



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

**LUCAS VINÍCIUS PEREIRA DOS SANTOS
MARCELO ILAN SANTOS FONSECA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS NA REDUÇÃO DA
RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO PARA APLICAÇÕES EM
ATERRAMENTO**

**PALMAS-TO
2026**

**LUCAS VINÍCIUS PEREIRA DOS SANTOS
MARCELO ILAN SANTOS FONSECA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS NA REDUÇÃO DA
RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO PARA APLICAÇÕES EM
ATERRAMENTO**

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

Orientador: Doutor Antônio Marcelino da
Silva Filho

Co-orientador: Eng. Eletricista Matheus
Gomes Arruda

**PALMAS-TO
2026**

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

S237a Santos, Lucas Vinicius Pereira Dos
Análise da influência de resíduos siderúrgicos na redução da resistividade elétrica do concreto para aplicações em aterramento / Lucas Vinicius Pereira Dos Santos, Marcelo Ilan Santos Fonseca. – Palmas, TO, 2026.
40 p. : 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. Aterramento Elétrico.. 2. Resistividade elétrica do solo.. 3. Resíduo Siderúrgico.. I. Fonseca, Marcelo Ilan Santos. II. Silva Filho, Antônio Marcelino da 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).

**LUCAS VINÍCIUS PEREIRA DOS SANTOS
MARCELO ILAN SANTOS FONSECA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE RESÍDUOS SIDERÚRGICOS NA REDUÇÃO DA
RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO PARA APLICAÇÕES EM
ATERRAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso (TCC),
apresentado ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins (IFTO), como parte das
exigências para a obtenção do título de
bacharel em engenharia elétrica.

Aprovado em: 04/02/2026

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO MARCELINO DA SILVA FILHO**
Data: 24/02/2026 15:52:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Antonio Marcelino da Silva Filho

Documento assinado digitalmente
 **KAISSON TEODORO DE SOUZA**
Data: 23/02/2026 18:18:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Kaison Teodoro de Souza

Documento assinado digitalmente
 **HUMBERTO RODRIGUES MACEDO**
Data: 24/02/2026 18:11:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Humberto Rodrigues Macedo

RESUMO

O aterramento elétrico é fundamental para a segurança e estabilidade de sistemas elétricos, enfrentando desafios em solos de alta resistividade, comuns na região de Palmas-TO. Este trabalho avalia a viabilidade técnica da utilização de resíduo siderúrgico local (limalha de aço/ferro) como aditivo condutivo em matrizes cimentícias para sistemas de aterramento. Foram produzidos 25 corpos de prova (CPs) com concentrações de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de resíduo em relação à massa de cimento. A resistividade elétrica foi monitorada pelo método de Wenner durante 84 dias. Os resultados indicam que a relação entre a concentração de resíduo e a redução da resistividade não é linear. O desempenho ótimo foi alcançado na concentração de 10%, apresentando uma redução de 13% na resistividade média final ($387,4 \Omega \cdot m$) em comparação ao grupo de controle ($445,5 \Omega \cdot m$). Concentrações superiores (15% e 20%) resultaram em aumento da resistividade, possivelmente devido à degradação da microestrutura do concreto. Observa-se que a utilização de 10% de limalha de aço é uma solução técnica e ambientalmente sustentável, alinhada aos princípios da economia circular.

Palavras-chave: Aterramento Elétrico. Resistividade elétrica do solo. Resíduo Siderúrgico. Corpos de prova.

ABSTRACT

Electrical grounding is essential for safety and stability in electrical systems, facing challenges in high-resistivity soils common in the Palmas-TO region. This study evaluates the technical feasibility of using local steel industry waste (steel/iron filings) as a conductive additive in cementitious matrices for grounding systems. Twenty-five samples were produced with concentrations of 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% of waste relative to the cement mass. Electrical resistivity was monitored using the Wenner method for over 84 days. The results indicate that the relationship between waste concentration and resistivity reduction is non-linear. Optimal performance was achieved at a 10% concentration, showing a 13% reduction in final average resistivity ($387,4 \Omega \cdot m$) compared to the control group ($445,5 \Omega \cdot m$). Higher concentrations (15% and 20%) resulted in increased resistivity, possibly due to degradation of the concrete microstructure. It is noticeable that using 10% steel filings is a technically and environmentally sustainable solution, aligned with circular economic principles.

Keywords: Electrical Grounding. Concrete Resistivity. Steel Waste. Sustainability. Samples.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DA TENSÃO DE PASSO EM SITUAÇÃO DE FALHA FASE-TERRA	17
FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO DA TENSÃO DE TOQUE EM SITUAÇÃO DE FALHA FASE-TERRA	17
FIGURA 3 – ESQUEMA DE MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO PELO MÉTODO DE WENNER.....	20
FIGURA 4 – COLETA DO MATERIAL USINADO NA RETIFICA BANDEIRANTES .	23
FIGURA 5 – COPO DE MEDIDA	24
FIGURA 7– MISTURA DOS SECOS	26
FIGURA 9 – CORPOS DE PROVA APÓS A MOLDAGEM.....	27
FIGURA 10 – TERRÔMETRO DIGITAL MEGABRAS MTD-2000E.....	28
FIGURA 11 – ENSAIO DE RESISTIVIDADE REALIZADO NO LABORATÓRIO GESSE	28
FIGURA 12 – ATINGINDO O LIMAR DE PERCOLAÇÃO.....	34
FIGURA 13 – COMPOSTOS ACUMULADOS NAS CONCENTRAÇÕES DE 15% E 20%	34

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 — DEFINIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	22
TABELA 2 – MASSA EM RELAÇÃO EM RELAÇÃO AO VOLUME DE 1L.	25
TABELA 3 – MASSA DOS MATERIAIS PARA 5 AMOSTRAS	25
TABELA 4 – MASSA DE RESÍDUO CALCULADA POR CADA CONCENTRAÇÃO	25
TABELA 5 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA CONCENTRAÇÃO 0%	30
TABELA 6 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA CONCENTRAÇÃO 5%	31
TABELA 7 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA CONCENTRAÇÃO 10%	31
TABELA 8 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA CONCENTRAÇÃO 15%	31
TABELA 9 - RESISTIVIDADE ELÉTRICA CONCENTRAÇÃO 20%	32
TABELA 10 - EVOLUÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA MÉDIA (P).....	32

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - MÉDIAS DAS RESISTIVIDADES	33
GRÁFICO 2 - RESISTIVIDADE MÉDIA FINAL	35

LISTA DE SIGLAS

A/C – Relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

CLE – Concretos Leves Estruturais

CPs – Corpos de Prova

EMI – Interferência Eletromagnética

EPIs – Equipamentos de Proteção Individual

GESEE – Grupo de Estudo em Sistemas de Energia Elétrica

GPR – Ground Potential Rise (Elevação do Potencial de Terra)

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IFTO – Instituto Federal do Tocantins

LEMP – Lightning ElectroMagnetic Pulse (Pulso Eletromagnético de Descarga Atmosférica)

MMSAE – Materiais de Melhoramento de Sistemas de Aterramento Elétrico

NBR – Norma Brasileira.

SLG – Single Line to Ground (Falha fase-terra, mencionada nas legendas das figuras).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. PROBLEMA DE PESQUISA.....	11
3. JUSTIFICATIVA	12
4. OBJETIVOS	13
4.1. Objetivo geral	13
4.2. Objetivos específicos.....	13
5. REFERENCIAL TEÓRICO	14
5.1. O sistema de aterramento elétrico.....	14
5.2. A resistividade do solo e seu impacto no aterramento	15
5.3. Tensão de passo e toque.....	16
5.4. Materiais de melhoramento para sistemas de aterramento (mmsae).....	18
5.5. Propriedades elétricas de materiais cimentícios	19
5.6. Método de Wenner	19
5.7. Economia circular na engenharia: a valorização de resíduos	21
6. METODOLOGIA.....	22
6.1. Produção dos corpos de prova.....	22
6.1.1. Coleta	23
6.1.2. Dosagem	23
6.1.3. Mistura.....	26
6.1.4. Moldagem.....	26
6.1.5. Cura.....	27
6.2. Metodologia de ensaios	27
7. RESULTADOS	29
7.1 Resultado da produção.....	29
7.2 Análise da performance dos corpos de prova	29
7.2.1 Comportamento do Concreto de Referência (Concentração 0%)	29
7.2.2 Comportamento dos corpos com resíduos siderúrgicos.....	30
7.2.3 Evolução da Resistividade Média para Todas as Concentrações	33
7.2.4 Identificação da Concentração Ótima.....	35
8. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	37
8.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

A eletricidade está presente em praticamente todas as atividades do dia a dia seja na iluminação pública, na operação de hospitais, na produção industrial ou até na comunicação digital. Para que essa energia chegue de forma segura e confiável, não basta apenas gerar e transmitir: é preciso adotar sistemas de proteção que preservem vidas e equipamentos. Entre essas proteções, o aterramento elétrico é um dos mais importantes, pois ajuda a evitar choques, reduzir danos causados por descargas atmosféricas e manter a estabilidade dos sistemas.

