

INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Bahia

Campus
Vitória da Conquista



COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - COEEL

PROJETO FINAL DE CURSO - PFC

Aterramentos Encapsulados por Concreto - Avaliação do
Tipo de Cimento na Resposta Elétrica

WANDERSON ALVES DA SILVA

Vitória da Conquista-BA
14 de Dezembro de 2023

WANDERSON ALVES DA SILVA

**Aterramentos Encapsulados por Concreto -
Avaliação do Tipo de Cimento na Resposta Elétrica**

Projeto Final de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, *campus* Vitória da Conquista, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: MSc. Gabriel Vidal Negreiros Bezerra

Vitória da Conquista-BA
14 de Dezembro de 2023

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

A474a Alves da Silva, Wanderson

Aterramentos Encapsulados por Concreto - Avaliação do Tipo de Cimento na Resposta Elétrica: / Wanderson Alves da Silva; orientador Gabriel Vidal Negreiros Bezerra -- Vitória da Conquista : IFBA, 2023.

57 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Graduação em Engenharia Elétrica) -- Instituto Federal da Bahia, 2023.

1. Aterramento Elétrico. 2. Cimento. 3. Concreto. 4. Resistência de Aterramento. 5. Resistividade Elétrica I. Vidal Negreiros Bezerra, Gabriel, orient.
II. TÍTULO.

CDD/CDU

FOLHA DE APROVAÇÃO DO PROJETO FINAL DE CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ATERRAMENTOS ENCAPSULADOS POR CONCRETO - AVALIAÇÃO DO TIPO DE CIMENTO NA RESPOSTA ELÉTRICA

WANDERSON ALVES DA SILVA

A presente monografia de Projeto Final de Curso (PFC), apresentada em sessão realizada em **Quatorze de Dezembro de 2023**, foi avaliada como adequada para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, julgada **APROVADA** em sua forma final pela Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, campus Vitória da Conquista.

Banca examinadora:

Prof. MSc. Gabriel Vidal Negreiros Bezerra (Orientador)
IFBA - Campus Vitória da Conquista

Prof. MSc. Elvio Prado da Silva (Banca)
IFBA - Campus Vitória da Conquista

Prof. MSc. Luciano Ferraz dos Santos Silva (Banca)
IFBA - Campus Vitória da Conquista

Em 11 de dezembro de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **GABRIEL VIDAL NEGREIROS BEZERRA, Professor(a) do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico - EBTT**, em 02/02/2024, às 16:22, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **LUCIANO FERRAZ DOS SANTOS SILVA, Professor(a) do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico - EBTT**, em 02/02/2024, às 21:43, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **ELVIO PRADO DA SILVA, Professor Efetivo**, em 03/02/2024, às 09:47, conforme decreto nº 8.539/2015.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site http://sei.ifba.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&acao_origem=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **3295784** e o código CRC **27FD0D53**.

Dedico este trabalho à Deus e à minha família.

“Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, por que o mundo pertence a quem se atreve. E a vida é muito bela para ser insignificante. ” Charles Chaplin (1889-1977)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, fonte de sabedoria e guia em todos os momentos da minha vida, por proporcionar força, discernimento e inspiração durante a jornada que culminou neste trabalho de conclusão de curso.

Ao Professor Orientador, Gabriel Vidal Negreiros Bezerra, expresso minha profunda gratidão pela orientação dedicada, paciência e valiosos ensinamentos que foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua contribuição foi essencial para o meu crescimento acadêmico e profissional.

À minha esposa, Thaise Lima Souza, expresso meu profundo agradecimento pelo apoio incansável, compreensão e paciência durante as fases mais desafiadoras deste trabalho.

À minha mãe, Eleny Alves da Silva, e meu pai, Edson Alves da Silva, agradeço pelo amor incondicional, apoio constante e pelos valores que me guiaram ao longo desta jornada acadêmica.

À minha irmã, Edilane Alves da Silva, pela compreensão, incentivo e companheirismo nos desafios enfrentados ao longo deste percurso.

À instituição de ensino, o Instituto Federal da Bahia (IFBA), agradeço pela oferta de um ambiente propício ao aprendizado, recursos necessários e pela oportunidade de crescimento acadêmico.

A todos os professores do curso de Engenharia Elétrica, meu reconhecimento pelo conhecimento compartilhado, incentivo e dedicação à formação dos estudantes.

Ao meu vizinho, José, que gentilmente forneceu as ferramentas necessárias para a realização dos experimentos, expresso minha sincera gratidão pela generosidade e colaboração.

Ao Coordenador do setor Comercial da Empresa Sirtec Sistemas Elétricos, João Pedro de Almeida Batista, agradeço pelo estímulo e direcionamento que contribuíram para a focada entrega deste trabalho. Sua orientação foi fundamental para o sucesso deste projeto.

A todos que de alguma forma contribuíram para esta conquista, meu mais sincero obrigado. Cada um de vocês desempenhou um papel fundamental no meu caminho, e sou imensamente grato por isso.

1

¹Este trabalho foi formatado e organizado utilizando o modelo Latex de trabalho acadêmico criado e desenvolvido pelo Prof. Elvio Prado da Silva do IFBA - Campus Vitória da Conquista, ao qual damos os devidos créditos.

RESUMO

O aterramento elétrico possui elevada importância para os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia. Seu principal objetivo é proporcionar uma ligação à terra com uma impedância suficientemente baixa, de forma a proteger pessoas e equipamentos. Nesse ínterim, sabe-se que, em solos com alta resistividade e em espaços com pequena área disponível, a construção de um aterramento que atenda os critérios normativos se torna desafiador. Diante disso, pode-se empregar técnicas de melhoramento de aterramento, estando entre uma das mais promissoras a utilização de concreto ao redor dos eletrodos de aterramento, formando, assim, os aterramentos encapsulados por concreto. Por outro lado, embora seja esperado que as propriedades elétricas do concreto sejam fortemente influenciadas pelo tipo de cimento utilizado, relação água/cimento e traço, são raros os trabalhos na literatura que apontam a influência que esses componentes do concreto tem na sua resistividade elétrica, sob uma perspectiva de utilização em aterramentos encapsulados por concreto. Diante disso, no presente trabalho é inicialmente apresentado um estudo da resistividade do concreto para três diferentes tipos de cimento e três valores de relação água/cimento, ou seja, nove possibilidades de concreto. Em seguida, foi construído um aterramento com haste encapsulada por concreto, utilizando o concreto mais promissor, entre os avaliados. Tal aterramento teve sua respectiva resistência de aterramento medida e comparada com uma haste convencional nua. Finalmente, os resultados obtidos indicaram que o concreto preparado com cimento do tipo CP - V e uma relação água/cimento de 0,7 apresentou os menores valores de resistividade observados. Além disso, a haste encapsulada por concreto forneceu uma resistência 20% inferior a da haste convencional, após 30 dias de medição.

Palavras-chave: Aterramento elétrico, Cimento, Concreto, Resistência de aterramento, Resistividade elétrica.

ABSTRACT

Electrical grounding is extremely important for energy generation, transmission and distribution systems. Its main objective is to provide an earth connection with a sufficiently low impedance, in order to protect people and equipment. In the meantime, it is known that, in soils with high resistivity and in spaces with a small available area, the construction of a grounding that meets regulatory criteria becomes challenging. Therefore, grounding improvement techniques can be used, one of the most promising being the use of concrete around the grounding electrodes, thus forming groundings encapsulated by concrete. On the other hand, although it is expected that the electrical properties of concrete are strongly influenced by the type of cement used, water/cement ratio and mix, there are few studies in the literature that point out the influence that these concrete components have on its electrical resistivity, from a perspective of use in grounding encapsulated by concrete. Therefore, this work initially presents a study of concrete resistivity for three different types of cement and three water/cement ratio values, that is, nine concrete possibilities. Then, a grounding was constructed with a concrete-encased rod, using the most promising concrete among those evaluated. Such grounding had its respective grounding resistance measured and compared with a conventional bare rod. Finally, the results obtained indicated that concrete prepared with type CP - V cement and a water/cement ratio of 0.7 presented the lowest resistivity values observed. Furthermore, the rod encapsulated by concrete provided a resistance 20% lower than the conventional rod, after 30 days of measurement.

Keywords: Cement, Concrete, Electrical grounding, Electrical resistivity, Grounding resistance.

Lista de Figuras

2.1	Aterramento simples: haste vertical com detalhe de conexão.	6
2.2	Aterramento convencional.	7
2.3	Aterramento com uso de aditivos químicos ao redor do eletrodo. . .	8
2.4	Aterramento encapsulado por concreto.	9
2.5	Potencial de Toque: ilustração do conceito.	11
2.6	Potencial de passo devido à ocorrência de uma descarga elétrica diretamente no solo.	13
2.7	Alterações na resistividade elétrica do concreto à medida que a carbonatação progride.	16
2.8	Variação da resistividade elétrica em relação à temperatura para um semicondutor e para um condutor (metal).	18
2.9	Variação da resistividade elétrica em relação à proporção entre água e cimento e a quantidade de cimento Portland convencional utilizado, testado após 28 dias.	20
2.10	Resistividade elétrica para diferentes categorias de cimentos.	22
2.11	Método de Wenner (1916) : representação gráfica da aplicação.	23
2.12	Impacto das diferentes dimensões do corpo de prova na razão entre resistividade aparente e real.	25
2.13	Efeito da corrente na resistividade.	27
2.14	Efeito da frequência na resistividade.	27
3.1	Cimento CP II E-32 adquirido.	30
3.2	Cimento CP II F-32 adquirido.	30
3.3	Cimento CP V adquirido.	30
3.4	Moldes de madeira construídos para receber o concreto e produzir corpos de prova padronizados.	32
3.5	Processo de Confecção de um corpo de prova. Incluso na figura: molde de madeira, suporte vertical para os eletrodos, fita adesiva azul, quatro eletrodos e o concreto.	33
3.6	Corpos de prova após serem retirados do molde de madeira.	33
3.7	Confecção da haste concretada em molde de PVC.	35

3.8	Buraco cavado no solo para instalação da haste.	35
3.9	Instalação da haste concretada dentro do buraco.	35
3.10	Transformador de 220/(24+24) V, 250 mA e 24 W	36
3.11	Alicate amperímetro.	36
3.12	Multímetro.	36
3.13	Conexão do transformador, amperímetro e multímetro para medição da resistividade de um corpo de prova de concreto.	37
3.14	Termo-Higrômetro utilizado para medir a pressão atmosférica.	37
3.15	Terrômetro utilizado para medição da resistência de aterramento.	38
4.1	Resistividade elétrica dos três concretos confeccionados com o cimento CP II E-32 , para as relações $A/C = 0,5; 0,6$ e $0,7$. Medições em laboratório (fora do solo).	40
4.2	Resistividade elétrica dos três concretos confeccionados com o cimento CP II F-32 , para as relações $A/C = 0,5; 0,6$ e $0,7$. Medições em laboratório (fora do solo).	41
4.3	Resistividade elétrica dos três concretos confeccionados com o cimento CP V , para as relações $A/C = 0,5; 0,6$ e $0,7$. Medições em laboratório (fora do solo).	42
4.4	Resistência de Aterramento (Ω) para: (i) Haste Concretada, com 1 m de comprimento e diâmetro de concreto de 10 cm, e (ii) Haste Convencional (sem encapsulamento de concreto), com 1 m de comprimento. Medições realizadas no horário das 13:00h e das 18:00h para ambas hastes. (Dados brutos no Apêndice A)	43

Lista de Tabelas

2.1	O impacto da corrente elétrica no organismo humano.	10
2.2	Diferentes tipos de solos e suas resistividades.	14
3.1	Composição dos Cimentos Portland.	29
3.2	Corpos de Prova: tipos de cimento e traços de preparo utilizados. . .	30
A.1	Resistividade elétrica dos três concretos confeccionados com o cimento CP II E-32 , para as relações $A/C = 0,5; 0,6$ e $0,7$. Medições em laboratório (fora do solo). Figura 4.1.	53
A.2	Resistividade elétrica dos três concretos confeccionados com o cimento CP II F-32 , para as relações $A/C = 0,5; 0,6$ e $0,7$. Medições em laboratório (fora do solo). Figura 4.2.	54
A.3	Resistividade elétrica dos três concretos confeccionados com o cimento CP V , para as relações $A/C = 0,5; 0,6$ e $0,7$. Medições em laboratório (fora do solo). Figura 4.3.	55
A.4	Medições do aterramento de haste convencional : resistência de aterramento (Ω), umidade e pressão atmosférica.	56
A.5	Medições do aterramento de haste encapsulada por concreto : resistência de aterramento (Ω), umidade e pressão atmosférica.	57

Glossário: Símbolos e Siglas

Notação	Descrição	Páginas
COEEL	Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do IFBA - Campus Vitória da Conquista	i
MRT	Sistemas Monofilares com Retorno por Terra	1
SEP	Sistema Elétrico de Potência	2

Sumário

Folha de Rosto	ii
Ficha Catalográfica	iii
Folha de Aprovação	iv
Resumo	viii
Abstract	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Glossário: Símbolos e Siglas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Introdução ao Tema	1
1.2 Objetivo Geral	3
1.2.1 Objetivos Específicos	3
1.3 Justificativa	3
2 Referencial Teórico	5
2.1 Aterramento Elétrico	5
2.2 Aterramento Elétrico e suas diversas aplicações	6
2.3 Classificação de Aterramentos	7
2.4 Choques Elétricos	9
2.4.1 Potencial de Toque	11
2.4.2 Potencial de Passo	12
2.5 Resistividade Elétrica do Solo	13
2.6 Resistividade Elétrica do Concreto	14
2.6.1 Processo de carbonatação e presença de íons cloreto	15
2.6.2 Temperatura	17

