de verificar o comportamento dos sistemas de aterramento durante períodos de estiagem mais severa.
- Após determinado período de operação, realizar a retirada dos eletrodos do solo para análise dos efeitos de corrosão nas hastes de aterramento, comparando os materiais propostos com os eletrodos de referência.
- Repetir o estudo utilizando a relação entre resíduo siderúrgico e cimento na proporção 1:1, visando avaliar a influência dessa composição no desempenho elétrico e mecânico dos eletrodos de aterramento.
- Avaliar a influência da aplicação de descargas elétricas impulsivas e com varrições de frequência elétrica no desempenho de sistemas de aterramento constituídos por eletrodos encapsulados em mistura cimentícia contendo material siderúrgico, por meio de um protótipo experimental.

- Analisar a aplicabilidade do encapsulamento em mistura cimentícia contendo material siderúrgico com diferentes diâmetros de encapsulamento.
- Realização de novos estudos utilizando maiores proporções de resíduo siderúrgico incorporadas ao concreto, com o objetivo de ampliar a base de dados experimentais e desenvolver um modelo matemático capaz de simular, em software, a aplicabilidade e o desempenho de sistemas de aterramento com materiais condutivos adicionados ao encapsulamento das hastes.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, W. F. Wan et al. Chemical enhancement materials for grounding purposes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 30., 2010, Cagliari. **Proceedings** [...]. Piscataway, NJ: IEEE, 2010. p. 1-6. DOI: 10.1109/ICLP.2010.7845836.
- AHMAD, W. F. H. Wan et al. Performance of Bentonite and Vermiculite Mixtures as Grounding Enhancement Materials. In: ASIA-PACIFIC INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING (APL), 12., 2023, Langkawi. **Proceedings** [...]. Piscataway, NJ: IEEE, 2023. p. 1-6. DOI: 10.1109/APL57308.2023.10181413.
- ARMOOSH, Salam R.; OLTULU, Meral. **Effect of different micro metal powders on the electrical resistivity of cementitious composites**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, [s. l.], v. 471, n. 3, p. 032075, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/3/032075>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/471/3/032075/pdf>. Acesso em: 15 dez. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2004
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117-1: Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geoeletrica**. Rio de Janeiro, 2020
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15749: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento**. Rio de Janeiro, 2009.
- BEZERRA, Gabriel V. N.; MOREIRA, Fernando A.; FERREIRA, Tarso V. Avaliação da resposta em frequência de aterramentos considerando solo com parâmetros dependentes da frequência utilizando o MEF. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 23., 2020, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: SBA, 2020. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/1522. Acesso em: 10 set. 2025.
- BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados Meteorológicos da Estação Automática de Palmas - TO (A009)**. Brasília, DF: INMET, 2026. Disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A009>. Acesso em: 5 jun. 2026.
- CAPELLI, Alexandre. **ENERGIA ELÉTRICA: qualidade e eficiência para aplicações industriais**. 1. Ed. São Paulo: Érica, 2013.
- CORRÊA, Gabriel Sirtori; GUIMARÃES, Kennedy José. Ensaio Mecânico de Compressão. **Revista Eletrônica AeroDesign Magazine**, v. 17, n. 1, p. 1-8, 2025. Disponível em: <https://irp.cdn-website.com/c1ca6eb9/files/uploaded/v17art1.pdf>. Acesso em: 3 mai. 2026.
- CUNHA, Matheus Clintom Ramalho *et al.* Análise da aplicação de concreto com restos de metais em sistemas de aterramento para redução da resistência elétrica. In: JORNADA DE

INICIAÇÃO CIENTÍFICA E EXTENSÃO DO IFTO, 16., 2025, Gurupi. **Anais [...]**. Gurupi: IFTO, 2025. p. 1-4.

DIAS, André Dantas. **Malhas de aterramento em subestações energizadas: medições e análises**. 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/9368>. Acesso em: 09 mar. 2025.