No Brasil, normas como a ABNT NBR 5410 e a NBR 14039 trazem critérios para a instalação e manutenção desses sistemas. Porém, em regiões como o Tocantins, é comum encontrar solos arenosos ou rochosos que, especialmente no período seco, apresentam alta resistividade. Nesses casos, atingir valores ideais de aterramento se torna um desafio. Técnicas tradicionais, como aumentar o número ou a profundidade de hastes, adicionar produtos químicos no solo ou instalar malhas, podem encarecer o projeto, exigir grandes áreas ou gerar impacto ambiental.

Uma alternativa possível é o uso de Materiais de Melhoramento do Sistema de Aterramento Elétrico (MMSAE), aplicados ao redor das hastes para criar uma zona mais condutiva. Este trabalho parte da ideia de aproveitar a limalha de aço/ferro, um resíduo de processos metalúrgicos, incorporando-a diretamente na matriz de concreto. Esta escolha, além de técnica, tem potencial para reduzir custos, reutilizando um resíduo que normalmente seria descartado, unindo eficiência elétrica e sustentabilidade.

Para investigar esta proposta, o presente trabalho propõe-se a avaliar, por meio de ensaios de bancada, a viabilidade técnica e o desempenho do uso de resíduo siderúrgico local como aditivo condutivo na redução da resistividade elétrica de corpos de prova de concreto. Especificamente, buscando-se produzir corpos de prova com diferentes concentrações do aditivo de forma padronizada, medir sua resistividade elétrica ao longo do tempo, analisar e comparar a evolução dos resultados para determinar a influência da concentração do resíduo no compósito.

2. PROBLEMA DE PESQUISA

Os solos arenosos presentes em diversas regiões do Brasil são um desafio para implementação de sistemas de aterramento que visam proteger a vida humana, devido estes solos encarecerem muito o projeto e dificultar a implementação. Logo esta pesquisa vem com o intuito de verificar a eficácia da aplicação de resíduos siderúrgicos no concreto das hastes de aterramento, buscando reduzir a resistividade do solo próximo as hastes e baratear a implementação destes sistemas utilizando materiais que seriam descartados.

3. JUSTIFICATIVA

A relevância deste projeto está apoiada em três pilares que se complementam e se reforçam mutuamente. No campo técnico-científico, a pesquisa avança sobre uma área ainda pouco explorada na engenharia elétrica: a utilização de resíduos metálicos incorporados a matrizes cimentícias. Embora haja uma base consolidada de estudos sobre Materiais para Melhoria de Sistemas de Aterramento Elétrico (MMSAE) (IEEE Std 80, 2013; NBR 7117, 2020), são raras as investigações que comparam, de forma direta, o comportamento do concreto como meio para aditivos condutores. A análise dessa comparação tem potencial para gerar informações inéditas sobre os mecanismos de condução elétrica em compósitos cimentícios, atendendo às diretrizes de medição e avaliação propostas pela IEEE Std 81-2012. Esses resultados podem servir de suporte para a criação de novas tecnologias e soluções voltadas à proteção e eficiência de sistemas de aterramento, alinhadas às necessidades do setor elétrico (PINTO JÚNIOR, 2015; SOARES, 2018).

No aspecto ambiental, o projeto se destaca por propor a valorização de um resíduo industrial, inserindo-se no contexto da economia circular (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015). Tal abordagem contribui para reduzir a quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários, diminuir a extração de matérias-primas e incentivar processos produtivos mais limpos, em consonância com as diretrizes da ABNT NBR ISO 14001:2015. Ao associar eficiência técnica e responsabilidade ambiental, a pesquisa aproxima a prática da engenharia elétrica das metas globais estabelecidas na Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015).

No âmbito social e regional, a proposta apresenta carácter aplicado e de baixo custo, oferecendo uma alternativa viável para pequenas e médias instalações, especialmente em áreas onde as condições do solo dificultam a implantação de sistemas de aterramento convencionais. Essa realidade é comum na região Norte do Brasil (ANEEL, 2018), onde muitas vezes não há recursos financeiros para soluções complexas. Ao propor um método tecnicamente eficaz e economicamente acessível, o trabalho deixa de ser apenas uma investigação acadêmica e se transforma em uma resposta concreta a uma necessidade real, fortalecendo a relação entre o Instituto Federal do Tocantins (IFTO) e o setor produtivo local, com reflexos positivos no desenvolvimento socioeconômico da região.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo geral

Avaliar, por meio de ensaios experimentais controlados em bancada, a viabilidade técnica e o desempenho do uso de resíduo siderúrgico local (limalha de aço/ferro), como aditivo condutivo, na redução da resistividade elétrica de corpos de prova de concreto, visando aplicações em sistemas de aterramento.

4.2. Objetivos específicos

- Produzir corpos de prova (CPs) de concreto em diferentes concentrações de resíduo siderúrgico, sendo cada concentração com 5 amostras.
- Medir e analisar se há influência da concentração do resíduo siderúrgico na redução da resistividade elétrica do concreto ao longo do tempo e identificar a composição com melhor performance em relação a base.

5. REFERENCIAL TEÓRICO

5.1. O sistema de aterramento elétrico

O sistema de aterramento é uma componente de engenharia de vital importância. Suas funções podem ser categorizadas, segundo Kindermann e Campagnolo (1995), em três grandes áreas:

1. **Proteção e Segurança:** É a função mais conhecida. O aterramento protege os seres vivos contra os perigos do choque elétrico, limitando a diferença de potencial a que uma pessoa pode ser submetida ao tocar em uma estrutura indevidamente energizada. Ele também protege as edificações e equipamentos contra os efeitos devastadores de descargas atmosféricas, oferecendo um caminho seguro para que a enorme energia do raio seja dissipada na terra.
2. **Funcionalidade de Sistemas:** O aterramento estabelece um plano de referência de potencial (0 V) estável e comum para todo o sistema elétrico. Esta referência é essencial para o funcionamento correto de equipamentos eletrônicos, que operam com baixas tensões e são sensíveis a flutuações. Em sistemas de potência, ele possibilita o escoamento de correntes de desequilíbrio e facilita a detecção de faltas à terra.
3. **Controle de Interferência Eletromagnética (EMI):** Em ambientes com muitos equipamentos eletrônicos e de comunicação, o aterramento adequado de blindagens e carcaças é crucial para minimizar o acoplamento de ruídos e interferências, garantindo a integridade dos sinais.

A falha em qualquer uma dessas funções pode levar a consequências que vão desde a perda de dados e danos a equipamentos até incêndios e fatalidades.

Uma das soluções de aterramento mais eficazes e de baixo custo é o aterramento estrutural, também conhecido como Sistema Ufer. Desenvolvido por Herbert G. Ufer, este método utiliza a própria malha de vergalhões de aço da fundação de concreto de uma edificação como eletrodo de aterramento (Ufer, 1942). Conforme a norma IEEE Std 80-2013, este arranjo apresenta alto desempenho devido a dois fatores principais:

- A ampla superfície de contato proporcionada pela malha de vergalhões, que é muito superior à de hastes convencionais, reduzindo significativamente a resistência de dispersão.
- As propriedades do concreto, que por ser higroscópico, retém umidade do solo, e por ser alcalino, promove a passivação do aço, protegendo-o contra corrosão e garantindo uma condutividade estável.