2.6.3	Nível de Umidade	18
2.6.4	Relação Água/Cimento (a/c)	19
2.6.5	Processo de hidratação do cimento	20
2.6.6	Utilização e Variedades de Cimento	21
2.7	O Método de Wenner	23
2.7.1	Configuração Geométrica do Corpo de Prova	25
2.7.2	Contato entre os eletrodos e o concreto	26
2.7.3	Características da forma da onda, intensidade e frequência da corrente elétrica	26
3	Metodologia	28
3.1	Cimentos e Relações Água/Cimento Adotados	29
3.2	Procedimento de Preparo do Concreto	31
3.3	Confecção dos Corpos de Prova	31
3.4	Construção do Aterramento com Haste Encapsulada por Concreto	34
3.5	Metodologia de Medições	35
4	Resultados	39
4.1	Medições de Resistividade dos Corpos de Prova	39
4.2	Medições de Resistência de Aterramento das Hastes Concretadas	43
5	Considerações Finais	46
6	Sugestões para Trabalhos Futuros	47
	REFERÊNCIAS	48
A	Dados de Medições	52

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução ao Tema

Aterramento elétrico é a arte de se fazer uma conexão com toda a terra. Sendo assim, ele desempenha um papel fundamental na proteção de pessoas e equipamentos contra descargas elétricas e sobretensões. Ao longo dos anos, diversas técnicas e materiais têm sido utilizados para garantir a eficiência desse sistema, visando minimizar os riscos e garantir a segurança das instalações elétricas. De acordo, com [Kindermann e Campagnolo \(1998\)](#), os objetivos principais do sistema de aterramento são:

- ▶ Obter valor de resistência de aterramento o mais baixo possível, para a condução de correntes de falta à terra;
- ▶ Manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro dos limites de segurança de modo a não causar fibrilação do coração;
- ▶ Fazer com que equipamentos de proteção sejam mais facilmente sensibilizados e isolem rapidamente as falhas à terra;
- ▶ Proporcionar um caminho de escoamento à terra para as descargas atmosféricas;
- ▶ Usar a terra como retorno de corrente de sistemas monofilares com retorno por terra ([MRT](#));
- ▶ Escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

Para que o Sistema Elétrico de Potência (SEP) opere perfeitamente, oferecendo uma continuidade de serviço, garantindo um desempenho confiável em relação à proteção, é necessário que o projeto de aterramento receba uma atenção especial. Para isso, deve ser levado em consideração dados disponíveis e parâmetros pré-fixados, estabelecendo as possíveis condições que o sistema possa ser submetido.

Diante disso, neste trabalho abordou-se o método de aterramento encapsulado por concreto, onde o sistema de aterramento é enterrado em uma estrutura de concreto. Esse tipo de aterramento apresenta vantagens, como a proteção contra corrosões e maior durabilidade em comparação com os sistemas convencionais. No entanto, a escolha do tipo de cimento utilizado na confecção desses aterramentos encapsulados pode influenciar diretamente na sua resposta elétrica. Diferentes tipos de cimento possuem propriedades físicas e químicas distintas, o que pode afetar a resistividade elétrica do sistema e, conseqüentemente, sua eficiência.

Neste sentido, realizou-se uma avaliação do tipo de cimento na resposta elétrica de aterramentos encapsulados por concreto. Além disso, investigou-se os efeitos de diferentes tipos de cimento na resistividade elétrica do sistema de aterramento, levando em consideração fatores como a composição química do cimento, sua porosidade e características físicas.

Desta forma, foram feitos estudos experimentais nos quais foram desenvolvidos protótipos utilizando três tipos distintos de cimentos, variando as relações entre água e cimento. Procedeu-se medições de resistividade elétrica, considerando flutuações de umidade e temperatura, com o intuito de avaliar a influência desses fatores no desempenho do sistema. Além disso, foi implementado aterramentos convencionais, encapsulados em concreto e envolvidos em concreto, contudo, com a utilização de hastes serradas.

Os resultados obtidos foram analisados e comparados entre si, a fim de identificar diferenças significativas na resposta elétrica dos aterramentos. Essa análise permitiu-se uma melhor compreensão dos efeitos do tipo de cimento na eficiência do sistema de aterramento, fornecendo subsídios para aprimoramentos futuros na seleção do material mais adequado.

Desta forma, através deste estudo esperou-se contribuir para o conhecimento científico sobre aterramentos encapsulados por concreto e fornecer informações relevantes para profissionais da área de engenharia elétrica, a fim de auxiliar na es-

colha adequada do tipo de cimento para a construção de sistemas de aterramento mais eficientes e seguros.

1.2 Objetivo Geral

Avaliar a influência do tipo de cimento e relação água/cimento na resistividade elétrica do concreto, visando o seu uso em aterramentos encapsulados por concreto.

1.2.1 Objetivos Específicos

- 1) Selecionar três tipos de cimentos e três relações água/cimento a serem usados na preparação de nove tipos de concreto e, portanto, nove corpos de prova;
- 2) Medir a resistividade elétrica dos nove corpos de prova de concreto utilizando o método de Wenner (com medições diárias, durante 61 dias);
- 3) Selecionar, entre os concretos avaliados, o mais promissor para fins de uso em aterramentos encapsulados por concreto;
- 4) Executar um sistema de aterramento do tipo haste encapsulada por concreto, utilizando o concreto mais promissor entre os avaliados e um segundo aterramento com haste convencional nua (para fins de comparação);
- 5) Medir a resistência de aterramento da haste concretada e da haste convencional, durante 30 dias, comparando os seus resultados.

1.3 Justificativa

O aterramento é um sistema essencial em sistemas elétricos, garantindo a segurança de pessoas e ativos, bem como o correto funcionamento equipamentos que dele necessitam. Tradicionalmente, os métodos convencionais de aterramento têm sido objeto de estudo em diversos trabalhos acadêmicos, porém, uma abordagem pouco explorada é o aterramento encapsulado por concreto, o qual faz uso do concreto como elemento melhorador do aterramento, promovendo

resistências menores que as fornecidas por aterramentos convencionais (principalmente em solos com média e alta resistividade). Portanto, visando sanar essa lacuna, no presente trabalho é realizada uma análise do tipo de cimento e relação água/cimento utilizados para o preparo do concreto, com vistas ao seu uso para encapsulamento de aterramentos. Além disso, é realizada a construção de um aterramento com haste encapsulada por concreto, bem como um aterramento com haste convencional, para verificação de seu comportamento em relação a este último.

Capítulo 2

Referencial Teórico

A seguir, é apresentada uma fundamentação teórica abrangendo tópicos relacionados a aplicação dos sistemas de aterramento elétrico, definição de aterramento encapsulado por concreto, os riscos de choques elétricos advindos de ausência ou aterramentos inadequados, a resistividade elétrica do concreto e os fatores que a influenciam. Em seguida, é apresentado o método de [Wenner \(1916\)](#) e sua aplicação na medição de resistividade do concreto, bem como fatores importantes a serem observados quando da aplicação de tal método.

2.1 Aterramento Elétrico

A ação de aterrar consiste em conectar intencionalmente um sistema físico (como um sistema elétrico, eletrônico ou objetos metálicos) à terra, com o objetivo de criar uma rota segura para a corrente elétrica ser dissipada ([VISACRO, 2002](#)).

Assim, quando ocorre uma fuga de corrente elétrica, a eletricidade busca o caminho de menor resistência e potencial, que é a terra. Isso significa que a corrente indesejada flui para a terra, onde o potencial elétrico é próximo de zero. Essa característica do sistema de aterramento evita que as pessoas próximas aos equipamentos energizados recebam um choque elétrico, proporcionando segurança.

Um sistema de aterramento elétrico bem projetado e instalado é um requisito fundamental para assegurar um bom desempenho do sistema elétrico. Para [Cavalin e Cervelin \(2006\)](#), “a ausência ou falta de aterramento é responsável por muitos acidentes elétricos com vítimas, principalmente em instalações residenci-

ais”.

A [Figura 2.1](#) apresenta um dispositivo chamado eletrodo de aterramento, que é usado para fornecer uma conexão segura à terra. Este eletrodo de aterramento é conectado a um conector.



FONTE: (Eletro Energia Materiais Elétricos, 2023)

Figura 2.1 – Aterramento simples: haste vertical com detalhe de conexão.

Na [Figura 2.1](#), é indicada uma haste feita de aço cobreado, que é frequentemente escolhida devido à sua baixa resistividade e habilidade condutora. Além disso, esse tipo de haste é preferido devido ao seu custo mais baixo em comparação com outros condutores disponíveis.

2.2 Aterramento Elétrico e suas diversas aplicações

Segundo [Leite e Filho \(1996\)](#), as principais aplicações associadas ao sistema de aterramento são as seguintes:

- ▶ Utilizar a terra como um condutor de retorno em um sistema elétrico;
- ▶ Aterrar pontos específicos de um sistema para melhorar o desempenho e funcionamento de dispositivos eletroeletrônicos;
- ▶ Permitir o fluxo de correntes de descarga, oferecendo segurança ao evitar a energização de corpos metálicos expostos a pessoas e animais, bem como prevenindo o acúmulo de cargas estáticas que possam causar irradiação eletromagnética ou faíscas;
- ▶ Controlar os níveis de potenciais elétricos ou a distribuição desses níveis por meio de práticas adequadas de aterramento, visando a segurança.

Neste sentido, a resistência do sistema de aterramento deve ser a mais baixa possível para proporcionar um escoamento à terra da corrente. Além disso, os potenciais elétricos devem estar dentro dos limites de segurança para não causar fibrilação ventricular do coração de usuários da rede elétrica e para possibilitar o correto funcionamento dos dispositivos de proteção (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2002; VISACRO, 2002).

2.3 Classificação de Aterramentos

De acordo com Androvitsaneas, Gonos e Stathopulos (2012), os aterramentos podem ser definidos em três categorias em relação ao aspecto da aplicação e da utilização de materiais adicionais: a química, a convencional e com concreto.

Convencional

Os sistemas de aterramento convencionais são os mais básicos em sua composição. Eles consistem em conexões entre hastes (eletrodos) verticais desprotegidos e cabos horizontais desprotegidos, ambos feitos de material condutor exposto. De acordo com a norma ABNT-NBR:15715 (2009), em subestações, o sistema de aterramento é estabelecido através de uma rede de cabos condutores nus, na qual, em certos pontos dessa rede, hastes verticais de cobre são inseridas ao solo. A Figura 2.2 apresenta um esboço deste tipo de aterramento.

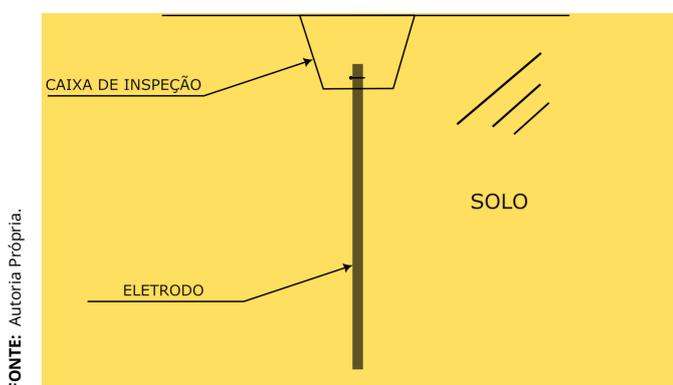


Figura 2.2 – Aterramento convencional.

Químico

A técnica de aterramento com modificação química do solo é uma das abordagens utilizadas em solos com alta resistividade. Ela envolve a introdução de sais no solo ao redor dos eletrodos de aterramento, frequentemente utilizando substâncias como cloreto de sódio, sulfato de cobre ou produtos químicos industriais. A [Figura 2.3](#) ilustra a estrutura básica de um aterramento com tratamento químico. No entanto, é importante notar que, de acordo com [Hallmark \(2000\)](#), o tratamento químico cria uma célula eletrolítica corrosiva, tornando-o uma opção de aterramento que não consegue manter suas propriedades constantes ao longo do tempo e está sujeito a influências como lixiviação e variações nas condições hidroclimáticas. O esboço na [Figura 2.3](#) representa o processo de modificação química do solo.

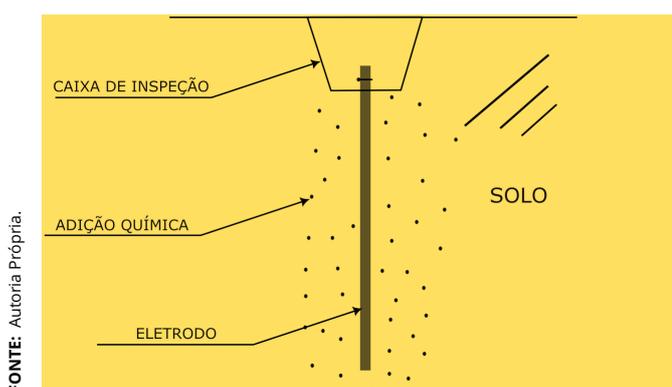


Figura 2.3 – Aterramento com uso de aditivos químicos ao redor do eletrodo.