HASNI, Nur Aqilah Sofiyah *et al.* **Effect of Concrete Orientation as an Enhancement Material in Grounding System**. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, v864, n 012163, 2020.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 80-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**. New York: IEEE, 2015.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 81-2012: IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System**. New York: IEEE, 2025.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 142-2007: IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems**. New York: IEEE, 2007.

KINDERMANN, Geraldo; CAMPAGNOLO, Jorge Mário. **Aterramento Elétrico**. 3ª ed. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzato Editores, 1995.

KIZHLO, Marina; KANBERGS, Arvids. **Research of the Parameter Changes of the Grounding System**. WNWEC 2009 - World Non-Grid-Connected Wind Power Energy Conference: 2009.

LEITE, Carlos Moreira; PEREIRA FILHO, M. L. **Malhas de Terra: técnicas de aterramentos elétricos**. São Paulo: Editora Officina de Mydia, 2007

LEITE, Carlos Moreira; PEREIRA FILHO, M. L. **Técnicas de Aterramentos Elétricos: cálculos, projetos e softwares para aterramentos elétricos**. 4ª ed. São Paulo: Officina de Mydia Editora Ltda, 2001

LIM, Siow Chun; GOMES, Chandima; AB KADIR, M. Z. A. **Characterizing of Bentonite with Chemical, Physical and Electrical Perspectives for Improvement of Electrical Grounding Systems**. International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE, v. 8, n. 11447, Agosto de 2013.

PASA, Giuliano. Sistema de aterramento de domicílios. **Axial Engenharia**, 8 mai. 2018. Disponível em: <https://axialengenharia.eng.br/2018/05/08/sistema-de-aterramento-de-domicilios/>. Acesso em: 5 out. 2025. 1 imagem.

PAULINO, M. E. de C, PEREIRA JUNIOR, D. C. B. **Experiência da Celesc Distribuição nas Medições de Resistência de Aterramento em Subestações Energizadas Utilizando Variação de Frequência**. In: Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, XX.,

2012. Disponível em: <https://engenha.blogspot.com/p/experiencia-da-celesc-distribuicao-nas-31.html> . Acesso em: 10 de dez. 2025.

PEREIRA, João Batista José. **Modelagem de Incertezas em Sistemas de Aterramento Elétricos**. 2008. 131 f. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Brasília, 2008.

SANTOS, Lucas Vinícius Pereira dos; FONSECA, Marcelo Ilan Santos. **Análise da influência de resíduos siderúrgicos na redução da resistividade elétrica do concreto para aplicações em aterramento**. 2026. 40 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Campus Palmas, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Palmas, 2026.

SANTOS, Natã Braga Kelly dos *et al.* **Aterramento elétrico, uma revisão bibliográfica**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, São Paulo, v. 9, n. 5, p. 4656-4672, maio 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.51891/rease.v9i5.10380>. Acesso em: 2026.

SILVA FILHO, Antonio Marcelino da. **Análise da aplicação de diferentes materiais no processo de aterramentos elétricos**. 2023. 128 f.: il. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2023.

SIMON, Tamás K.; VASS, Viktória. The electrical resistivity of concrete. In: fib Symposium in Stockholm, 2012, Stockholm. **Anais [...]**. Stockholm: jan, 2012.

SINCHI S., Freddy M.; QUIZHPI P., Flavio A.; GUILLÉN, Hernán P. Soil Treatment to Reduce Grounding Resistance by Applying Low-Resistivity Material (LRM) and Chemical Ground Electrode in Different Grounding Systems Configurations. In: IEEE INTERNATIONAL AUTUMN MEETING ON POWER, ELECTRONICS AND COMPUTING (ROPEC), 2018, Ixtapa. **Proceedings [...]**. Piscataway, NJ: IEEE, 2018. p. 1-6. DOI: 10.1109/ROPEC.2018.8661367.