O sucesso do sistema Ufer comprova que o concreto é um meio robusto e viável para a interface com o sistema de aterramento (Pinto Júnior, 2015). Partindo deste conceito consolidado, o presente trabalho busca ir além: em vez de apenas utilizar o concreto como meio passivo, propõe-se potencializar sua condutividade intrínseca através da adição de um aditivo condutivo. A ideia é complementar a condução iônica natural do concreto com uma condução eletrônica, via uma rede de partículas metálicas dispersas, aproveitando sua alta condutividade elétrica e alinhando-se a práticas de sustentabilidade e economia circular.

5.2. A resistividade do solo e seu impacto no aterramento

A resistência de um eletrodo de aterramento (R) pode ser simplificada entendida como a resistência que o solo oferece à dispersão da corrente a partir do eletrodo. Para uma haste vertical, por exemplo, a fórmula clássica demonstra que a resistência é diretamente proporcional à resistividade do solo (ρ), conforme descrito na Equação 1:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} * \ln \frac{4L}{d} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde L é o comprimento da haste e d é seu diâmetro. Fica evidente que a resistividade (ρ) é o parâmetro dominante.

Um solo com o dobro da resistividade resultará em uma resistência de aterramento aproximadamente duas vezes maior.

A resistividade do solo é uma propriedade geofísica que exerce influência direta na eficiência de sistemas de aterramento, sendo resultado da interação de diversos fatores (Friedman, 2005). Entre eles, a umidade é o mais relevante, pois a água

presente nos poros do solo dissolve sais e forma um eletrólito capaz de conduzir corrente elétrica; por isso, solos secos apresentam alta resistividade.

A composição química, especialmente a presença de íons provenientes de sais, ácidos ou bases, também eleva a condutividade. A temperatura é outro fator determinante: quando a água congela, a resistividade aumenta significativamente, já que o gelo atua como isolante. Características físicas como granulometria e compactação influenciam o resultado — solos argilosos, por exemplo, retêm mais umidade e apresentam menor resistividade que solos arenosos. Por essa razão a medição da resistividade no local, com destaque para o método de Wenner, é etapa fundamental no desenvolvimento de qualquer projeto de aterramento.

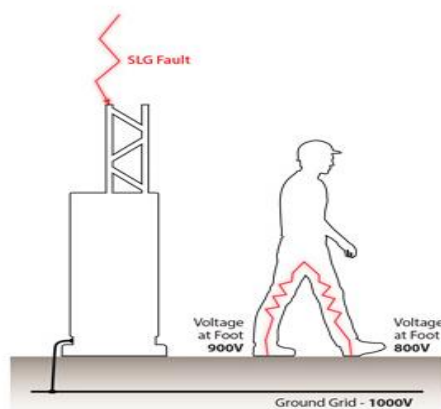
5.3. Tensão de passo e toque

Quando uma corrente elétrica de falta (proveniente de um curto-circuito ou descarga atmosférica) é dispersada no solo por um sistema de aterramento, ela não desaparece instantaneamente. A corrente flui através do volume de terra ao redor do eletrodo, criando um aumento de potencial elétrico naquela região, conhecido como Elevação do Potencial de Terra (GPR - Ground Potential Rise). Este potencial é máximo no ponto de injeção da corrente e diminui com a distância.

O gradiente de potencial resultante na superfície do solo é a origem de dois riscos elétricos primários para pessoas que se encontrem nas proximidades, conforme definido pela norma IEEE Std 80 (2013) e ilustrado nas Figuras 1 e 2.

A tensão de passo (Figura 1) é a diferença de potencial elétrico que surge entre os pés de uma pessoa ao caminhar sobre a superfície energizada, considerando-se uma distância padrão de um metro entre eles. Este fenômeno ocorre porque cada pé está em um ponto do solo com um potencial elétrico diferente. Em correntes de falta elevadas, a tensão de passo pode ser suficiente para provocar contrações musculares involuntárias, levando à perda de equilíbrio e quedas. Em situações extremas, pode induzir fibrilação ventricular, representando um risco significativo à vida (Token Engenharia, 2023).

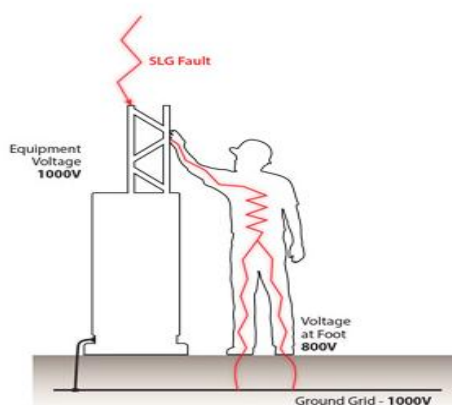
Figura 1 – Representação da tensão de passo em situação de falha fase-terra



Fonte: Token Engenharia (2023).

Por sua vez, a tensão de toque (Figura 2) representa a diferença de potencial elétrico entre a mão de uma pessoa que entra em contato com uma estrutura energizada (com potencial GPR) e seus pés, que estão em um ponto do solo com um potencial elétrico inferior. Esta situação é considerada a mais perigosa, pois cria um caminho para a corrente elétrica circular através do tronco da pessoa, incluindo órgãos vitais como o coração. Se a tensão de toque for suficientemente alta, a corrente resultante pode facilmente causar fibrilação ventricular, parada cardíaca e queimaduras graves, sendo uma das principais causas de morte em acidentes elétricos (Visacro Filho, 2002).

Figura 2 – Representação da tensão de toque em situação de falha fase-terra



Fonte: Token Engenharia (2023)

A magnitude de ambas tensões são influenciadas por fatores como a resistividade do solo, a magnitude da corrente de falta e a geometria do sistema de aterramento. Solos de alta resistividade tendem a concentrar a corrente, gerando gradientes de potencial mais acentuados e, conseqüentemente, tensões de passo e de toque mais elevadas.

O principal objetivo de um projeto de malha de aterramento em subestações e grandes instalações é justamente controlar esses gradientes de potencial, distribuindo a corrente de forma mais uniforme pelo solo. Medidas como a instalação de malhas equipotenciais, o uso de camadas de brita de alta resistividade na superfície e a utilização de equipamentos de proteção individual (EPIs) são fundamentais para mitigar esses riscos e garantir que, mesmo em uma situação de falta, as tensões de passo e de toque permaneçam abaixo dos limites fisiológicos seguros para o corpo humano.

5.4. Materiais de melhoramento para sistemas de aterramento (mmsae)

Em sistemas elétricos, a eficiência do aterramento está diretamente relacionada à capacidade de dispersar correntes de falta de forma segura e eficaz. No entanto, conforme destaca Silva Filho (2023, p. 29), essa eficiência pode ser severamente comprometida quando o solo apresenta elevada resistividade elétrica aparente. Nessas situações, e especialmente quando a instalação de eletrodos adicionais não é viável, uma solução adotada é a ampliação do diâmetro efetivo da haste por meio da modificação do solo adjacente, técnica que emprega Materiais de Melhoramento de Sistemas de Aterramento Elétrico (MMSAE). Trata-se de envolver o eletrodo com um material de baixa resistividade, capaz de reduzir a resistência de aterramento R_{TERRA} e garantir melhor desempenho do sistema.

A IEEE Std 80 recomenda, entre os materiais convencionais, a bentonita e o concreto. A bentonita é uma argila expansiva e higroscópica, com boa capacidade inicial de redução da resistência; contudo, tende a perder eficiência em solos secos, podendo encolher e se descolar do eletrodo, resultando no aumento de R_{TERRA} (Silva Filho, 2023). O concreto, por outro lado, oferece maior estabilidade mecânica e custo reduzido, mas apresenta resistividade superior à da bentonita hidratada (Silva Filho, 2023).