Encapsulado por Concreto

Os sistemas de aterramento encapsulado por concreto, em sua estrutura fundamental, compreendem um eletrodo metálico que é revestido por uma camada de concreto, como ilustrado na [Figura 2.4](#). Neste sentido, de acordo com [Rowland \(1995\)](#), essa forma de aterramento é aconselhada para solos com resistividade superior a $100 \Omega \cdot m$, mas não é a escolha ideal quando a resistividade do solo é inferior a $50 \Omega \cdot m$, pois nesses casos a resistência da haste de aterramento com concreto é maior do que a de uma haste convencional. Além disso, [Preminger \(1975\)](#) aponta que os aterramentos concretados demonstram um desempenho excelente, especialmente em comparação com os aterramentos convencionais, quando aplicados em solos de resistividade superior a $100 \Omega \cdot m$, especialmente em solos com alta resistividade.

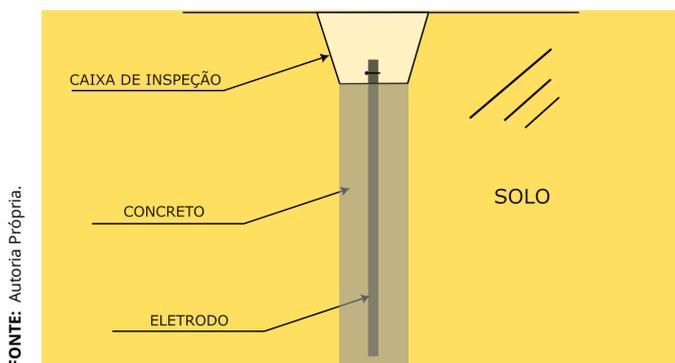


Figura 2.4 – Aterramento encapsulado por concreto.

Conforme mencionado anteriormente, as hastes de aterramento encapsuladas por concreto demonstram um desempenho superior em comparação com as hastes convencionais (nuas) de aterramento. [Hallmark \(2000\)](#) cita algumas melhorias, são elas:

- ▶ A resistividade mantém-se mais estável ao longo das mudanças climáticas sazonais, em comparação com o aterramento convencional;
- ▶ O uso de concreto proporciona proteção ao eletrodo metálico contra a corrosão, prolongando assim a durabilidade do sistema de aterramento. Além disso, torna o aterramento uma escolha versátil, particularmente adequada para ambientes com solos de composição química agressiva.
- ▶ Emerge como uma opção superior em comparação com aterramentos com adição de materiais químicos, que têm sua resistência consideravelmente instável ao longo do tempo e são mais vulneráveis a fatores externos como a dispersão no solo, além de promoverem a corrosão do eletrodo.

2.4 Choques Elétricos

O choque elétrico ocorre quando há passagem de corrente elétrica pelo corpo humano, e a gravidade desse choque depende de diversos fatores, tais como o nível de umidade da pele, a intensidade da corrente elétrica, a duração da exposição e o percurso da corrente elétrica, entre outros ([KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2002](#)).

Quando a corrente elétrica percorre o corpo humano, desencadeia uma série

de perturbações às quais o organismo reage de diferentes maneiras. Essas reações podem variar desde contrações superficiais leves até contrações musculares violentas, podendo, em casos extremos, levar à morte do indivíduo. Essas perturbações incluem a inibição do centro nervoso, resultando em parada respiratória, alterações no ritmo cardíaco que podem levar à fibrilação ventricular e até mesmo parada cardíaca, além de queimaduras graves que podem causar necrose dos tecidos. A corrente elétrica também pode provocar alterações no sangue devido aos efeitos térmicos e eletrolíticos (BORTOLUZZI, 2009).

As partes do corpo humano mais comumente afetadas são as mãos, pés, pernas, tronco e tórax. Segundo Viana e Ferreira (2018), o percurso da corrente entre os braços apresenta um maior risco, pois pode afetar diretamente o coração. É importante destacar que a resistência oferecida pelo corpo humano à passagem da corrente depende das condições em que a pessoa se encontra, incluindo o ambiente, as roupas utilizadas, o uso de equipamentos de proteção individual (EPI's), a intensidade da corrente e outras variáveis. A Quadro 1 apresenta os efeitos da corrente no corpo humano, levando em consideração a intensidade.

Tabela 2.1 – O impacto da corrente elétrica no organismo humano.

I (mA)		Reação Fisiológica	Consequência	Salvamento	Resultado Final Mais Provável
CA	DC				
Até 25	Até 80	1mA (CA): sensação de formigamento 5-15mA(CA): contração muscular 15-25mA (CA): Contrações violentas, impossibilidade de soltar o fio; Problemas respiratórios	Se a corrente for próxima de 25mA (CA), poderá haver problemas respiratórios e consequentemente a morte aparente.	Respiração Artificial	Restabelecimento
25 - 80	80-300	-Sensação insuportável -Contrações violetas; -Asfixia	Morte aparente	Respiração Artificial	Restabelecimento
Na ordem de Ampères		-Queimaduras -Necrose do tecido -Fibrilação ventricular -Asfixia imediata -Danos posteriores provenientes da eletrólise	-Morte aparente -Dependendo da extensão das queimaduras sequelas ou Morte	-Respiração artificial -Massagem cardíaca -Tratamento hospitalar	-Hospital -Desfibrilação ventricular -Recuperação difícil -Atrofia muscular -Outros danos

FONTE: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2002)

As principais diferenças de potenciais aplicadas ao corpo humano em um projeto de malha de aterramento, são: Potencial de Toque, Potencial de Passo,

conforme mencionado nas normas [IEEE Std. 81 \(1992\)](#) e [IEEE Std. 80 \(2000\)](#).

2.4.1 Potencial de Toque

O potencial de toque refere-se à variação de potencial entre uma estrutura metálica acessível à mão de uma pessoa e um ponto no solo localizado a 1 metro da base da estrutura, como mostrado na [Figura 2.5](#). Durante um período de falha, o potencial máximo não deve gerar uma corrente que exceda o limite estabelecido por [Dalziel \(1946\)](#).

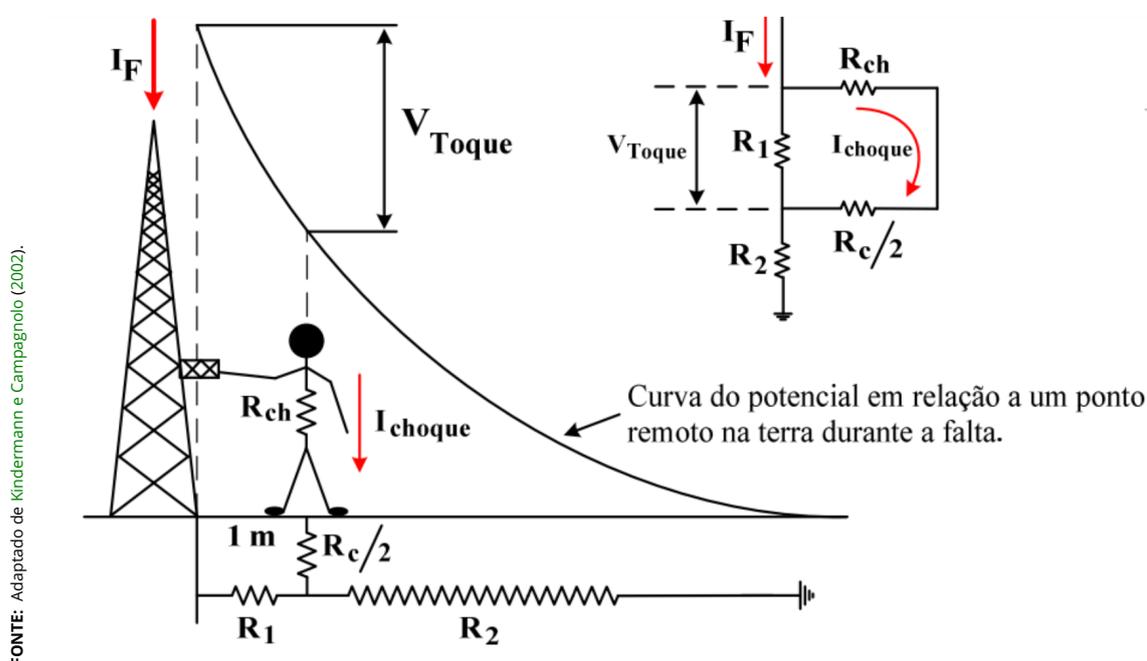


Figura 2.5 – Potencial de Toque: ilustração do conceito.

A [Equação 2.1](#) é empregada para calcular o limite máximo permitido do potencial de toque entre a mão e o pé, de forma a evitar a ocorrência de fibrilação ventricular.

$$V_{toque} = \left(R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) \cdot I_{choque} \quad (2.1)$$

Sendo:

R_c : Resistência de contato que pode ser considerada $3 \cdot \rho_s$ (sendo ρ_s = resistividade superficial do solo), de acordo com a [IEEE Std. 80 \(2000\)](#);

R_{ch} : Resistência do corpo humano 1000 Ω .m;

$I_{ch} = I_{choque}$: Corrente admissível pelo corpo humano;

$R1$ e $R2$: Resistência dos trechos de terra (Ω);

V_{toque} : Potencial de Toque (V).

Dessa forma, a partir da expressão [Equação 2.1](#), pode-se chegar à [Equação 2.1](#):

$$V_{toqueMax} = (1000 + 1,5 \cdot \rho_s) \cdot I_{choque} \quad (2.2)$$

2.4.2 Potencial de Passo

A passagem de corrente elétrica pelo solo, como resultado de um curto-circuito, por exemplo, leva à formação de superfícies equipotenciais na sua superfície. Portanto, os potenciais de passo ocorrem quando uma pessoa se posiciona com os pés sobre linhas equipotenciais distintas. A [Figura 2.6](#) ilustra o potencial de passo resultante de uma descarga elétrica direta no solo.

A equação para calcular o potencial de passo máximo é:

$$V_{passo} = (R_{ch} + 2R_c) \cdot I_{choque} \quad (2.3)$$

Sendo:

$R_c = 3 \cdot \rho_s$: Resistência de Contato (Ω);

R_{ch} : Resistência do corpo humano (Ω);

$I_{ch} = I_{choque}$: Corrente admissível pelo corpo humano;

V_{passo} : Potencial de passo (V)

Outro fator importante na consideração de aterramentos bem dimensionados, é a compreensão da resistividade do solo e sua constituição, além de considerações relacionadas à segurança e viabilidade, a medição da resistividade impede despesas injustificadas na construção do sistema de aterramento.

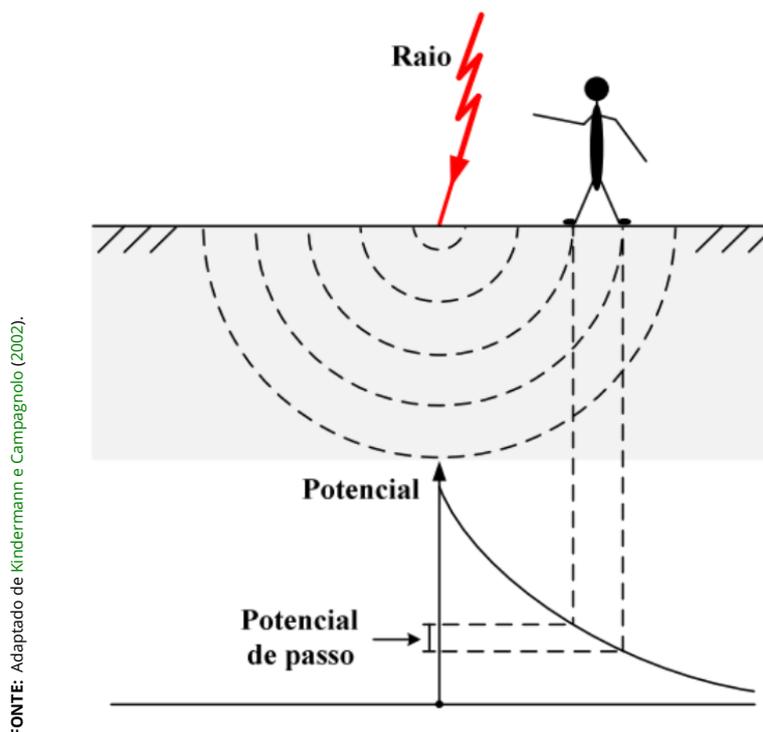


Figura 2.6 – Potencial de passo devido à ocorrência de uma descarga elétrica diretamente no solo.

Ao entender as propriedades do solo, é possível determinar os requisitos essenciais para o funcionamento do sistema, prevenindo assim a aquisição de materiais em excesso e a execução de tarefas e procedimentos não essenciais para as condições específicas do ambiente.

2.5 Resistividade Elétrica do Solo

De acordo com Visacro (2002), o solo exibe características elétricas cruciais que influenciam o cálculo adequado das dimensões dos condutores, uma vez que este é o ambiente onde as hastes ou eletrodos de aterramento serão inseridos. A resistividade do solo é especificada como a resistência elétrica observada entre as superfícies de um cubo de solo uniforme, com todos os lados medindo 1 metro, e sua unidade padrão é expressa em $\Omega.m$.

O solo sem nenhuma adição de melhoramento condutivo, apresenta uma resistividade geralmente situada na faixa de 100 a 1.000 $\Omega.m$, enquanto o cobre possui uma resistividade de aproximadamente $1,67 \cdot 10^{-8} \Omega.m$, ou seja, cerca de um bilhão de vezes menor. No entanto, é importante notar que a faixa de resis-

tividade mencionada serve apenas como uma referência, uma vez que em locais específicos, os valores de resistividade podem variar consideravelmente em relação às médias de cada região (LEITE; FILHO, 1996; VISACRO, 2002).

Além disso, de acordo com os autores supracitados, os principais componentes do solo incluem o óxido de silício (areia), os silicatos de alumínio (argilas), o carbonato de cálcio e de sódio, e a presença de água. A condução de eletricidade no solo ocorre por meio de um processo eletrolítico, que requer a presença de água para ocorrer.