SOUZA, Kaisson T. de; CUNHA, Matheus Clintom Ramalho; TAMASHIRO, Márcio A.; ARRUDA, Matheus Gomes; MACEDO, Humberto Rodrigues; SILVA FILHO, Antonio M. da. **Análise da aplicação de concreto como material de melhoramento de sistemas de aterramento**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE), 2025. **Anais [...]**. 2025.

SOUZA, K. T.; MOURA, R. F.; CINTRA, G. **Estudo de alternativas para a construção de malhas de aterramento num solo com alta resistividade elétrica**. In: 2007 II Congresso de pesquisa e inovação da rede norte nordeste de educação tecnológica (CONNEPI). Brasil: CONNEPI, 2007. p. 1–8.

TELLÓ, Marcos; et al. **Aterramento elétrico impulsivo, em baixa e alta frequências**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2017

UFER, H. G. **Investigation and testing of footing-type grounding electrodes for electrical installations**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 63, 1042–1048.

VALENCIA, Juan David Cárdenas; GARCIA, Esteban Galvis. **Manual para la interpretación del perfil de resistividad obtenido al realizar el estudio de la resistividad del suelo a partir de las configuraciones del método de wenner**. 2011. 95 f. Projeto de Graduação – Tecnólogo Eléctrico, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2011.

VISACRO FILHO, Silvério. **Aterramentos elétricos**: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

WAHBA, Mahmoud et al. A Comprehensive Review on Soil-Enhancement Materials Additive to Grounding System. In: INTERNATIONAL MIDDLE EAST POWER SYSTEM CONFERENCE (MEPCON), 24., 2023, Mansoura. **Proceedings [...]**. Piscataway, NJ: IEEE, 2023. p. 1-6. DOI: 10.1109/MEPCON58725.2023.10462409.

WHITTINGTON, H.W.; McCARTER, J.; FORDE, M.C.. **The conduction of electricity through concrete**. Magazine of Concrete Research, v. 33, n. 114, mar 1981.

APÊNDICE A – Tabela de valores medidos no método de Wenner

Tabela 4 – Valores medidos pelo método de Wenner

Data	Direção (paralela à)	a (m)	1	2	6	12	18
20/03/2026	NS10		650	202	4	7.2	96.5
	LO05	R (Ω)	720	227	20.5	94	1.5
	MÉDIA		685	214.5	12.25	50.6	49
01/04/2026	NS10		222	105	76	109	72
	LO05	R (Ω)	250	141	65	74.5	66
	MÉDIA		236	123	70.5	91.75	69
17/04/2026	NS10		227	53.5	10.84	7.09	41
	LO05	R (Ω)	180	245	60	18.4	24.2
	MÉDIA		203.5	149.25	35.42	12.745	32.6
29/04/2026	NS10		682	175	35	44	199
	LO05	R (Ω)	827	321	26	160	45
	MÉDIA		754.5	248	30.5	102	122
13/05/2026	NS10		1180	151	115	191	330
	LO05	R (Ω)	1490	453	151	140	173
	MÉDIA		1335	302	133	165.5	251.5
28/05/2026	NS10		1890	510	52	253	204
	LO05	R (Ω)	2100	530	22	185	103
	MÉDIA		1995	520	37	219	153.5

Fonte: Autores (2026).