Com o intuito de superar essas limitações, Silva Filho (2023) propôs a aplicação de materiais higroscópicos empregados na Engenharia Civil, especialmente em concretos leves estruturais (CLE), como solução inovadora para MMSAE. A proposta consistiu no uso de misturas de cimento com vermiculita, serragem e argila expandida, buscando, por meio da retenção de umidade, manter a condutividade e reduzir a R_{TERRA} tanto em períodos secos quanto chuvosos (Silva Filho, 2023).

5.5. Propriedades elétricas de materiais cimentícios

O concreto é um material heterogêneo cujo comportamento elétrico é complexo. Como demonstrado por Whittington, McCarter e Forde (1981), a condução elétrica nesses compósitos ocorre principalmente pela fase eletrolítica — ou seja, pela movimentação de íons como Ca^{2+} , Na^+ , K^+ e OH^- presentes na solução aquosa que permeia os poros da pasta de cimento.

Os agregados silicosos (como areia e brita) são reconhecidos como excelentes isolantes elétricos, o que faz com que eles atuem como obstáculos ao fluxo de corrente elétrica. Esse comportamento justifica, por exemplo, por que a argamassa (composta por cimento e areia) apresenta resistividade elétrica ligeiramente menor em comparação ao concreto (que incorpora também brita), devido à menor fração volumétrica de material isolante presente no primeiro (Wei et al., 2011).

Para reduzir a resistividade elétrica de compósitos cimentícios, a incorporação de partículas condutivas, como grafite, fibras de carbono ou metálicas, é uma estratégia eficaz. Pesquisas indicam que a adição de pós metálicos, como cobre e ferro, pode diminuir significativamente a resistividade elétrica; em ensaios laboratoriais, compósitos contendo até 20 % em peso desses materiais apresentaram reduções expressivas, sendo o cobre o mais eficiente (Abdel-Jawad; Al-Rawashdeh, 2019). De forma semelhante, estudos sobre o uso de escória de aço como substituição parcial ou total de agregados demonstram que o material, além de melhorar a condutividade elétrica, promove ganhos ambientais por reutilizar resíduos industriais (Mohamed et al., 2022).

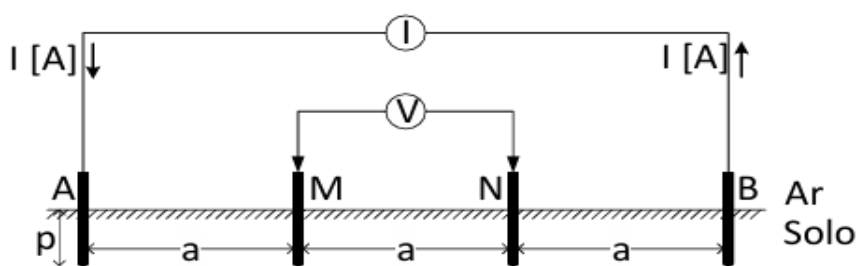
5.6. Método de Wenner

O método de Wenner é uma das técnicas mais amplamente utilizadas para a

determinação da resistividade elétrica do solo, parâmetro fundamental no projeto de sistemas de aterramento. Desenvolvido por Frank Wenner em 1915 no Bureau of Standards dos Estados Unidos, o método baseia-se no princípio de injeção de corrente elétrica no solo e na medição da diferença de potencial resultante, permitindo calcular a resistividade de forma indireta a partir da Lei de Ohm e da geometria do arranjo de medição (Wenner, 1915; IEEE Std 81-2012).

Seguindo o modelo da Figura 3, o ensaio é realizado por meio do posicionamento de quatro hastes condutoras (geralmente metálicas) cravadas no solo, equidistantes entre si e alinhadas em linha reta. As duas hastes externas (C1 e C2) têm a função de injetar a corrente elétrica no solo, enquanto as duas internas (P1 e P2) medem a diferença de potencial gerada pela circulação dessa corrente.

Figura 3 – Esquema de medição da resistividade do solo pelo método de Wenner.



Fonte: Silva Filho (2023).

A distância uniforme entre as hastes é denominada espaçamento "a" e, a partir dela, a resistividade do solo (ρ) é determinada pela Equação 2:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (\text{Eq.2})$$

Em que:

ρ = resistividade elétrica do solo ($\Omega \cdot \text{m}$)
 a = espaçamento entre as hastes (m)
 R = resistência medida (Ω)

A profundidade de cravação das hastes deve ser relativamente pequena (tipicamente inferior a 5% do espaçamento) para que as medições representem a

resistividade na camada superficial do solo, que é a mais relevante para projetos de aterramento (ABNT NBR 7117-1:2013; IEEE Std 81-2012).

A principal aplicabilidade do método de Wenner em projetos de aterramento reside na obtenção de valores confiáveis de resistividade do solo em diferentes profundidades, por meio da variação do espaçamento “a”. Essa informação é essencial para:

- Dimensionar o sistema de aterramento de forma a atingir valores de resistência compatíveis com as normas técnicas (como ABNT NBR 5410 e ABNT NBR 15751);
- Selecionar a geometria mais eficiente (malhas, hastes verticais, anéis, cabos enterrados) para dispersão da corrente elétrica;
- Avaliar a necessidade de tratamentos de solo (uso de materiais de melhoramento, aditivos ou aumento da profundidade das hastes);
- Atender requisitos de segurança contra choques elétricos.

5.7. Economia circular na engenharia: a valorização de resíduos

O modelo tradicional de produção, baseado no ciclo linear de "extrair, usar e descartar", tem se mostrado insustentável, esgotando recursos naturais e gerando um volume crescente de resíduos. Em contraposição a essa lógica, emerge a economia circular. Proposta e popularizada por instituições como a Fundação Ellen MacArthur, seu objetivo fundamental é desassociar o desenvolvimento econômico do consumo de recursos finitos, mantendo produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de utilidade e valor em todos os momentos.

Este projeto de pesquisa aplica diretamente esse princípio ao investigar o uso da limalha de aço/ferro, um resíduo comum da indústria metalmeccânica, como uma matéria-prima tecnológica. Na economia linear, essa limalha é um passivo industrial, gerando custos de descarte e ocupando espaço em aterros. Sob a ótica da economia circular, reavalia-se recurso valioso, cuja alta condutividade elétrica pode ser aproveitada para solucionar um desafio da engenharia elétrica: o aterramento em solos de alta resistividade.

6. METODOLOGIA

A fim de embasar o experimento de bancada, foi admitida a hipótese de que a adição de resíduo siderúrgico ao concreto causará uma redução significativa e dependente da concentração na sua resistividade elétrica, em relação à amostra de controle (0%). Espera-se que este efeito não seja linear, apresentando um ponto de saturação em concentrações mais elevadas, o que indicará uma faixa de desempenho ótimo para a aplicação.

A presente pesquisa será classificada como quantitativa e experimental. O método experimental será conduzido em ambiente controlado do laboratório Grupo de Estudo em Sistemas de Energia Elétrica (GESEE) em bancada, visando estabelecer relações de causa e efeito entre as variáveis independentes (concentração do resíduo e tipo de matriz) e a variável dependente (resistividade elétrica).

6.1. Produção dos corpos de prova

O experimento será baseado na comparação de 5 grupos distintos na composição de material siderúrgico, cada um com 5 réplicas para garantir a validade estatística, totalizando 25 corpos de prova, conforme Tabela 1.

Tabela 1 — Definição dos corpos de prova

Nomenclatura	Concentração de Resíduo	Nº de Amostras
C0	0%	5
C5	5%	5
C10	10%	5
C15	15%	5
C20	20%	5
Total		25 amostras

Fonte: Autoria própria.

Nota: A concentração de resíduo é calculada em relação à massa de cimento.

6.1.1. Coleta

O resíduo (limalha de aço/ferro) foi obtido em apenas uma coleta no dia 01/10/25 por meio de parceria com a retifica Bandeirantes localizada em Palmas-TO. Foi coletado 6,21 kg, conforme a Figura 4, de material proveniente apenas de uma amostra para garantir granulometria similar e o padrão da pesquisa.

Figura 4 – Coleta do material usinado na retifica Bandeirantes



Fonte: Autoria própria, 2025.