Em relação ao tipo de solo, de acordo com Kindermann e Campagnolo (1998), os mesmos não são claramente definidos, então, não é possível atribuir-lhe um valor de resistividade. No entanto, é viável descrever intervalos de valores típicos que são representativos para os variados tipos de solo, como ilustrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Diferentes tipos de solos e suas resistividades.

TIPOS DE SOLOS	RESISTIVIDADE ($\Omega.m$)
Solos Aráveis	50 a 500
Argila	300 a 5.000
Calcário	500 a 5.000
Areia	1.000 a 8.000
Granito e Arenito	100 a 1.0000

FONTE: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1998)

Como apresentado na Tabela 2.2, a resistividade elétrica dos solos pode variar de 50 a 10.000 $\Omega.m$ de acordo com o tipo de solo.

2.6 Resistividade Elétrica do Concreto

A resistividade elétrica dos concretos está diretamente relacionada à corrosão das armaduras, pois sua avaliação possibilita a análise da facilidade de acesso dos íons cloreto e dióxido de carbono antes do início da corrosão, bem como a estimativa da velocidade desse processo após o início (HELENE, 1986). Além disso, Azarsa e Gupta (2017) destacaram que a resistividade está ligada à capacidade do concreto de suportar a transferência desses íons quando são transportados através da microestrutura.

Em termos gerais, a medição da resistividade elétrica, que é a capacidade do

material de resistir ao fluxo de corrente elétrica em seu interior (SANTOS, 2006; HELENE, 1993). Quando relacionada aos processos de transporte de agentes agressivos nos poros do concreto, pode servir como um indicador da durabilidade e vida útil do material (SANTOS, 2006). Neste sentido, é possível observar que há diversos elementos que influenciam o desempenho elétrico do concreto. Alguns desses elementos são minuciosamente abordados neste estudo. A seguir são descritos elementos que afetam a medição da resistividade.

2.6.1 Processo de carbonatação e presença de íons cloreto

A porosidade do concreto desempenha um papel fundamental na permeabilidade de fluidos como o CO₂ e na difusão de íons cloreto em seu interior (MEDEIROS-JUNIOR; LIMA, 2014). Dessa forma, o número e a conectividade dos poros afetam diretamente a resistividade elétrica do material, que por sua vez pode ser considerada um indicador da tendência à corrosão das armaduras.

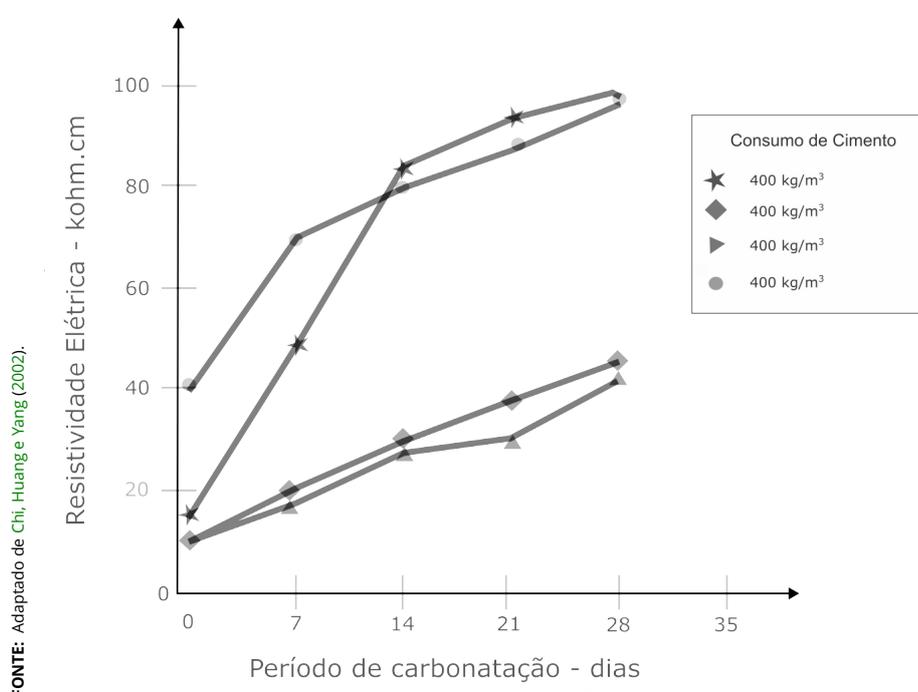
De acordo com Mendes et al. (1991), a reação de carbonatação resulta na formação de carbonato de cálcio, que preenche os poros do concreto e endurece sua superfície, contribuindo para um aumento significativo da resistividade elétrica superficial. Quando o concreto está altamente saturado, especialmente se a frente de carbonatação alcançar a armadura, a taxa de corrosão do aço pode ser elevada, seguindo uma correlação inversamente proporcional entre a resistividade e a taxa de corrosão, conforme descrito por Polder et al. (2000).

Além disso, o autor supracitado afirma que a carbonatação pode aumentar a resistividade elétrica do concreto, uma vez que reduz a concentração de íons presentes na solução aquosa nos poros do concreto, sendo que essa solução é responsável pela condução da corrente.

Segundo Neville (2015), a carbonatação tem um efeito benéfico na resistividade elétrica, visto que resulta em um concreto com menor porosidade devido ao aumento do volume de carbonato de cálcio (CaCO₃) em comparação ao hidróxido de cálcio original (Ca(OH)₂). Isso leva ao preenchimento dos poros do concreto. A redução da porosidade resulta em uma diminuição da permeabilidade do concreto, além de restringir a movimentação da umidade interna. Neste sentido, a carbonatação aumenta a resistividade elétrica do concreto (BRAMESHUBER et al.,

2003).

Hoppe (2005) faz referência ao estudo realizado por Chi, Huang e Yang (2002), no qual foi investigado o impacto da carbonatação na resistividade elétrica do concreto. Os pesquisadores analisaram diferentes tipos de concreto, incluindo aqueles compostos por 100% de cimento Portland com relações a/ag de 0,48 e 0,58, bem como concretos com teores de escória de 24% e 60% e relação a/ag de 0,36 e 0,40. Durante o estudo, os concretos foram submetidos a um processo de carbonatação acelerada e, simultaneamente, foi medido o valor de resistividade elétrica de cada um deles. Os resultados obtidos por Chi, Huang e Yang (2002) são apresentados na Figura 2.7.



FONTE: Adaptado de Chi, Huang e Yang (2002).

Figura 2.7 – Alterações na resistividade elétrica do concreto à medida que a carbonatação progride.

Por outro lado, o efeito dos íons cloreto na resistividade elétrica do concreto não é facilmente compreendido. Enquanto alguns autores afirmam que a influência dos cloretos na resistividade elétrica é insignificante, outros argumentam que a presença desses íons em maior quantidade no interior do concreto pode resultar em uma redução significativa da resistividade.

2.6.2 Temperatura

As alterações de temperatura também resultam em mudanças significativas na resistividade do concreto, como afirmado por [Polder et al. \(2000\)](#). Por exemplo, quando a umidade do material é mantida constante, um aumento na temperatura pode levar a uma diminuição da resistividade. Em outras palavras, a temperatura e a resistividade são parâmetros que têm uma relação inversa para o concreto. Além disso, de acordo com o autor, essa variação é explicada pelo aumento da mobilidade iônica e pela maior interação entre os íons presentes na solução contida nos poros e o concreto.

Em um estudo conduzido por [Al-Abdul-Hadi \(2006\)](#) foi analisada a influência da variação da temperatura em um concreto com relação $a/c = 0,5$. Nesse estudo, a resistividade do material foi avaliada em temperaturas de 20° C, 40° C, 60° C e 80° C. Observou-se que a resistividade do concreto a 80° C corresponde a 46% da resistividade do mesmo concreto a 20° C. Além disso, amostras analisadas a 40° C apresentaram uma redução de aproximadamente 34% em comparação aos valores obtidos a 20° C.

De acordo com [Aguiar \(2006\)](#), a condutividade elétrica desempenha um papel importante quando ocorrem mudanças na temperatura do material. Isso ocorre devido ao comportamento oposto de elementos condutores e semicondutores, conforme ilustrado na [Figura 2.8](#). Ao longo deste trabalho, serão discutidas outras características relacionadas à resistividade do concreto armado e seus componentes.

Neste sentido, [Young e Freedman \(2009\)](#) conclui que, no caso de materiais condutores, a elevação da temperatura está relacionada ao aumento da energia dos íons. Isso resulta em uma maior amplitude de vibração, aumentando a probabilidade de colisão entre elétrons e íons. Essa colisão dificulta o fluxo de elétrons através do condutor, reduzindo a corrente elétrica no elemento. Por outro lado, nos semicondutores, a resistividade elétrica diminui com o aumento da temperatura. Isso ocorre porque os elétrons estabelecem ligações mais fracas com os átomos em temperaturas elevadas, adquirindo maior mobilidade.

No trabalho de [Polder et al. \(2000\)](#) também é apresentado um modelo matemático para calcular a resistividade, usando um fator empírico. No entanto, esse fator pode distorcer os valores reais dessa propriedade do material. Em termos simplificados, [Polder et al. \(2000\)](#) concluem que uma queda de 20°C na tempera-

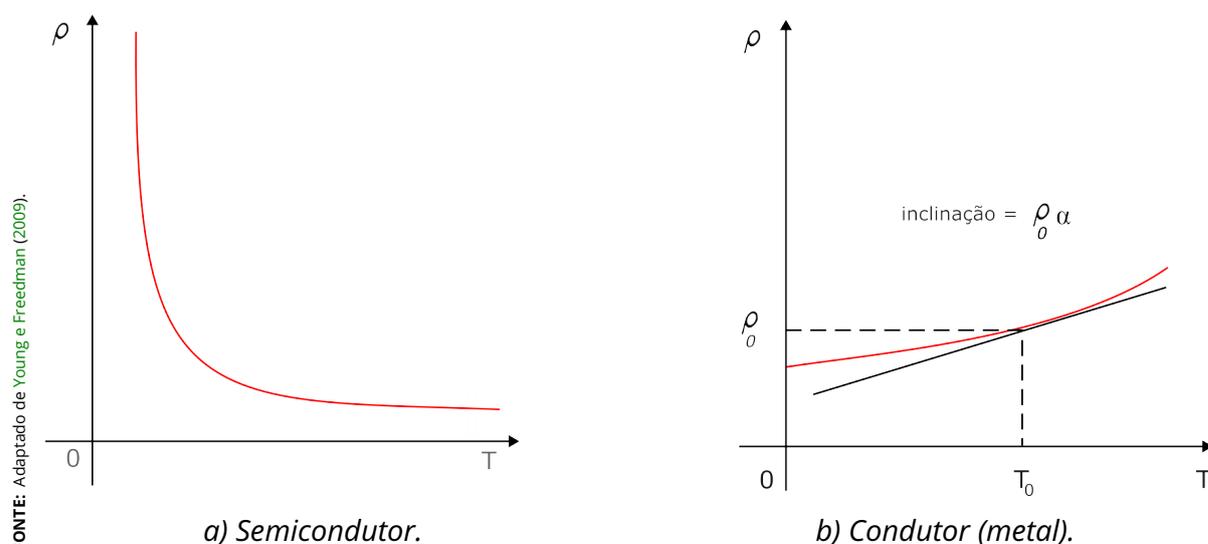


Figura 2.8 – Variação da resistividade elétrica em relação à temperatura para um semicondutor e para um condutor (metal).

tura pode resultar em um aumento de 100% na resistividade, considerando uma faixa de variação de temperatura entre 0°C e 40°C. Da mesma forma, pode-se assumir uma variação de 3% a 5% no valor da resistividade para concreto úmido e seco, respectivamente, para cada grau de temperatura. Isso sugere uma certa linearidade no comportamento do material para temperaturas mais baixas.

2.6.3 Nível de Umidade

Segundo Koleva et al. (2008), a umidade presente no concreto é a variável primordial que influencia a resistividade em condições eletrolíticas. No entanto, a resistividade também é determinada pela mobilidade de íons como Na⁺, K⁺, OH⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, presentes nos poros do concreto em solução aquosa. A concentração desses íons também desempenha um papel na resistividade, resultando na diminuição de seu valor.

O grau de saturação dos poros do concreto pode variar devido a diversos elementos, incluindo as condições ambientais presentes ao redor da estrutura, tais como as alterações na umidade relativa do ar, a ocorrência de chuvas e a exposição direta à radiação solar. Esses fatores podem modificar a quantidade de água presente nos poros do concreto, conforme mencionado por Castellote, Andrade e Alonso (2002).

Conforme Abreu (1998), quanto maior for o nível de saturação dos poros do

concreto, menor será a resistividade elétrica percebida na estrutura e, em princípio, maior será a velocidade de corrosão do aço. Isso ocorre devido à restrição na condução de carga elétrica entre as áreas anódicas e catódicas da armadura. Portanto, devido à sensível influência do teor de umidade nos valores de resistividade elétrica do concreto, especialmente na análise da resistividade superficial, é recomendável evitar a realização de ensaios *in loco* durante períodos chuvosos ou em condições de intensa exposição solar atípica.

A fim de evitar interpretações incorretas dos resultados, é recomendado pela literatura que o concreto esteja completamente saturado, porém com a superfície seca, e que todas as estruturas ou amostras sejam analisadas nas mesmas condições. Isso é feito para evitar desvios nas leituras dos equipamentos.