APÊNDICE B – Medições dos valores de R_{terra}

Tabela 5 – Valores medidos pelo método da queda de potencial

Data da Medição	Distância	Resistência dos sistemas de medição (Ω)							
		H1	H2	CT1	CT2	M11	M12	M21	M22
27/Mar	22m	4520	3560	1761	2130	1463	2530	1851	713
	24m	4560	3540	1765	2130	1470	2490	1868	717
	26m	4520	3580	1774	2140	1475	2530	1870	716
	MÉDIA	4533	3560	1767	2133	1469	2517	1863	715
08/abr	22m	2210	1480	626	850	600	929	705	314
	24m	2140	1400	642	930	608	915	670	314
	26m	2250	1370	661	968	580	932	646	299
	MÉDIA	2200	1417	643	916	596	925	674	309
22/abr	22m	4710	3410	1519	1947	1295	2070	1552	648
	24m	4720	3430	1524	1963	1303	2060	1542	655
	26m	4730	3480	1532	1955	1303	2070	1550	657
	MÉDIA	4720	3440	1525	1955	1300	2067	1548	653
06/mai	22m	5970	4100	1852	2410	1556	2280	1934	721
	24m	6090	4440	1950	2490	1573	2330	1978	725
	26m	6050	4390	1914	2520	1575	2350	1931	726
	MÉDIA	6037	4310	1905	2473	1568	2320	1948	724
21/mai	22m	9300	5810	2260	3690	2160	3000	2390	862
	24m	9540	5640	2390	3770	2200	3160	2490	861
	26m	9470	6010	2430	3780	2200	3420	2590	853
	MÉDIA	9437	5820	2360	3747	2187	3193	2490	859
03/Jun	22m	12180	8610	3140	4800	2770	4150	3050	974
	24m	12190	8330	3030	4850	2800	4170	3110	992
	26m	12200	8680	2920	4840	2770	4190	3130	1001
	MÉDIA	12190	8540	3030	4830	2780	4170	3097	989

Fonte: Autores (2026).

APENDICE C – Código do script Python para obtenção dos totais de precipitação do dia e se houve chuva na semana

```

import csv
import tkinter as tk
from tkinter import filedialog, messagebox
from datetime import datetime, timedelta

def calcular_chuva(date_entry, hour_entry, file_label, result_label, indicador_label):
    target_date_str = date_entry.get().strip()
    target_hour_str = hour_entry.get().strip()
    csv_filename = file_label.cget("text")

    # Validação 1: Verificar se o arquivo foi selecionado
    if not csv_filename or csv_filename == "Nenhum arquivo selecionado":
        messagebox.showerror("Erro", "Por favor, clique em 'Procurar Arquivo...' e selecione o arquivo CSV primeiro.")
        return

    # Validação 2: Verificar o formato da data e hora
    try:
        target_dt = datetime.strptime(f"{target_date_str} {target_hour_str.zfill(4)}",
"%d/%m/%Y %H%M")
    except ValueError:
        messagebox.showerror("Erro", "Formato de Data ou Hora inválido!\n\nA data deve ser DD/MM/AAAA (ex: 20/03/2026)\nA hora deve ter 4 dígitos (ex: 0000 ou 1200)")
        return

    # Janela de 24 horas prior
    start_dt_24h = target_dt - timedelta(hours=24)
    # Janela de 7 dias prior (7 * 24 = 168 horas)
    start_dt_7days = target_dt - timedelta(days=7)

    total_rain_24h = 0.0
    records_found_24h = 0
    chuva_nos_7_dias = False

    try:
        with open(csv_filename, mode='r', encoding='utf-8') as f:
            reader = csv.reader(f, delimiter=';')
            try:
                header = next(reader)
            except StopIteration:
                messagebox.showerror("Erro", "O arquivo selecionado está vazio.")
                return

            for row in reader:
                if not row or len(row) < 3:
                    continue