6.1.2. Dosagem

Na engenharia civil e na tecnologia do concreto, o termo traço refere-se à proporção quantitativa, seja em volume ou em massa, dos materiais que compõem uma mistura cimentícia. Ele estabelece a "receita" do concreto, definindo a relação entre o aglomerante (cimento), o agregado miúdo (areia), o agregado graúdo (brita) e a água. A escolha do traço é um fator determinante para as propriedades finais do concreto endurecido, como sua resistência mecânica, trabalhabilidade e durabilidade.

Para este estudo, foi adotado o traço convencional em volume de 1:2:3, o que corresponde a uma parte de cimento para duas partes de areia e três partes de brita. A escolha deste traço se deu por ser uma proporção amplamente utilizada na

construção civil para concretos de uso geral, garantindo que os resultados do compósito aditivado com o resíduo siderúrgico possam ser comparados com uma base de referência consolidada e de conhecimento prático.

Todos os materiais (cimento, areia, brita, resíduo e água) foram pesados em balança, respeitando o traço definido de 1:2:3 e os volumes. Foram utilizados 2 recipientes como unidade de volume, um copo medidor de 500 ml e uma amostra do molde, conforme as Figuras 5 e 6.

Figura 5 – copo de medida



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 6 – Molde dos CPs



Fonte: Autoria própria, 2025.

Após usar a tara da balança com finalidade de desprezar a massa dos recipientes, foi utilizado o volume do molde de 3,871 L medido em balança com água para determinar o volume total necessário para preencher os 5 moldes. Utilizando o volume do molde, multiplicando-o por 5 amostras e acrescentando 25% a mais de volume para sobrar material na composição chegou-se ao resultado de 24,19 L como volume total seguindo o cálculo abaixo:

$$Volume\ total = 1,25 \cdot 3,871 \cdot 5 = 24,19\ L$$

Em posse do volume total necessário para fazer as 5 amostras, foi calculado o volume de cada material seguindo o traço do volume, representado na Tabela 2.

transformando esses dados de volume em massa, encontrou-se os dados de massa de cada material em 1L utilizando o copo medidor de 500 ml visando encontrar a massa de cada elemento para realizar os 5 corpos de provas, conforme a Tabela 3. Com a massa do cimento determinada, calculou-se a quantidade de material siderúrgico, sendo que a concentração é feita diretamente sobre a massa do cimento, seguindo os dados da Tabela 4.

Tabela 2 – Massa em relação em relação ao volume de 1L.

Material	Proporção	Volume total (L)	Volume p/5 amostras (L)
Cimento	1/6	24,19	4,03
Areia	2/6	24,19	8,06
Brita	3/6	24,19	12,10

Fonte: Autoria própria, 2026.

Tabela 3 – Massa dos materiais para 5 amostras

Material	Massa em 1L (kg)	Volume p/5 amostras (L)	Massa p/5 amostras (kg)
Cimento	1,19	4,03	4,78
Areia	1,63	8,06	13,16
Brita	1,37	12,10	16,60

Fonte: Autoria própria, 2026.

Tabela 4 – Massa de resíduo calculada por cada concentração

Grupo	Massa cimento (kg)	concentração	Massa resíduo (kg)
C0	4,03	0%	0,000
C5	4,03	5%	0,202
C10	4,03	10%	0,403
C15	4,03	15%	0,605
C20	4,03	20%	0,806

Fonte: Autoria própria, 2026.

6.1.3. Mistura

Para garantir a homogeneidade, foi realizado a mistura dos materiais secos (cimento, areia, brita e resíduo) antes da adição de água, explicitado na Figura 7. A mistura final foi feita de forma manual dentro carrinho de mão, pois a quantidade de material era pequena para a betoneira. A quantidade de água necessária para deixar a mistura homogênea, conforme a Figura 8, foi de 2,93 L definida de forma arbitrária e mantida como padrão em todas as misturas, chegou-se em uma relação água/cimento (A/C) de 0,727 conforme o calculado abaixo:

$$\frac{\text{Água}}{\text{cimento}} = \frac{2,93}{4,03} = 0,727$$

Figura 7– mistura dos secos



Fonte: Autoria própria, 2025.

Figura 8 - homogeneização com água



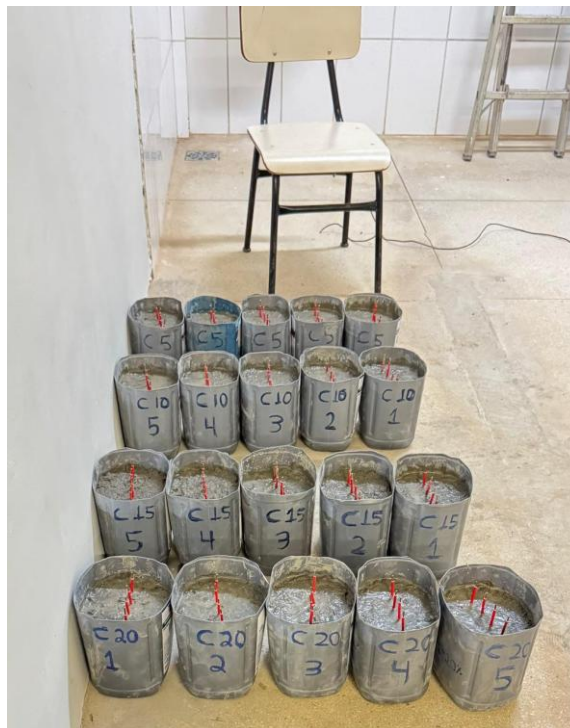
Fonte: Autoria própria, 2025.

6.1.4. Moldagem

Durante o processo de moldagem, foi colocado uma quantidade padrão de concreto medido em balança visando garantir o erro mínimo nas medições. Todo o processo de mistura e modelagem foi executada no mesmo ambiente para garantir o mesmo padrão. Após a moldagem e compactação do concreto foi adicionado os 4

elétrodos de cobre com espaçamento de 3 cm em relação à borda do molde e 2 cm entre eles. Os moldes após finalizados foram identificados e deixados reservados no laboratório GESEE, conforme a Figura 9.

Figura 9 – Corpos de prova após a moldagem



Fonte: Autoria própria, 2025.

6.1.5 Cura

Após a moldagem todas as amostras ficaram no mesmo ambiente durante 7 dias para a cura do cimento e solidificação antes de realizar o início das medições de resistividade.

6.2. Metodologia de ensaios

As medições de resistividade foram realizadas utilizando um Terrômetro Digital Megabras MTD-2000e (Figura 10) de quatro terminais. O princípio de funcionamento consiste em injetar uma corrente alternada (I) de frequência conhecida através dos dois elétrodos externos e medir a diferença de potencial (V) nos dois elétrodos internos. A resistência elétrica (R_m) é obtida pela Lei de Ohm ($R_m = V/I$). A resistividade elétrica (ρ) é então calculada pela equação citada no item 5.6. Foram

realizadas 8 medições periódicas seguindo o mesmo modelo de medição apresentado na Figura 11.

Figura 10 – Terrômetro Digital Megabras MTD-2000e.



Fonte: Megabras (s.d.).

Figura 11 – Ensaio de resistividade realizado no laboratório GESSE



Fonte: Autoria própria, 2025.

7. RESULTADOS

7.1 Resultado da produção

Neste capítulo são apresentados os dados obtidos experimentalmente a partir do monitoramento dos 25 corpos de prova (CPs) de concreto durante o período de 84 dias (12 semanas), compreendido entre 31/10/2025 e 23/01/2026. Os corpos de prova após o período de cura e durante o processo de medição não apresentou deterioramento aparente, mantendo suas características físicas similares entre todos os corpos.

Esta análise tem como objetivo validar a hipótese da pesquisa e cumprir o segundo objetivo específico, visando identificar a influência da concentração do resíduo siderúrgico na resistividade do compósito e determinar a faixa de desempenho ótimo para a aplicação proposta.

7.2 Análise da performance dos corpos de prova

A apresentação dos resultados está dividida em quatro seções: a análise individual do grupo de controle, a análise dos resultados dos corpos com resíduos, investigação comparativa entre todos os grupos ao longo do tempo, e a discussão consolidada sobre a influência da concentração do aditivo.