2.6.4 Relação Água/Cimento (a/c)

Quando se busca melhorar o desempenho do concreto, um dos fatores-chave a ser examinado é a proporção entre a quantidade de água e cimento na mistura, conhecida como relação água/cimento (a/c). Isso se deve ao fato de que a porosidade e a permeabilidade do concreto aumentam conforme mais água é adicionada à mistura, e, ao mesmo tempo, a resistividade elétrica do material diminui (ABREU, 1998).

Neste sentido, quanto maior a quantidade de água na pasta de cimento, mais poros são formados no concreto, resultando em um maior volume e possibilidade de conexões entre esses poros. Isso tem um impacto significativo no comportamento estrutural do concreto e em sua resistência contra agentes agressivos. Além disso, a presença de mais água também leva a uma redução na resistividade elétrica do material (SANTOS, 2006).

Na década de 1970, Woelfl e Lauer (1979) conduziram um estudo abordando diversos parâmetros, incluindo a resistividade elétrica do concreto. Nesse trabalho, eles mantiveram a proporção dos materiais constante e variaram a relação água/cimento (a/c) em valores de 0,4, 0,5 e 0,6. Utilizando a relação $a/c = 0,5$ como referência, os pesquisadores concluíram que a resistividade elétrica do concreto diminui à medida que a relação a/c aumenta. Isso acontece porque os íons presentes na água livre atuam como condutores de eletricidade no interior do concreto.

Segundo estudos de (NEVILLE, 1997), quando a proporção entre água e ci-

mento é mantida constante e o consumo de cimento é variado, a resistividade elétrica do concreto também é afetada conforme representado na [Figura 2.9](#). Essa mudança acontece devido à menor disponibilidade de eletrólitos no material, o que resulta em uma redução na corrente elétrica capaz de percorrer o concreto.

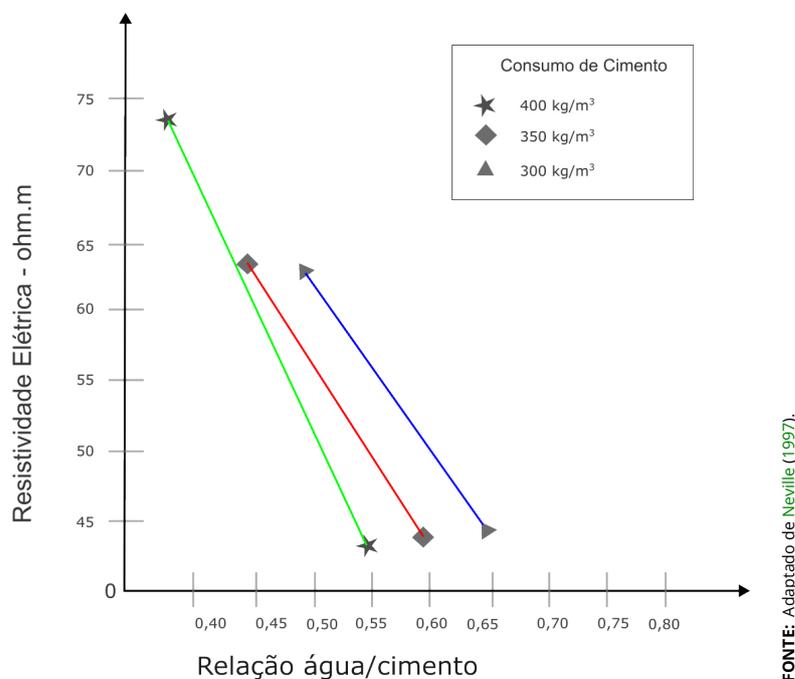


Figura 2.9 – Variação da resistividade elétrica em relação à proporção entre água e cimento e a quantidade de cimento Portland convencional utilizado, testado após 28 dias.

Portanto, é de suma importância analisar cuidadosamente a quantidade de água adicionada à mistura de concreto, devido à sua influência direta sobre a quantidade e volume dos poros no material. Além disso, a quantidade de água também desempenha um papel significativo na saturação desses espaços vazios, o que consequentemente afeta as reações de carbonatação e a suscetibilidade aos ataques de íons Cl⁻. Esse cuidadoso exame da relação entre a quantidade de água e a mistura de cimento é crucial para assegurar a durabilidade e a resistência adequada do concreto diante de fatores ambientais e agentes agressivos.

2.6.5 Processo de hidratação do cimento

Com embasamento na interação química entre a água e o cimento, bem como no aprimoramento da resistência do concreto, é possível constatar que a resistividade elétrica do material aumenta gradualmente com o passar do tempo. Esse comportamento é explicado pelo decréscimo progressivo da quantidade de

água livre no concreto, a qual inicialmente favorece a condução de corrente elétrica, porém, à medida que reage com as partículas de cimento durante o processo de "hidratação do cimento", sua presença diminui.

O fenômeno mencionado acima foi previamente identificado por [Whittington, MacCarter e Forde \(1981\)](#), que observou que a quantidade de água livre presente no concreto, tanto no momento da mistura quanto após a hidratação completa do cimento, está diretamente relacionada à idade do material.

Em outras palavras, à medida que as reações do cimento progredem e o tempo decorrido desde a mistura do concreto aumenta, a resistividade elétrica do material também se eleva.

Neste sentido, estudos conduzidos por [Woelfl e Lauer \(1979\)](#) revelaram um notável aumento na resistividade elétrica de amostras de concreto submetidas a processos de cura em ambiente seco em comparação com aquelas submetidas a cura úmida. Nesse contexto, quando a quantidade de água disponível para a hidratação do cimento diminui, as reações que ocorrem nas etapas iniciais são impactadas, resultando no surgimento de aberturas e fissuras no concreto.

Essas condições adversas podem intensificar os efeitos mencionados, sendo a influência do vento e a baixa umidade relativa do ar responsáveis por diminuir a resistência mecânica do concreto e modificar sua resistividade elétrica. Estas descobertas destacam a importância de cuidados adequados no processo de cura do concreto, uma vez que podem ter impactos significativos em suas propriedades elétricas e mecânicas.

Portanto, é de extrema importância que os testes realizados nas fases iniciais do concreto levem em conta minuciosamente o efeito da hidratação do cimento. Desta maneira, evita-se divergências e interpretações equivocadas dos valores de resistividade. As reações de hidratação podem resultar em alterações significativas na quantidade de água não reagida presente no interior do material, o que torna essencial essa abordagem cuidadosa para obter resultados mais precisos e confiáveis.

2.6.6 Utilização e Variedades de Cimento

A resistividade elétrica do concreto é afetada tanto pelo consumo quanto pelo tipo de cimento utilizado durante sua produção. Como mencionado anteri-

ormente, a pasta de cimento apresenta baixa resistividade elétrica, o que significa que reduzindo o consumo de cimento, é provável que a resistividade elétrica do concreto aumente devido à sensibilidade dessa propriedade às mudanças na matriz (SANTOS, 2006).

Por outro lado, em concretos com baixas relações água/cimento, o consumo de cimento tem menos impacto sobre os valores de resistividade elétrica. Em tais situações, a diminuição da variação ocorre devido à menor presença de eletrólitos disponíveis para conduzir a corrente elétrica (HOPPE, 2005).

Pesquisadores como Mendes et al. (2018) investigaram o impacto das diferentes classes de cimento disponíveis no Brasil na resistividade elétrica do concreto. Eles identificaram maiores valores de resistividade em amostras de concreto produzidas com cimentos que continham quantidades significativas de adições minerais em sua composição, como o CP III (com adição de escória de alto forno) e o CP IV (com adição de cinza volante). Esses resultados estão evidenciados na Figura 2.10.

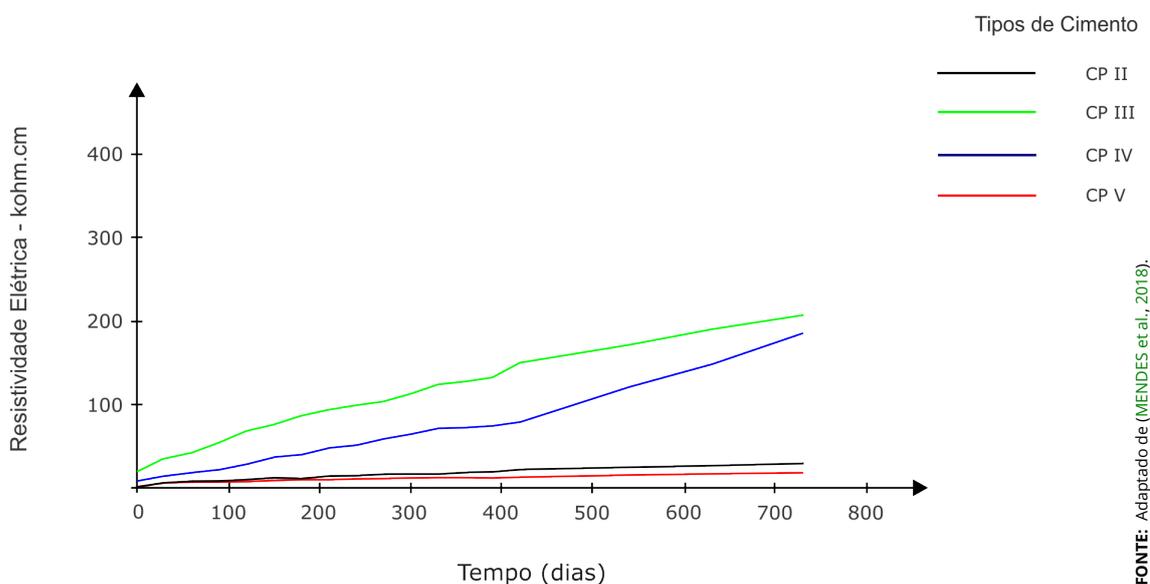


Figura 2.10 – Resistividade elétrica para diferentes categorias de cimentos.

Em um estudo similar, Mendes et al. (2018) também chegaram a resultados comparáveis. No entanto, eles observaram que o cimento CP IV, com teor pozolânico entre 15% e 50%, alcançou em média um aumento de resistividade elétrica de aproximadamente 129% em relação ao cimento CP II utilizado pelos autores. Essas variações são geralmente explicadas pelo refinamento dos poros, que é proporcionado pelas adições minerais presentes na composição desses cimentos.

Além disso, Whiting e Nagi (2003) concluíram que o tipo de cimento, a quantidade de álcalis e a quantidade de C3A (aluminato tricálcico) são fatores relacionados à química do cimento que podem exercer influência direta na resistividade elétrica do concreto.

2.7 O Método de Wenner

O método de Wenner (1916), também conhecido como método dos quatro eletrodos, foi desenvolvido pelo estadunidense Frank Wenner e consiste em um técnica para medição da resistividade do solo. Embora tenha sido primeiramente concebido para medir a resistividade do solo, ele foi adaptado para medições de resistividade em outros materiais tais como o concreto (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2002). Dessa forma, no presente trabalho, o método de Wenner foi utilizado para mediar a resistividade de um corpo de prova de concreto. Na Figura 2.11 é apresentado uma ilustração da aplicação do método (isto é: a disposição dos eletrodos/hastes, fonte de tensão, voltímetro e amperímetro).

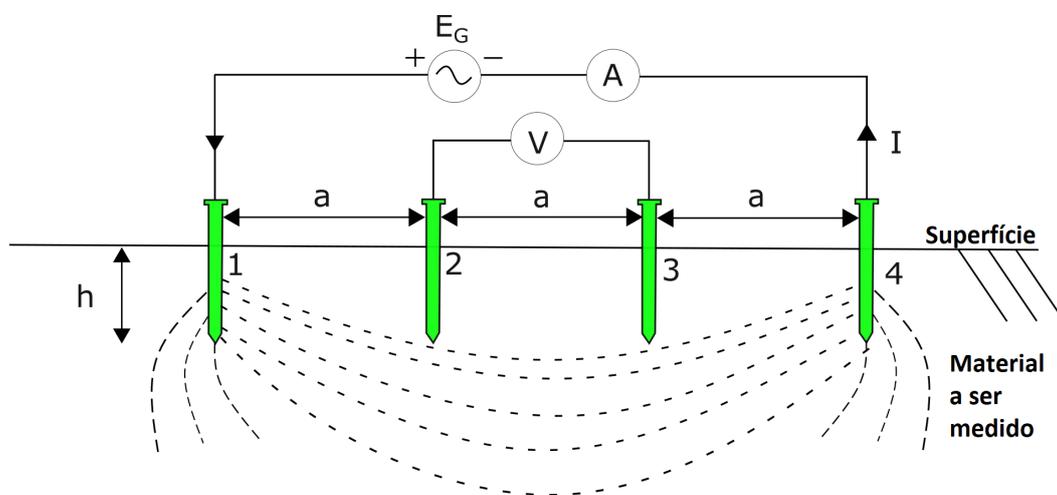


Figura 2.11 – Método de Wenner (1916): representação gráfica da aplicação.

Essa técnica envolve inserir quatro eletrodos ou hastes no meio ou corpo de prova do qual deseja-se medir a resistividade. Os eletrodos são posicionados de forma equidistantes em uma linha reta a uma distância a , e a uma profundidade h . Desta forma, uma corrente elétrica I é introduzida no eletrodo 1 e percorre o corpo de prova até alcançar o eletrodo 4. Esse fluxo de corrente gera uma discrepância de potencial entre os eletrodos 2 e 3. Usando os valores da corrente injetada e da diferença de potencial entre os pontos 2 e 3, é possível determinar a resistência elétrica do solo (observada entre os eletrodos 2 e 3), a qual será representada por

R . Assim, em posse de do valor de R , é possível calcular a resistividade elétrica do solo ρ , utilizando a [Equação 2.4](#).