```

```

date_str = row[0].strip()
hour_str = row[1].strip().zfill(4)
rain_str = row[-1].strip()

if not date_str or not hour_str:
    continue

try:
    row_dt = datetime.strptime(f"{date_str} {hour_str}", "%d/%m/%Y %H%M")

    # Converter o valor da chuva tratando a vírgula decimal
    if rain_str:
        rain_val = float(rain_str.replace(',', '.'))
    else:
        rain_val = 0.0

    # 1. Cálculo das 24h anteriores
    if start_dt_24h < row_dt <= target_dt:
        total_rain_24h += rain_val
        records_found_24h += 1

    # 2. Verificação dos 7 dias anteriores
    if start_dt_7days < row_dt <= target_dt:
        if rain_val > 0.0:
            chuva_nos_7_dias = True

except ValueError:
    continue
except Exception as e:
    messagebox.showerror("Erro", f"Não foi possível ler o arquivo:\n{str(e)}")
    return

# Exibir resultado das 24h anteriores
result_text = f"Chuva Total (24h): {total_rain_24h:.2f} mm\n({records_found_24h}/24
leituras horárias encontradas)"
result_label.config(text=result_text, fg="#1e7e34")

# Exibir indicador dos 7 dias anteriores
if chuva_nos_7_dias:
    indicador_label.config(text="Choveu nos 7 dias anteriores? SIM", fg="#dc3545") #
Vermelho/Alerta para chuva
else:
    indicador_label.config(text="Choveu nos 7 dias anteriores? NÃO", fg="#007bff") # Azul
para seco

def procurar_arquivo(file_label):
    filename = filedialog.askopenfilename(
        title="Selecionar Arquivo CSV de Clima",
        filetypes=[("Arquivos CSV", "*.csv"), ("Todos os Arquivos", "*.*")]
    )

```

```

    if filename:
        file_label.config(text=filename, fg="black")

# --- Configuração da Interface Gráfica (GUI) ---
root = tk.Tk()
root.title("Calculadora de Chuva Acumulada")
root.geometry("480x420")
root.resizable(False, False)

# Instruções
instructions = tk.Label(root, text="Calcule a chuva acumulada nas 24h anteriores e verifique o
histórico.", font=("Arial", 10, "italic"))
instructions.pack(pady=10)

# Paine 1: Seleção de Arquivo
file_frame = tk.LabelFrame(root, text=" 1. Selecionar Arquivo de Dados ", padx=10, pady=10)
file_frame.pack(fill="x", padx=15, pady=5)

btn_browse = tk.Button(file_frame, text="Procurar Arquivo...", command=lambda:
procurar_arquivo(lbl_file))
btn_browse.pack(side="left", padx=5)

lbl_file = tk.Label(file_frame, text="Nenhum arquivo selecionado", fg="gray",
wraplength=300, justify="left")
lbl_file.pack(side="left", padx=5)

# Paine 2: Entradas de Parâmetros
input_frame = tk.LabelFrame(root, text=" 2. Digitar Parâmetros de Busca ", padx=10, pady=10)
input_frame.pack(fill="x", padx=15, pady=5)

tk.Label(input_frame, text="Data Alvo (DD/MM/AAAA):").grid(row=0, column=0,
sticky="w", pady=5)
entry_date = tk.Entry(input_frame, width=15)
entry_date.grid(row=0, column=1, sticky="w", pady=5, padx=5)
entry_date.insert(0, "20/03/2026") # Exemplo preenchido

tk.Label(input_frame, text="Hora Alvo (HHMM militar):").grid(row=1, column=0,
sticky="w", pady=5)
entry_hour = tk.Entry(input_frame, width=15)
entry_hour.grid(row=1, column=1, sticky="w", pady=5, padx=5)
entry_hour.insert(0, "0000") # Exemplo preenchido

# Botão de Ação
btn_calc = tk.Button(root, text="Calcular Chuva", font=("Arial", 11, "bold"), bg="#007bff",
fg="white",
command=lambda: calcular_chuva(entry_date, entry_hour, lbl_file, lbl_result,
lbl_indicador))
btn_calc.pack(pady=15)

# Paine 2 de Resultados

```

```
lbl_result = tk.Label(root, text="", font=("Arial", 12, "bold"), fg="#1e7e34")
lbl_result.pack(pady=5)

lbl_indicador = tk.Label(root, text="", font=("Arial", 12, "bold"))
lbl_indicador.pack(pady=5)

root.mainloop()
```