7.2.1 Comportamento do Concreto de Referência (Concentração 0%)

O primeiro passo da análise consiste em compreender o comportamento elétrico do concreto padrão (traço 1:2:3 sem aditivo), que serve como base de comparação para todos os outros grupos e tem a função primordial de isolar o comportamento do concreto tradicional dos grupos com adição de resíduo siderúrgico. A Tabela 5 apresenta os valores de resistividade (ρ) medidos para as cinco amostras do grupo de controle (C0-1 a C0-5) ao longo de 84 dias.

Tabela 5 - Resistividade Elétrica Concentração 0%

Amostra	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8
C0-1	140	181	204	245	230	260	274	308
C0-2	178	225	259	314	299	321	330	400
C0-3	87	106	120	146	130	135	140	169
C0-4	262	371	444	573	584	622	653	844
C0-5	175	239	282	360	357	379	397	507
Média	168,3	224,3	261,8	327,5	320	343,3	358,7	445,5
Desvio Padrão	63,88	96,94	119,44	159,08	170,08	180,10	189,65	254,93
Variância	4080,70	9398,20	14265,20	25306,25	28926,50	32434,45	35967,20	64988,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

Observa-se uma tendência clara e consistente de aumento da resistividade elétrica ao longo do tempo. A média do grupo (Média 0%) aumentou de 168,3 $\Omega \cdot m$ para 445,5 $\Omega \cdot m$, um acréscimo de aproximadamente 165%. Este comportamento é classicamente esperado em materiais cimentícios e está diretamente ligado à perda de umidade. A condução elétrica no concreto convencional é predominantemente iônica, ocorrendo através da água livre presente nos poros da pasta de cimento. À medida que o concreto cura e seca, essa água é consumida na hidratação ou evapora, reduzindo os caminhos disponíveis para a corrente e, conseqüentemente, elevando a resistividade.

Nota-se também uma alta variabilidade entre as amostras, como evidenciado pelo elevado desvio padrão. A amostra C0-4, por exemplo, apresentou uma resistividade final quase cinco vezes maior que a da amostra C0-3. Esta dispersão é característica da natureza heterogênea do concreto, onde pequenas diferenças na compactação, distribuição de agregados e porosidade resultam em comportamentos elétricos distintos.

7.2.2 Comportamento dos corpos com resíduos siderúrgicos

As Tabelas 6, 7, 8 e 9 apresentam, respectivamente, os resultados de resistividade elétrica mensurados para os corpos de prova com concentrações de 5%, 10%, 15% e 20% de resíduo siderúrgico.

Tabela 6 - Resistividade Elétrica Concentração 5%

Amostra	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8
C5-1	203	287	329	420	437	472	493	620
C5-2	197	272	308	387	398	430	464	584
C5-3	118	167	185	234	238	257	264	324
C5-4	102	140	153	194	198	209	228	281
C5-5	211	300	341	442	460	488	520	658
Média	166,2	233,2	263,2	335,4	346,2	371,2	393,8	493,4
Desvio Padrão	51,85	74,05	87,53	113,42	119,95	129,05	136,96	176,88
Variância	2688,70	5482,70	7662,20	12864,80	14387,20	16652,70	18758,20	31284,80

Fonte: Autoria própria, 2026.

Tabela 7 - Resistividade Elétrica Concentração 10%

Amostra	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8
C10-1	111	158	174	220	229	248	267	340
C10-2	126	173	191	240	243	263	297	377
C10-3	146	200	226	285	292	314	333	415
C10-4	128	184	206	264	272	290	309	390
C10-5	140	195	219	283	287	308	337	415
Média	130,2	182	203,2	258,4	264,6	284,6	308,6	387,4
Desvio Padrão	13,57	16,99	21,09	28,09	27,57	28,49	28,58	31,17
Variância	184,20	288,50	444,70	789,30	760,30	811,80	816,80	971,30

Fonte: Autoria própria, 2026.

Tabela 8 - Resistividade Elétrica Concentração 15%

Amostra	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8
C15-1	174	248	276	361	359	391	425	542
C15-2	186	259	281	357	360	391	421	534
C15-3	218	298	335	432	445	477	505	639
C15-4	164	236	259	331	327	352	392	488
C15-5	132	187	210	272	272	293	323	401
Média	174,64659	245,532	272,2	350,6	352,6	380,8	413,2	520,8
Desvio Padrão	31,38	40,25	44,94	57,74	62,82	67,08	65,60	86,64
Variância	984,56	1620,04	2019,70	3334,30	3946,30	4500,20	4303,20	7505,70

Fonte: Autoria própria, 2026.

Tabela 9 - Resistividade Elétrica Concentração 20%

Amostra	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6	Medição 7	Medição 8
C20-1	135	186	209	259	260	285	300	377
C20-2	121	167	186	231	232	256	272	324
C20-3	271	380	434	574	585	634	650	865
C20-4	200	280	322	415	425	457	480	626
C20-5	221	302	350	454	451	482	533	655
Média	189,6	263	300,2	386,6	390,6	422,8	447	569,4
Desvio Padrão	62,06	87,53	102,73	142,27	145,63	154,99	159,63	220,88
Variância	3851,80	7661,00	10554,20	20240,30	21208,30	24022,70	25482,00	48787,30

Fonte: Autoria própria, 2026.

A Tabela 10 apresenta os valores médios de resistividade elétrica (ρ) calculados para os cinco corpos de prova de cada grupo em todas as datas de medição.

Tabela 10 - Evolução da Resistividade Elétrica Média (ρ)

Data	Dias	C0 (0%)	C5 (5%)	C10 (10%)	C15 (15%)	C20 (20%)
31/10/25	7	168,3	166,2	130,2	174,6	189,6
07/11/25	14	224,3	233,2	182	245,5	263
13/11/25	20	261,8	263,2	203,2	272,2	300,2
21/11/25	28	327,5	335,4	258,4	350,6	386,6
28/11/25	35	320	346,2	264,6	352,6	390,6
05/12/25	42	343,3	371,2	284,6	380,8	422,8
19/12/25	56	358,7	393,8	308,6	413,2	447
23/01/26	91	445,5	493,4	387,4	520,8	569,4

Fonte: Autoria própria, 2026.

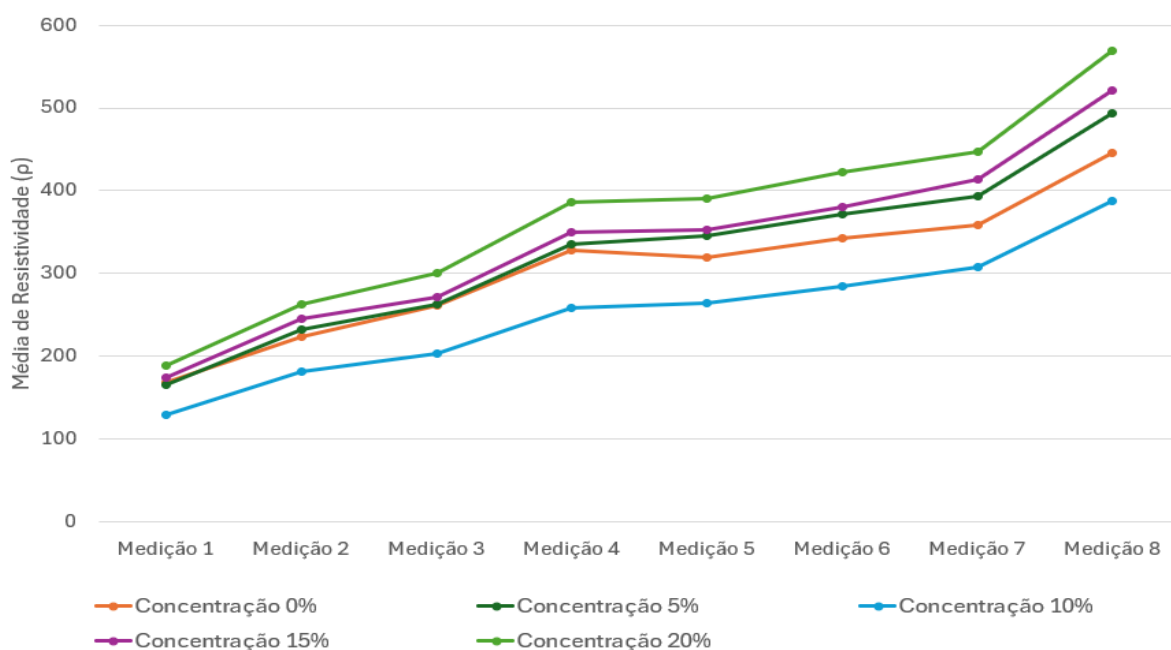
Observa-se que, semelhante ao concreto de referência, houve um aumento consistente da resistividade ao longo do tempo. Comportamento esperado também devido ao processo de hidratação do cimento e a evaporação da água livre.