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4h^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2+4h^2}}} \quad [\Omega.m] \quad (2.4)$$

Sendo:

ρ : resistividade aparente do meio a ser medido (ex: concreto) ($\Omega.m$);

R : Resistência elétrica (Ω);

a : Distância de separação entre os eixos dos eletrodos (cm);

h : Profundidade de penetração dos eletrodos no corpo de prova (cm).

Considerando um geometria semi-infinita, ou seja, quando o afastamento das hastes é relativamente grande em relação a profundidade ($a \gg h$), a [Equação 2.4](#) se reduz à [Equação 2.5](#).

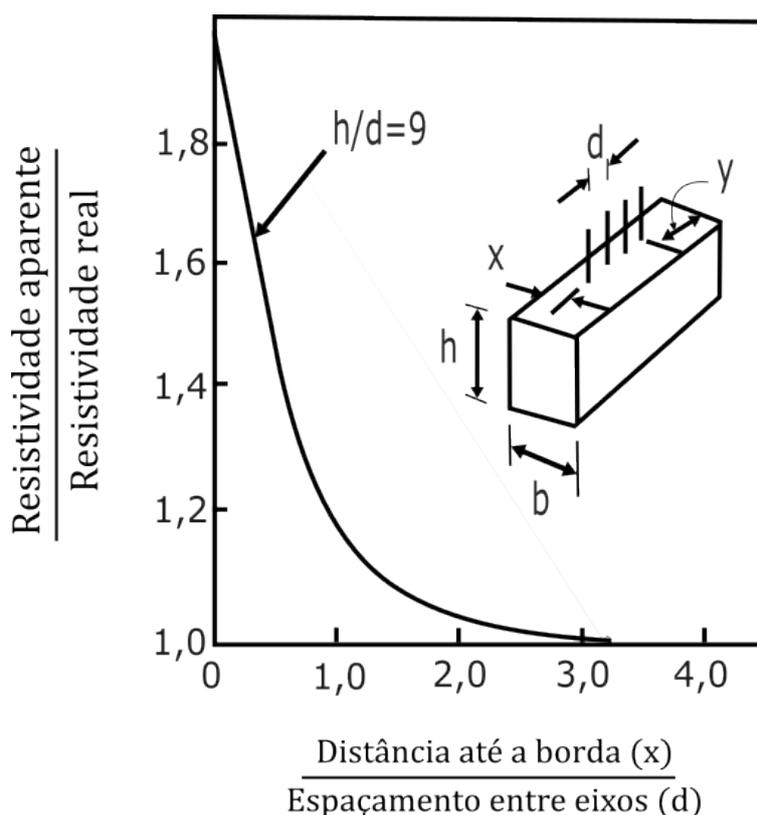
$$\rho = 4\pi a R \quad [\Omega.m] \quad (2.5)$$

Conforme ilustrado na [Figura 2.11](#), na prática, a distribuição de corrente elétrica no interior do material não é perfeitamente uniforme. Essas não-uniformidades na densidade de corrente têm o potencial de causar distorções nos resultados adquiridos durante o teste, fornecendo valores imprecisos para a resistividade elétrica do material. Assim, para que medições mais precisas sejam obtidas, é desejável que esse fenômeno seja minimizado e/ou contabilizado no cálculo da resistividade. Isso implica diretamente na escolha e verificação do formato e dimensões geométricas do corpo de prova de concreto sob estudo, a fim de prevenir distorções demasiadas na distribuição de corrente no interior.

A seguir, nas próximas seções, serão abordados fatores que exercem influência sobre o método de Wenner, no que tange a medição da resistividade elétrica do concreto. Entre tais fatores estão: as dimensões geométricas do corpo de prova, distância entre o eletrodo e as extremidades da amostra, a qualidade da interface entre eletrodo e concreto, a heterogeneidade do próprio concreto, a presença de armaduras e a existência de camadas com resistividades distintas.

2.7.1 Configuração Geométrica do Corpo de Prova

Segundo (GOWERS; MILLARD, 1999), as medições de diferença de potencial elétrico e corrente elétrica realizadas através do método de Wenner são válidas somente quando é possível considerar o concreto como tendo um volume "semelhante ao infinito", no qual as dimensões da peça de concreto são significativamente maiores em comparação com o espaçamento entre os eletrodos. Quando as dimensões da amostra são relativamente pequenas, a corrente elétrica fica restrita a percorrer uma área diferente daquela originalmente proposta pelo método, resultando em uma superestimação da resistividade elétrica. Eles enfatizam que erros na estimativa da resistividade elétrica do concreto podem ocorrer quando as medições são realizadas em camadas muito finas de concreto ou próximas a uma das extremidades da peça. A Figura 2.12 ilustra o impacto das dimensões nas medições da resistividade.



FONTE: Adaptado de GOWERS e MILLARD (1999).

Figura 2.12 – Impacto das diferentes dimensões do corpo de prova na razão entre resistividade aparente e real.

Os pesquisadores analisaram o impacto das dimensões da altura e largura (h e b , respectivamente) em relação ao espaçamento entre os eletrodos (d) na resistividade elétrica medida e real do corpo de prova. Eles também investigaram como

a distância dos eletrodos até as extremidades do corpo de prova afeta o processo. No que diz respeito à altura e largura do corpo de prova, os autores chegaram à conclusão de que alturas relativas (h/d) de 6 ou mais não apresentam efeito significativo na resistividade elétrica medida. O mesmo se aplica à largura relativa (b/d), onde valores iguais ou maiores que 6 não induzem erros de relevância.

Para a distância em relação à superfície do concreto perpendicular ao eixo dos eletrodos (x/d), os resultados indicam que é necessário que seja igual ou superior a 3 para evitar influências nas medições. Quanto à distância ao longo do eixo dos eletrodos até as extremidades, os autores afirmam que teve uma influência limitada.

2.7.2 Contato entre os eletrodos e o concreto

A obtenção de medições confiáveis requer uma conexão eficiente entre os eletrodos e o concreto. O contato inadequado pode levar a estimativas incorretas da resistividade elétrica, com destaque para a medição da diferença de potencial, que é particularmente sensível à qualidade do contato (GOWERS; MILLARD, 1999).

É essencial assegurar uma ligação eficaz entre os eletrodos e o concreto para garantir medições precisas. Um contato irregular pode resultar em avaliações imprecisas da resistividade elétrica, com especial atenção para a medição da diferença de potencial, que demonstra ser particularmente influenciada pela qualidade da conexão. Além disso, (GOWERS; MILLARD, 1999) sugerem a utilização de correntes alternadas de frequência baixa como uma abordagem para minimizar os efeitos de polarização que podem surgir na interface entre os eletrodos e o concreto. Essa medida ajuda a diminuir as distorções nas medições da resistividade elétrica.

2.7.3 Características da forma da onda, intensidade e frequência da corrente elétrica

Hoppe (2005) menciona a pesquisa conduzida por Mendes et al. (1991), na qual os autores propuseram que a utilização de correntes de ondas quadradas anula o efeito capacitivo que resulta no aumento da resistividade elétrica conforme a corrente cresce. No entanto, os investigadores destacam que os resultados obti-

dos com correntes de onda senoidal são satisfatórios, não demonstrando diferenças significativas maiores que 6% entre os dois padrões de onda. Além do exposto, (MENDES et al., 1991) investigaram como a intensidade da corrente (conforme ilustrado na Figura 2.13) e a frequência da onda (como indicado na Figura 2.14) afetam a resistividade. Os autores chegaram à conclusão de que é aconselhável evitar correntes com valores inferiores a $200 \mu\text{A}$, enquanto também alertaram para o fato de que correntes excessivamente altas podem resultar em imprecisões devido à resistência do contato entre o eletrodo e o eletrólito.

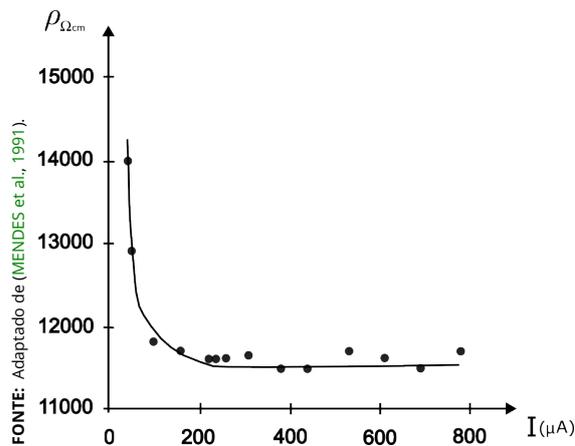


Figura 2.13 – Efeito da corrente na resistividade.

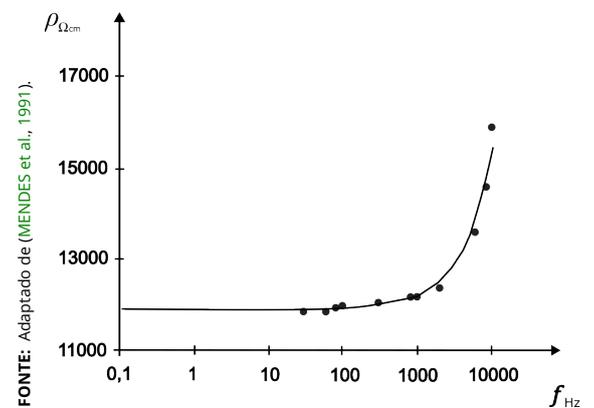


Figura 2.14 – Efeito da frequência na resistividade.

Capítulo 3

Metodologia

O presente trabalho se presta a avaliar o efeito que o tipo de cimento, bem como a relação água/cimento (a/c), tem na resistividade elétrica do concreto, com o objetivo de obtenção de um concreto que seja promissor para uso em aterramentos encapsulados por concreto. Dessa forma, nesse capítulo são apresentados as metodologias, procedimentos e escolhas adotadas para que esse objetivo fosse alcançado.

Como etapa inicial do trabalho, realizou-se uma caracterização, em laboratório, da resistividade de corpos de prova de concreto, preparados com diferentes cimentos e relação a/c . Foram avaliados concretos preparados com três tipos de cimentos comercialmente disponíveis e para três relações água/cimento distintas, perfazendo nove tipos de concreto (e, portanto, nove corpos de prova). Dessa forma, pôde-se observar, fora do solo, quais seriam os concretos mais promissores para utilização em aterramentos encapsulados por concreto (no solo).

Após a caracterização dos concretos, escolheu-se aquele que apresentou a menor resistividade para a construção, em campo, de um aterramento do tipo haste encapsulada por concreto (ou haste concretada), para que, em seguida, fossem efetuadas medições de resistência de aterramento.

Dessa forma, na [Seção 3.1](#) são apresentados os tipos de cimentos e relações a/c escolhidos, assim, como o traço de concreto adotado; em seguida, na [Seção 3.2](#) é apresentado o procedimento adotado para o preparo do concreto; já na [Seção 3.3](#) é apresentado o processo de confecção dos corpos de prova; logo em seguida, na [Seção 3.4](#) é indicado os passos adotados para a construção do aterramento com haste concretada; e, por fim, na [Seção 3.5](#) são apresentados os

materiais e métodos utilizados para: (1) a medição de resistividade do concreto dos corpos de prova e (2) a medição da resistência de aterramento da haste concretada.

3.1 Cimentos e Relações Água/Cimento Adotados

Neste estudo, foram avaliados três tipos de cimento e três valores de relação água/cimento. Quanto ao cimento, foram adotados os tipos CP II E-32, CP II F-32 e o CP V. Tais cimentos foram escolhidos tomando-se como base a [Tabela 3.1](#), fornecida pela [ABNT-NBR:16697 \(2018\)](#). Além disso, também levou-se em consideração a disponibilidade desses tipos de cimento no mercado de construção da cidade de Vitória da Conquista - BA.

Tabela 3.1 – Composição dos Cimentos Portland.

Designação Normalizada do Cimento	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Portland comum	CP-I	25-32 ou 40	RS ou BC	95-100	0-5		
	CP I-S			90-94	0	0	6-10
Portland comum com escória granulada de alto-forno	CP II-E			51-94	6-34	0	0-15
Portland composto com material pozolânico	CP II-Z			71-94	0	6-14	0-15
Portland composto com material carbonático	CP II-F			75-89	0	0	11-25
Portland de alto-forno	CP III			25-65	35-75	0	0-10
Portland pozolânico	CP IV			45-85	0	15-50	0-10
Portland de alta resistência inicial	CP V ^a			ARI	90-100	0	0
Portland branco	Estrutural	25-32 ou 40	-	75-100	-	-	0-25
	Não estrutural	-		50-74	-	-	26-50

FONTE: Adaptado de [ABNT-NBR:16697 \(2018\)](#).

Na [Figura 3.1](#), [3.2](#) e [3.3](#) são apresentados os cimentos Portland adquiridos no comércio local de Vitória da Conquista-BA para realização do presente trabalho.

Conforme destacado por [Real \(2015\)](#) e [Neto \(2011\)](#), a relação água/cimento exerce influência sobre as propriedades físicas e mecânicas do concreto, além de afetar sua resistividade elétrica. De acordo com tais trabalhos, quanto maior a relação água/cimento, menor é a resistividade do concreto. Portanto, com base nos estudos mencionados, foram avaliados três valores de relação água/cimento:

3.1. CIMENTOS E RELAÇÕES ÁGUA/CIMENTO ADOTADOS



Figura 3.1 – Cimento CP II E-32 adquirido.



Figura 3.2 – Cimento CP II F-32 adquirido.