APÊNDICE D – Código do script para obtenção do total de chuva entre os intervalos das medições

```

import os
import tkinter as tk
from tkinter import messagebox, filedialog
from tkinter import ttk
import pandas as pd

class CalculadoraPrecipitacao:
    def __init__(self, root):
        self.root = root
        self.root.title("Calculadora de Precipitação")

        # Permitir que a janela se ajuste ao conteúdo, definindo apenas um tamanho mínimo seguro
        self.root.minsize(580, 480)

        # Configuração de estilo visual moderno
        self.style = ttk.Style()
        self.style.theme_use('clam')

        self.df = None
        self.arquivo_padrao = "generatedBy_react-csv (1).csv"

        # Container Principal
        main_frame = ttk.Frame(root, padding="20")
        main_frame.pack(fill=tk.BOTH, expand=True)

        # Título principal
        title_label = ttk.Label(main_frame, text="Consulta de Precipitação Total",
                                font=("Helvetica", 16, "bold"))
        title_label.pack(pady=(0, 15))

        # Paineiro do Arquivo
        file_frame = ttk.LabelFrame(main_frame, text=" Arquivo de Dados ", padding="10")
        file_frame.pack(fill=tk.X, pady=(0, 15))

        self.lbl_file_status = ttk.Label(file_frame, text="Nenhum arquivo carregado",
                                         wraplength=350)
        self.lbl_file_status.pack(side=tk.LEFT, padx=(5, 10), fill=tk.X, expand=True)

        btn_browse = ttk.Button(file_frame, text="Selecionar Arquivo",
                                command=self.buscar_arquivo)
        btn_browse.pack(side=tk.RIGHT)

        # Paineiro de Entradas de Data/Hora
        inputs_frame = ttk.LabelFrame(main_frame, text=" Intervalo de Tempo ", padding="15")
        inputs_frame.pack(fill=tk.X, pady=(0, 15))

        # Entradas do Início

```

```

        ttk.Label(inputs_frame, text="Data de Início (DD/MM/AAAA):").grid(row=0, column=0,
sticky=tk.W, pady=5)
        self.ent_start_date = ttk.Entry(inputs_frame, width=12)
        self.ent_start_date.grid(row=0, column=1, pady=5, padx=5)

        ttk.Label(inputs_frame, text="Hora de Início (HH:MM):").grid(row=0, column=2,
sticky=tk.W, pady=5, padx=(15, 0))
        self.ent_start_time = ttk.Entry(inputs_frame, width=8)
        self.ent_start_time.grid(row=0, column=3, pady=5, padx=5)

        # Entradas do Fim
        ttk.Label(inputs_frame, text="Data de Fim (DD/MM/AAAA):").grid(row=1, column=0,
sticky=tk.W, pady=5)
        self.ent_end_date = ttk.Entry(inputs_frame, width=12)
        self.ent_end_date.grid(row=1, column=1, pady=5, padx=5)

        ttk.Label(inputs_frame, text="Hora de Fim (HH:MM):").grid(row=1, column=2,
sticky=tk.W, pady=5, padx=(15, 0))
        self.ent_end_time = ttk.Entry(inputs_frame, width=8)
        self.ent_end_time.grid(row=1, column=3, pady=5, padx=5)

        # Botão de Cálculo
        self.btn_calculate = ttk.Button(main_frame, text="Calcular Total de Precipitação",
command=self.calcular, state=tk.DISABLED)
        self.btn_calculate.pack(fill=tk.X, pady=10)

        # Painel do Resultado (Ajustado com padding interno para evitar cortes)
        result_frame = ttk.LabelFrame(main_frame, text=" Resultado da Precipitação Total ",
padding="15")
        result_frame.pack(fill=tk.BOTH, expand=True)

        # Alterado: adicionado padding extra lateral (padx=20) e vertical (pady=15) para o texto
        respirar
        self.lbl_result = ttk.Label(result_frame, text="---", font=("Helvetica", 24, "bold"),
foreground="#1a73e8", justify=tk.CENTER, anchor="center")
        self.lbl_result.pack(fill=tk.BOTH, expand=True, padx=20, pady=15)

        if os.path.exists(self.arquivo_padrao):
            self.carregar_dados(self.arquivo_padrao)

        def buscar_arquivo(self):
            caminho = filedialog.askopenfilename(
                title="Selecione o arquivo CSV de dados",
                filetypes=[("Arquivos CSV", "*.csv"), ("Todos os arquivos", "*.*")]
            )
            if caminho:
                self.carregar_dados(caminho)

        def carregar_dados(self, caminho):
            try:

```

```

df = pd.read_csv(caminho, sep=';')
colunas_obrigatorias = ['Data', 'Hora (UTC)', 'Chuva (mm)']
for col in colunas_obrigatorias:
    if col not in df.columns:
        raise ValueError(f"A coluna obrigatória '{col}' não foi encontrada.")

df['Hora_str'] = df['Hora (UTC)'].astype(str).str.zfill(4)
df['Datetime'] = pd.to_datetime(df['Data'] + ' ' + df['Hora_str'], format='%d/%m/%Y
%H%M')
df['Chuva (mm)'] = df['Chuva (mm)'].astype(str).str.replace(',', '.').astype(float)

self.df = df
nome_breve = os.path.basename(caminho)
self.lbl_file_status.config(text=f"Carregado: {nome_breve}")
self.btn_calculate.config(state=tk.NORMAL)

min_dt = df['Datetime'].min()
max_dt = df['Datetime'].max()

self.ent_start_date.delete(0, tk.END)
self.ent_start_date.insert(0, min_dt.strftime('%d/%m/%Y'))
self.ent_start_time.delete(0, tk.END)
self.ent_start_time.insert(0, min_dt.strftime('%H:%M'))

self.ent_end_date.delete(0, tk.END)
self.ent_end_date.insert(0, max_dt.strftime('%d/%m/%Y'))
self.ent_end_time.delete(0, tk.END)
self.ent_end_time.insert(0, max_dt.strftime('%H:%M'))

except Exception as e:
    messagebox.showerror("Erro ao Carregar", f"Falha ao ler e processar o arquivo
CSV:\n{str(e)}")

def calcular(self):
    if self.df is None:
        return

    try:
        data_ini = self.ent_start_date.get().strip()
        hora_ini = self.ent_start_time.get().strip().replace(':', '').zfill(4)

        data_fim = self.ent_end_date.get().strip()
        hora_fim = self.ent_end_time.get().strip().replace(':', '').zfill(4)

        dt_inicio = pd.to_datetime(f"{data_ini} {hora_ini}", format='%d/%m/%Y %H%M')
        dt_fim = pd.to_datetime(f"{data_fim} {hora_fim}", format='%d/%m/%Y %H%M')

        if dt_inicio > dt_fim:
            messagebox.showwarning("Intervalo Inválido", "A data/hora de início deve ser
anterior à data de fim!")

```

```

        return

    mascara = (self.df['Datetime'] >= dt_inicio) & (self.df['Datetime'] <= dt_fim)
    df_filtrado = self.df[mascara]

    if df_filtrado.empty:
        # Caso não encontre dados, o tamanho da fonte foi ligeiramente reduzido para não
cortar
        self.lbl_result.config(text="Nenhum dado encontrado\npara este período.",
font=("Helvetica", 14, "bold"), foreground="#d93025")
    else:
        total_chuva = df_filtrado['Chuva (mm)'].sum()
        self.lbl_result.config(text=f"{total_chuva:.1f} mm", font=("Helvetica", 24, "bold"),
foreground="#1a73e8")

    except ValueError:
        messagebox.showerror("Erro de Formato", "Por favor, preencha usando os formatos
válidos:\nData: DD/MM/AAAA\nHora: HH:MM")
    except Exception as e:
        messagebox.showerror("Erro", f"Ocorreu um erro inesperado:\n{str(e)}")

if __name__ == "__main__":
    root = tk.Tk()
    app = CalculadoraPrecipitacao(root)
    root.mainloop()

```