E conforme a Tabela 10 é possível notar uma leve queda ou estabilização nos valores entre as medições 4 (21/11) e 5 (28/11), observada principalmente nos grupos C-0 e C-10. Esse fenômeno pode ser atribuído a variações na umidade relativa do ar ambiente no período, uma vez que o concreto é um material higroscópico e tende a entrar em equilíbrio com o meio.

7.2.3 Evolução da Resistividade Média para Todas as Concentrações

O Gráfico 1 ilustra a evolução das resistividades médias obtidas ao longo dos 84 dias de monitoramento.

Gráfico 1 - Médias das resistividades



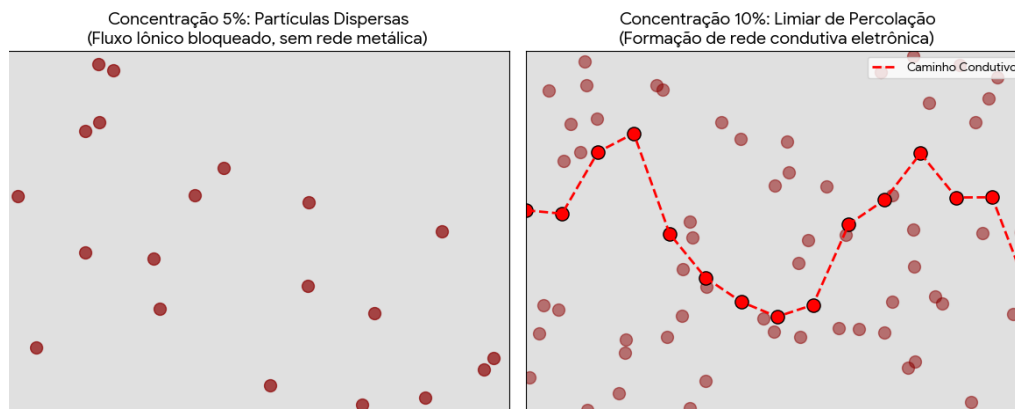
Fonte: Autoria própria, 2026.

A análise do Gráfico 1 revela resultados de grande interesse científico e técnico, demonstrando que o comportamento do Grupo de 5% contrariando a hipótese inicial, a adição de 5% de resíduo resultou em um compósito com resistividade ligeiramente superior à do controle durante a maior parte do ensaio. Isso sugere que, nesta concentração, as partículas metálicas estão muito dispersas para formar uma rede condutiva e atuam primariamente como obstáculos ao fluxo de corrente iônica, tornando o material menos condutivo,

O desempenho do Grupo de 10% destaca-se por estar significativamente abaixo de todas as outras em todas as medições. Isso indica que, nesta concentração, foi atingido o limiar de percolação, onde as partículas de ferro se tornam próximas o suficiente para formar uma rede condutiva contínua. Este novo caminho de condução eletrônica se sobrepõe ao efeito de barreira, resultando em uma drástica redução da resistividade total do compósito, comparando as duas primeiras concentrações na

Figura 12 fica mais claro as possíveis causas desse desempenho.

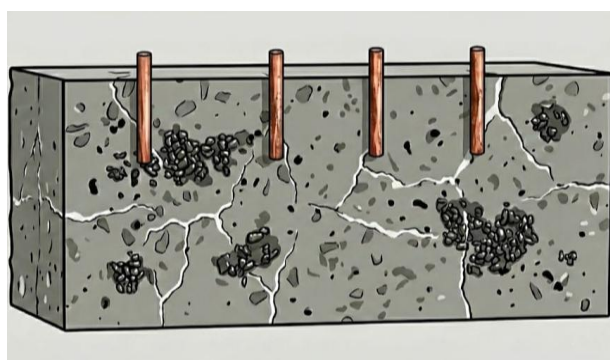
Figura 12 – Atingindo o limiar de percolação



Fonte: Autoria própria, 2026.

Nos Grupos de 15% e 20% surpreendentemente, percebe-se uma inversão na dinâmica, onde estas concentrações apresentaram resistividades finais ainda maiores que as do grupo de controle. Este comportamento sugere que a adição excessiva do resíduo prejudica a microestrutura da pasta de cimento. As partículas metálicas, por não se integrarem quimicamente à matriz, podem gerar microfissuras e aumentar a porosidade, comprometendo a integridade dos caminhos de condução iônica e eletrônica, como pode ser exemplificado pela Figura 13, onde os compostos ficam concentrados.

Figura 13 – Compostos acumulados nas concentrações de 15% e 20%

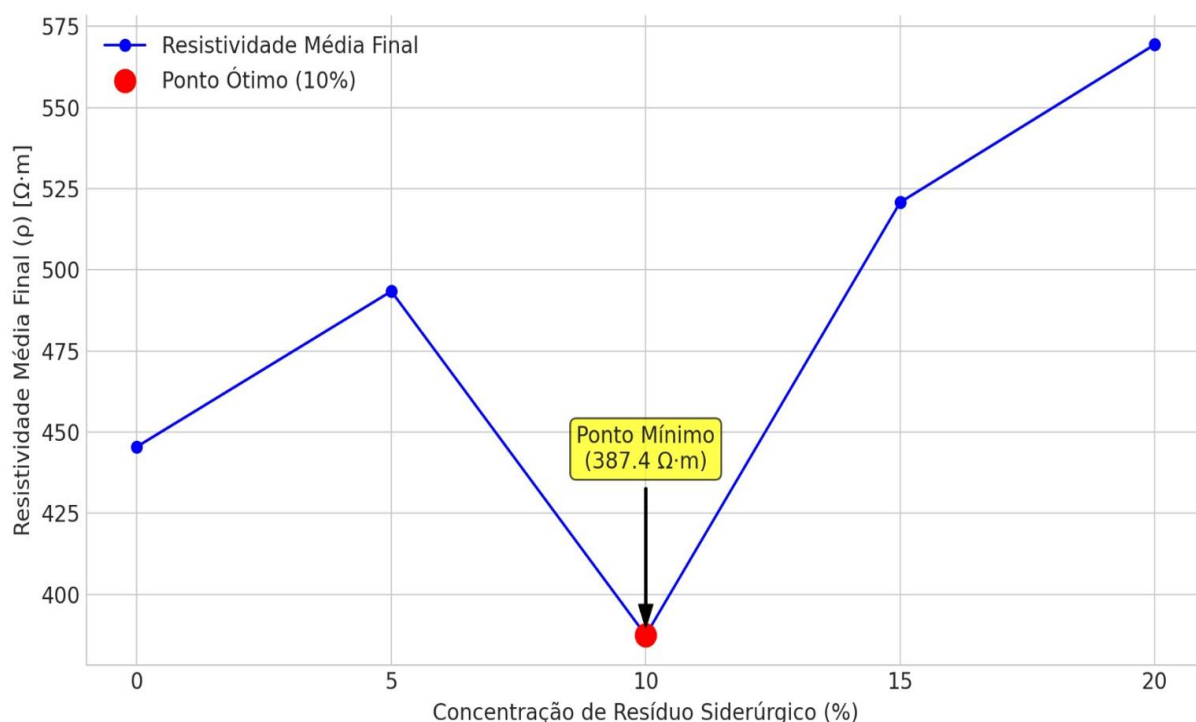


Fonte: Autoria própria, 2026.

7.2.4 Identificação da Concentração Ótima

Para visualizar claramente o impacto da concentração, plotou-se a resistividade média final (medição 8, aos 84 dias) em função do percentual de resíduo adicionado. O resultado, apresentado no Gráfico 2, revela a existência de um ponto de desempenho ótimo.