Figura 3.3 – Cimento CP V adquirido.

0,5; 0,6 e 0,7.

Finalmente, na preparação do concreto utilizou-se uma proporção de 1,7 kg de cimento para 3,4 kg de agregado miúdo. Assim, uma vez que foram avaliados três tipos de cimento e três tipos de relação a/c, têm-se ao todo nove tipos de concreto, sendo necessário, portanto, a confecção de nove corpos de prova (um para cada concreto). Na [Tabela 3.2](#) são apresentados os tipos de cimento e traços utilizados para cada corpo de prova confeccionado.

Tabela 3.2 – Corpos de Prova: tipos de cimento e traços de preparo utilizados.

Corpo de Prova	Tipo de Cimento	Cimento (kg)	Agregado Miúdo (kg)	Relação Água/Cimento
1	CP II E-32	1,7	3,4	0,5
2	CP II E-32	1,7	3,4	0,6
3	CP II E-32	1,7	3,4	0,7
4	CP II F-32	1,7	3,4	0,5
5	CP II F-32	1,7	3,4	0,6
6	CP II F-32	1,7	3,4	0,7
7	CP V	1,7	3,4	0,5
8	CP V	1,7	3,4	0,6
9	CP V	1,7	3,4	0,7

FONTE: Autoria própria.

3.2 Procedimento de Preparo do Concreto

O procedimento de preparo do concreto a ser utilizado tanto na confecção dos corpos de prova quanto na construção do aterramento com haste encapsulada por concreto, foi realizado manualmente através dos seguintes passos:

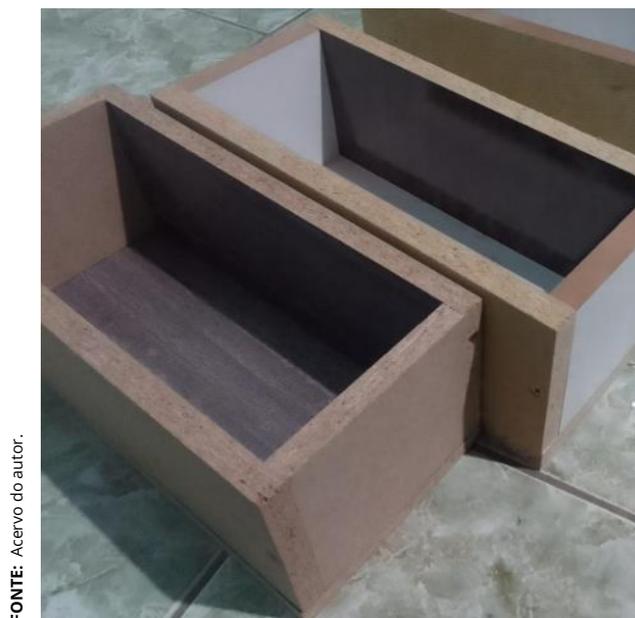
- 1) Colocou-se o cimento em um recipiente e o mesmo foi pesado;
- 2) Adicionou-se o agregado miúdo e o mesmo foi pesado com o dobro do peso do cimento;
- 3) Agitou-se a mistura por 3 minutos;
- 4) Adicionou-se a metade da água;
- 5) Agitou-se a mistura por 3 minutos;
- 6) Colocou-se a outra metade da água;
- 7) Agitou-se a mistura por 4 minutos;
- 8) Depositou-se a massa de concreto preparada em moldes ou formas padronizadas;
- 9) Aplicou-se vibrações no molde com o intuito de obter uma mistura homogênea e uniforme, além de, minimizar bolhas de ar no interior da massa de concreto.

3.3 Confecção dos Corpos de Prova

No presente trabalho, foram confeccionados nove corpos de prova de concreto, no formato de prisma quadrangular, com dimensão de 10 x 10 x 25 cm. Para isso, a massa de concreto foi preparada seguindo os procedimentos apresentados na [Seção 3.2](#), em seguida, o concreto recém preparado foi depositado em moldes de madeira padronizados (conforme apresentado na [Figura 3.4](#)), com as dimensões mencionadas anteriormente.

Após a massa do concreto ser depositada nos moldes, foram inseridos quatro eletrodos no interior da massa do concreto, para que fosse possível a aplicação do método de [Wenner \(1916\)](#), conforme apresentado na [Figura 3.5](#).

Os eletrodos foram confeccionados à partir de um cabo de cobre com seção



FONTE: Acervo do autor.

Figura 3.4 – Moldes de madeira construídos para receber o concreto e produzir corpos de prova padronizados.

transversal de 10 mm², tendo cada eletrodo: um comprimento total de aproximadamente 11 cm, uma porção desencapada de 1,5 cm na extremidade superior, uma porção isolada com aproximadamente 8,5 cm na região mediana e uma porção desencapada de 2 cm na extremidade inferior (sendo essa última a extremidade que foi inserida dentro do corpo de prova do concreto).

Além disso, utilizou-se uma placa vertical de madeira e fita adesiva, de forma a se criar um suporte para os quatro eletrodos, auxiliando na fixação e estabilidade dos eletrodos durante o período de secagem do concreto, evitando a movimentação dos mesmos (conforme indicado na [Figura 3.5](#)).

Após o tempo de secagem, os corpos de prova foram retirados do molde, conforme apresentado na [Figura 3.6](#).

3.3. CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA



Figura 3.5 – Processo de Confecção de um corpo de prova. Incluso na figura: molde de madeira, suporte vertical para os eletrodos, fita adesiva azul, quatro eletrodos e o concreto.



Figura 3.6 – Corpos de prova após serem retirados do molde de madeira.

3.4 Construção do Aterramento com Haste Encapsulada por Concreto

Uma vez selecionado o concreto mais promissor entre os corpos de prova avaliados, passou-se à construção de um aterramento do tipo haste vertical encapsulada por concreto, utilizando exatamente o concreto selecionado na etapa anterior.

Na verdade, visando uma análise comparativa do ponto de vista da eficiência da utilização do concreto, além da haste concretada também foi construída uma haste convencional nua (de mesmo comprimento), sendo fincada no mesmo solo onde a haste concretada foi inserida, distantes entre si em aproximadamente 1 m.

Quanto a haste concretada, para a sua confecção utilizou-se os seguintes passos:

- 1) Preparou-se o concreto a ser utilizado utilizando os procedimentos apresentados na [Seção 3.2](#);
- 2) Depositou-se a massa do concreto em um cano de PVC com 1 m de comprimento e 10 cm de diâmetro, o qual foi utilizado como molde (o concreto foi depositado em camadas, dentro do cano, para se evitar bolhas de ar);
- 3) Foi inserido no centro do cilindro de concreto uma haste de aço cobreado, com 1 m de comprimento e diâmetro de 5/8", ou 1,59 cm. Além disso, instalou-se um conector no topo da haste;
- 4) Cavou-se um buraco no solo com uma profundidade de aproximadamente 1,2 m (fazendo uso de uma cavadeira reta, uma cavadeira articulada e uma pá);
- 5) Após 24h, a haste concretada foi desvinculada do tubo de PVC e, posteriormente, depositada no interior do buraco cavado. O buraco foi fechado novamente com areia (estando a haste no seu interior).

Na [Figura 3.7](#) é apresentado uma imagem da confecção da haste concretada envolvida pelo molde de PVC e fora do solo. Já na [Figura 3.8](#) é apresentado o buraco cavado no solo para que pudesse ser inserida a haste concretada. Finalmente, na [Figura 3.9](#) é apresentado o processo de instalação da haste dentro do buraco.



Figura 3.7 – Confecção da haste concretada em molde de PVC.



Figura 3.8 – Buraco cavado no solo para instalação da haste.



Figura 3.9 – Instalação da haste concretada dentro do buraco.

3.5 Metodologia de Medições

Conforme mencionado no início deste capítulo ([Capítulo 3](#)), no presente estudo, foram realizadas ao todo duas baterias de medições, realizadas em dois momentos distintos, as quais foram:

- 1) Medição de **resistividade elétrica** (em $\Omega \cdot m$) para cada um dos **corpos de prova de concreto** apresentados na [Tabela 3.2](#), diariamente, durante um período de 61 dias;
- 2) Medição da **resistência de aterramento** (em Ω) para o **aterramento de haste concretada** mencionado na [Seção 3.4](#), diariamente, durante um período de 30 dias.

Primeiro foram realizadas as medições nos corpos de prova (em laboratório), de forma a se prospectar o tipo de concreto mais promissor para utilização em um aterramento com haste concretada. Em seguida, após a identificação do concreto mais promissor, realizou-se a construção e subsequente medições das hastes de aterramento (em campo).

Para os ensaios de resistividade elétrica nos nove corpos de prova, foi aplicado o método de [Wenner \(1916\)](#), melhor detalhado na [Seção 2.7](#). Assim, para aplicação desse método, foi utilizado:

- ▶ **Um transformador de 220/(24+24) V, 250 mA e 24 W**, o qual teve o primário conectado à uma tomada de 220 V e o secundário conectado entre os eletrodos 1 e 4 (indicados na [Figura 2.11](#)), fornecendo assim a tensão de excitação para o processo de medição;
- ▶ **Um alicate amperímetro** para medir a corrente (I_{1-4}) que surgirá entre os eletrodos 1 e 4, produzida pela tensão de excitação (gerada pelo transformador);
- ▶ **Um multímetro** para se medir a tensão (V_{2-3}) que surgirá entre os eletrodos 2 e 3.

Dessa forma, em posse do valor medido da corrente I_{1-4} e da tensão V_{2-3} pode-se calcular o valor da resistência R do concreto contido entre os eletrodos 2 e 3. Finalmente, substituindo na [Equação 2.4](#) os valores da resistência (R), do comprimento da poção do eletrodo que está dentro do concreto (h) e da distância entre os eletrodos (a) obteve-se o valor da resistividade elétrica do concreto (ρ). Na [Figura 3.10](#) é apresentado o transformador utilizado, já na [Figura 3.11](#) é indicado o amperímetro e na [Figura 3.12](#) o multímetro utilizado.



Figura 3.10 – Transformador de 220/(24+24) V, 250 mA e 24 W

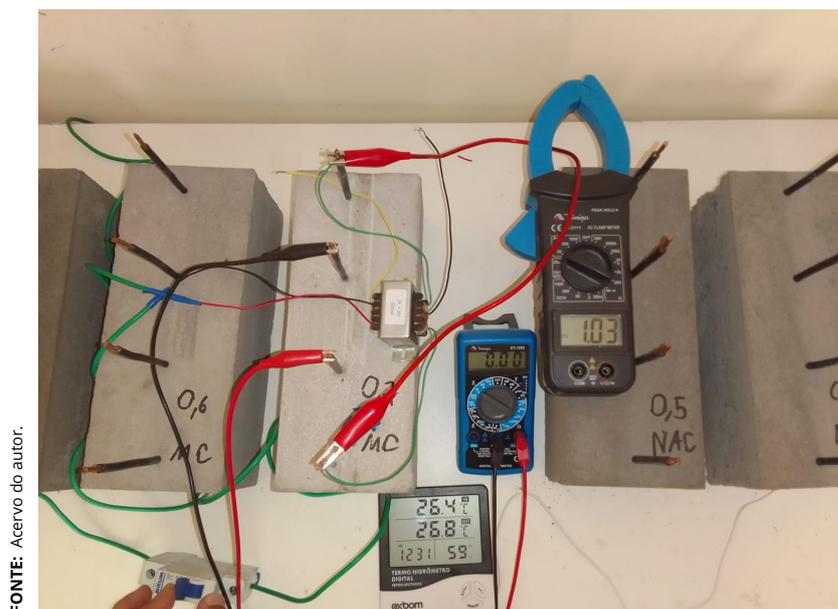


Figura 3.11 – Alicate amperímetro.



Figura 3.12 – Multímetro.

Na [Figura 3.13](#) é apresentada as conexões realizadas do transformador, amperímetro, multímetro e corpo de prova para a realização do método de [Wenner \(1916\)](#). Embora na [Figura 3.13](#) sejam apresentados mais de um corpo de prova, na verdade, apenas um está sendo de fato medido.



FONTE: Acervo do autor.

Figura 3.13 – Conexão do transformador, amperímetro e multímetro para medição da resistividade de um corpo de prova de concreto.

Durante as medições de resistividade dos corpos de prova, também mediuse a temperatura ambiente diariamente, para isso utilizou-se um aplicativo *mobile* disponível na *Google Play Store*. Esse processo foi realizado com o propósito de analisar possíveis variações na resistividade elétrica devido à variações na temperatura ambiente. Adicionalmente, um termo-higrômetro digital foi empregado para auxiliar na aquisição de dados diários da pressão atmosférica, conforme apresentado na [Figura 3.14](#).



FONTE: Acervo do autor.

Figura 3.14 – Termo-Higrômetro utilizado para medir a pressão atmosférica.

Finalmente, após a bateria de medições realizadas nos corpos de prova, foi selecionado o concreto mais promissor para que fosse construído o aterramento do tipo haste vertical concretada. Dessa forma, entrou-se na segunda bateria de

medições, a saber, medições da resistência de aterramento dessa haste concretada (já inseridas no solo). Para realização dessas medições de resistência de aterramento, foi utilizado um terrômetro digital Minipa MTR-1530, conforme apresentado na [Figura 3.15](#).



Figura 3.15 – Terrômetro utilizado para medição da resistência de aterramento.