Gráfico 2 - Resistividade média final



Fonte: Autoria própria, 2026.

A análise do Gráfico 2 confirma que o comportamento da resistividade em função da concentração não é linear. O desempenho ótimo é claramente alcançado na concentração de 10%, onde a resistividade média final foi de 387,4 $\Omega \cdot m$, representando uma redução de 13% em relação ao concreto de referência (445,5 $\Omega \cdot m$).

Outro destaque relevante é a análise da variabilidade. O desvio padrão final para o grupo de 10% foi de apenas 31,17, enquanto para os grupos de 0%, 15% e 20% foi de 254,93; 86,64; e 220,88, respectivamente. Isso indica que, além de ser

mais condutivo, o compósito com 10% de resíduo é eletricamente mais homogêneo e previsível, uma característica de grande valor para aplicações de engenharia.

Em suma, os resultados experimentais validam, parcialmente, a hipótese de que a adição do resíduo pode reduzir a resistividade, mas revelam que existe uma faixa de concentração ótima em torno de 10%, co validando que a relação de proporção de resíduos não é linear em relação à redução da resistividade. Concentrações abaixo deste limiar são ineficazes, e concentrações acima são prejudiciais, provavelmente devido à degradação da microestrutura do concreto.

8. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo teve como objetivo geral avaliar, por meio de ensaios de bancada, a viabilidade técnica e o desempenho do uso de resíduo siderúrgico local (limalha de aço/ferro) como aditivo condutivo na redução da resistividade elétrica de corpos de prova de concreto. A pesquisa foi motivada pelo desafio técnico de projetar sistemas de aterramento eficazes em solos de alta resistividade, como os encontrados no estado do Tocantins, e pela oportunidade de aplicar os princípios da economia circular, valorizando um resíduo industrial local.

Após a execução da metodologia experimental e a análise detalhada dos dados coletados ao longo de 84 dias, chegou-se a conclusões que respondem ao problema de pesquisa e à hipótese formulada.

A hipótese central do trabalho foi confirmada, a adição do resíduo siderúrgico é parcialmente eficaz, com uma importante ressalva. É apenas dentro de uma faixa de concentração ótima que a adição é eficaz. O comportamento não é linear como é exposto no Gráfico 2. Concentrações baixas (5%) mostraram-se ineficazes, resultando em um material com resistividade ligeiramente superior à do concreto de referência, provavelmente por as partículas atuarem como obstáculos ao fluxo iônico sem formarem uma rede condutiva própria.

Os resultados experimentais indicaram que a concentração de 10% de resíduo em relação à massa de cimento representa o ponto de máximo desempenho. Nesta concentração, obteve-se a menor resistividade elétrica ao longo de todo o período de ensaio, culminando em um valor final de $387,4 \Omega \cdot m$, o que representa uma redução de 13% em comparação ao concreto de referência ($445,5 \Omega \cdot m$). Este resultado sugere que o limiar de percolação, onde uma rede condutiva eletrônica eficaz é formada, foi atingido em torno desta concentração.

Um resultado secundário de grande importância foi a observação de que o compósito com 10% de resíduo apresentou uma variabilidade de resultados drasticamente menor que todos os outros grupos. O desvio padrão significativamente mais baixo indica que, além de mais condutivo, o material se torna eletricamente mais homogêneo e previsível. Esta é uma característica altamente desejável para qualquer material de engenharia, pois aumenta a confiabilidade do seu desempenho em aplicações práticas.

Notou-se que concentrações de 15% e 20% são prejudiciais ao desempenho elétrico do compósito. Nestes grupos, a resistividade final foi significativamente superior à do concreto de referência. Acredita-se que o excesso de aditivo metálico compromete a microestrutura da pasta de cimento, aumentando a porosidade e gerando microfissuras que prejudicam tanto a condução iônica quanto a eletrônica.

Em resposta direta ao problema de pesquisa, este trabalho conclui que é tecnicamente viável utilizar o resíduo siderúrgico para reduzir a resistividade elétrica do concreto, e que a faixa de concentração ótima para este fim se encontra em torno de 10%.

8.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Apesar dos resultados promissores, este trabalho representa um primeiro passo e abre caminho para novas investigações. Com base nas conclusões e limitações do presente estudo, sugerem-se as seguintes linhas de pesquisa futuras.

Isto inclui realizar ensaios de corrosão acelerada ou monitoramento eletroquímico para avaliar o impacto da adição do resíduo na durabilidade da haste de aterramento. Este é o principal desafio a ser superado para a viabilização prática da tecnologia.

Instalar protótipos em campo, utilizando o compósito de concreto com 10% de resíduo para encapsular hastes de aterramento. Monitorar a resistência de aterramento ao longo de um ciclo sazonal completo (períodos de seca e chuva) para validar o desempenho em condições reais

Investigar como diferentes faixas de tamanho das partículas do resíduo siderúrgico influenciam na resistividade, buscando otimizar ainda mais o limiar de percolação

Replicar o experimento utilizando a matriz de argamassa para comparar o desempenho e verificar se a ausência do agregado graúdo de fato potencializa o efeito condutivo do resíduo.

Realizar ensaios de resistência à compressão para quantificar o impacto da adição do resíduo nas propriedades mecânicas do concreto, verificando sua adequação para uso estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-JAWAD, Y.; AL-RAWASHDEH, A. **Effect of Different Micro Metal Powders on the Electrical Resistivity of Cementitious Composites**. Jordan Journal of Civil Engineering, v. 13, n. 1, p. 1–12, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/331303905>.
- ABNT. **NBR 7117-1:2013 – Medição da resistividade elétrica do solo – Parte 1: Método de Wenner**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2004.
- 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.
- FRIEDMAN, S. P. **Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review**. Computers and Electronics in Agriculture, v. 46, n. 1-3, p. 45-70, 2005.
- IEEE. **IEEE Std 80-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**. New York: IEEE, 2013.
- IEEE. **IEEE Std 81-2012 – IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System**. IEEE Power & Energy Society, 2012.
- JOHN, V. M.; PRASAD, P. S. R. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo: EdUSP, 2000.
- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. 5. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1995.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- MOHAMED, A. M. et al. **Evaluation of Conductive Concrete Made with Steel Slag Aggregates**. Case Studies in Construction Materials, v. 17, e01341, 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/365139422>.
- PINTO JÚNIOR, O. **O Livro dos Raios**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- SILVA FILHO, A. M. **Análise da Aplicação de Diferentes Materiais no Processo de Aterramentos Elétricos**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2023.
- SOARES, L. M. **Aterramentos Elétricos: Conceitos e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2018.

TOKEN ENGENHARIA. **Tensão de passo e tensão de toque: fórmula, cálculo e medidas de proteção.** 2023. Disponível em: <https://tokenengenharia.com.br/tensao-de-passo-e-tensao-de-toque-formula-calculo-e-medidas-de-protecao/>. Acesso em: 9 ago. 2025.

TERRÔMETRO Digital MTD-2000e. [S. l.]: Megabras, [s.d.]. 1 imagem (color.). Disponível em: <https://www.megabras.com/pt-br/produtos/terrometro/terrometro-digital-MTD2000e.php>. Acesso em: 9 ago. 2025.

UFER, H. G. **Investigation and Testing of Footing-Type Grounding Electrodes for Electrical Installations.** U.S. War Department, 1942.

VISACRO FILHO, S. **Aterramentos Elétricos.** São Paulo: Artliber, 2002.

WEI, X. et al. **Influence of aggregate volume on the electrical resistivity of Portland cement concretes.** Construction and Building Materials, v. 25, n. 6, p. 4185-4192, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811003466>. Acesso em: 9 ago. 2025.

WENNER, F. **A Method of Measuring Earth Resistivity.** Bureau of Standards Scientific Paper, n. 258, Washington, 1915.

WHITTINGTON, H. W.; MCCARTER, J.; FORDE, M. C. **The conduction of electricity through concrete.** Magazine of Concrete Research, v. 33, n. 114, p. 48-60, 1981.