Vale salientar que o terrômetro utilizado possuía apenas 3 pontas/eletrodos, permitindo apenas a medição de resistência de aterramento, por esse motivo, não foi possível, medir a resistividade do solo onde as hastes foram colocadas.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo, serão expostos os resultados alcançados após serem aplicadas as metodologias mencionadas no [Capítulo 3](#). Inicialmente, nas [Seção 4.1](#) são apresentados os resultados e considerações relativos às medições de resistividade dos corpos de prova de concreto. Em seguida, na [Seção 4.2](#) são apresentadas as medições de resistência de aterramento do aterramentos de haste concretada, bem como uma análise dos resultados.

4.1 Medições de Resistividade dos Corpos de Prova

Nesta seção são apresentados os resultados de medição de resistividade elétrica dos nove corpos de prova de concreto, cuja composição e traços de fabricação são melhor explicados na [Tabela 3.2](#). Para acesso aos dados das medições ver o Apêndice A.

Por questão de simplicidade, os resultados de resistividade dos corpos de prova preparados com o mesmo tipo de cimento (mas diferentes relações $A/C = 0,5; 0,6$ e $0,7$) foram condensados em um único gráfico (conforme apresentado na [Figura 4.1](#), [Figura 4.2](#) e [Figura 4.3](#)). Dessa forma, pode-se avaliar a repercussão da relação A/C na resistividade do concreto. Para acesso aos dados das medições em forma de tabela, favor ver Apêndice A.

Na [Figura 4.1](#) são apresentadas as medições de resistividade (em $\Omega.m$) para os corpos de prova fabricados com o cimento CP II E-32, e relações $A/C = 0,5; 0,6$ e $0,7$; ou seja, tratam-se dos corpos de prova 1, 2 e 3 apresentados na [Tabela 3.2](#).

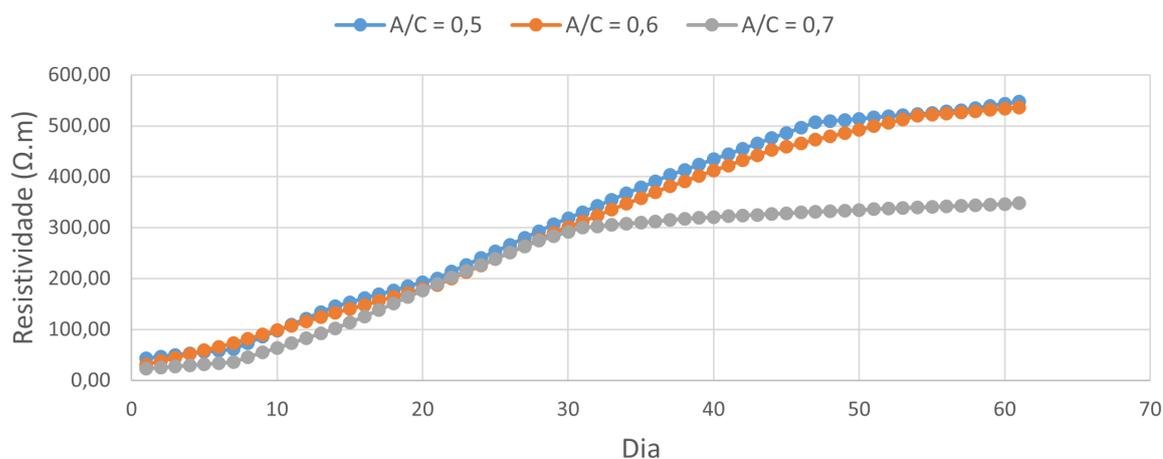


Figura 4.1 – Resistividade elétrica dos três concretos confeccionados com o cimento **CP II E-32**, para as relações A/C = 0,5; 0,6 e 0,7. Medições em laboratório (fora do solo).

Nota-se na [Figura 4.1](#) que, durante os 30 primeiros dias de medições após os três corpos de prova serem confeccionados, o comportamento da resistividade do concreto foi muito similar em termos de tendência e, além disso, os valores medidos foram relativamente próximos entre si. Quanto à tendência de crescimento da resistividade durante os primeiros 30 dias, já era esperado que esse comportamento ocorresse, uma vez que é típico da cura e secagem do concreto ao ar livre (fora do solo).

Por outro lado, a [Figura 4.1](#) indica que, quanto à relação A/C, a mesma não foi um fator capaz de produzir distinção relevante nos valores de resistividade. No entanto, do dia 30 ao dia 61 observou-se um grande descolamento do comportamento do concreto com A/C = 0,7 em relação aos outros dois, assumindo valores de resistividade consideravelmente inferiores aos dos concretos com A/C = 0,5 e 0,6. Assim, no dia 61, observou-se valores de resistividades para A/C = 0,7 próximos a 350 Ω.m, enquanto que para A/C = 0,5 e 0,6 registrou-se valores próximos a 550 Ω.m. Ou seja, uma diferença considerável de 200 Ω.m.

Mais que isso, a partir do dia 30 em diante, o concreto com A/C = 0,7 apresentou um platô no valor da resistividade, indicando uma maturidade ou finalização no processo de cura do concreto. Já as curvas de resistividade para A/C = 0,5 e 0,6 apresentaram uma provável platô só a partir do dia 45 em diante.

Passando aos resultados dos próximos três corpos de prova, são apresentadas na [Figura 4.2](#) as medições de resistividade (em Ω.m) para os corpos de prova fabricados com o cimento CP II F-32, e relações A/C = 0,5; 0,6 e 0,7; ou seja, tratam-

se dos corpos de prova 4, 5 e 6 apresentados na [Tabela 3.2](#).

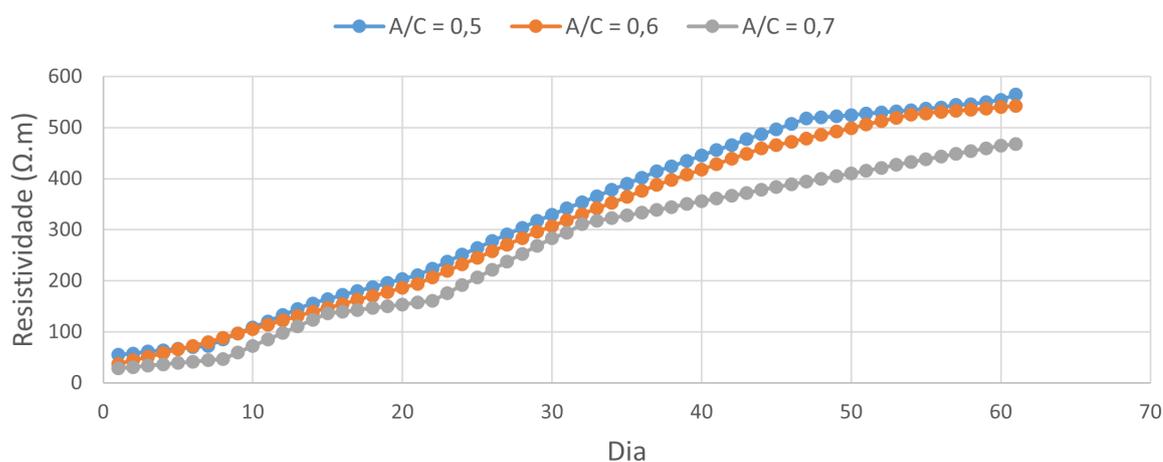


Figura 4.2 – Resistividade elétrica dos três concretos confeccionados com o cimento **CP II F-32**, para as relações $A/C = 0,5$; $0,6$ e $0,7$. Medições em laboratório (fora do solo).

Pode-se observar que na [Figura 4.2](#) o comportamento das três curvas de resistividade são similares e próximos, durante os primeiros 30 dias. Esse mesmo comportamento foi observado anteriormente na [Figura 4.1](#), para o concreto com cimento CP II E. Além disso, a partir do dia 30 em diante, nota-se novamente um comportamento de descolamento da curva de resistividade para o concreto com $A/C = 0,7$ em relação aos concretos com $A/C = 0,5$ e $0,6$. Contudo, na [Figura 4.2](#) não chega a ser observado um platô tão bem definido como o que é apresentado para na [Figura 4.1](#), para $A/C = 0,7$. Curiosamente, os dados da [Figura 4.2](#) sugerem que do dia 45 em diante a curva para $A/C = 0,5$ chega a um platô muito mais bem definido que nas outras demais curvas (com $A/C = 0,6$ e $0,7$).

Uma fato importante a se notar na [Figura 4.2](#) é que, no dia 61, a resistividade do concreto confeccionado com uma $A/C = 0,7$ apresentou um valor de $467 \Omega.m$, enquanto que para $A/C = 0,6$ mediu-se um valor de $542 \Omega.m$ e, para $A/C = 0,5$, um valor de $565 \Omega.m$. Ou seja, uma diferença de $98 \Omega.m$ entre a resistividade para $A/C = 0,5$ e $0,7$.

Em seguida, analisando-se os resultados dos próximos três corpos de prova, na [Figura 4.3](#) são apresentadas as medições de resistividade (em $\Omega.m$) para os corpos de prova fabricados com o cimento CP V, e relações $A/C = 0,5$; $0,6$ e $0,7$; ou seja, tratam-se dos corpos de prova 7, 8 e 9 apresentados na [Tabela 3.2](#).

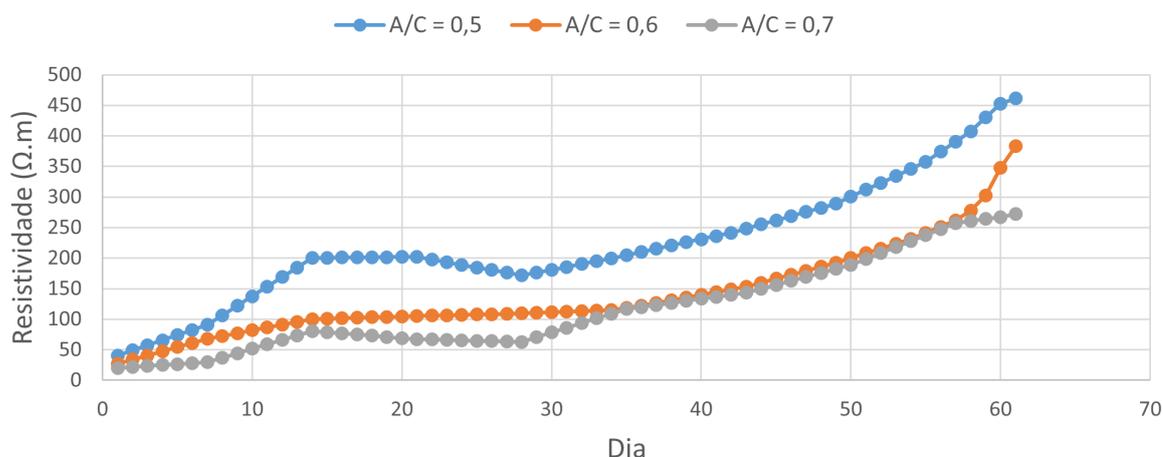


Figura 4.3 – Resistividade elétrica dos três concretos confeccionados com o cimento **CP V**, para as relações $A/C = 0,5$; $0,6$ e $0,7$. Medições em laboratório (fora do solo).

À primeira vista, já é possível observar que na [Figura 4.3](#) são indicadas curvas de resistividade versus tempo com comportamento muito diferentes dos apresentados na [Figura 4.1](#) e na [Figura 4.2](#). Nos primeiros 30 dias notou-se uma oscilação considerável na resistividade para $A/C = 0,5$ e $0,7$. No entanto, do dia 30 ao dia 57 o comportamento das curvas para $A/C = 0,6$ e $0,7$ foram praticamente idênticos em valor de resistividade. Por outro lado, do dia 58 ao 61, notou-se uma abrupta e isolada elevação na resistividade da curva de $A/C = 0,6$; o que não conseguiu-se explicar. Já, quanto à curva de $A/C = 0,5$, do dia 30 em diante, observou-se um comportamento muito parecido com as demais curvas, apresentando, no entanto, valores de resistividade acima das demais.

Conforme a [Figura 4.3](#) indica, no dia 61 foram registrados valores de resistividade de $272 \Omega.m$ para $A/C = 0,7$; enquanto que foi medido um valor de $384 \Omega.m$ para $A/C = 0,6$; e um valor de $462 \Omega.m$ para $A/C = 0,5$. Portanto, uma diferença entre o valor máximo e mínimo de $190 \Omega.m$.

Finalmente, após serem analisadas as medições dos nove tipos de concreto apresentadas na [Figura 4.1](#), [4.2](#) e [4.3](#), **chegou-se à conclusão de que o tipo de concreto avaliado que se apresentou mais promissor para a utilização em aterramentos encapsulados por concreto foi o CP V com $A/C = 0,7$, pois após 61 dias de secagem forneceu a menor resistividade entre os nove concretos avaliados, a saber $272 \Omega.m$** . Em segundo lugar ficou o CP II E-32 com $A/C = 0,7$, o qual forneceu uma resistividade de $348 \Omega.m$. Além disso, notou-se que uma elevada relação água/cimento teve uma importante contribuição na redução da

resistividade do concreto.

4.2 Medições de Resistência de Aterramento das Hastes Concretadas

Considerando os resultados anteriormente apresentados na [Seção 4.1](#), optou-se por utilizar o concreto preparado com cimento CP V e relação água/cimento de 0,7; ou seja, com mesma composição do corpo de prova 9 da [Tabela 3.2](#). Dessa forma, foi construída uma haste concretada, seguindo os procedimentos apresentados na [Seção 3.4](#) e, em seguida, foram realizadas medições de resistência de aterramento em conformidade com o disposto na [Seção 3.5](#). Vale salientar que, além da haste concretada, também foi realizado um aterramento convencional utilizando uma haste convencional (sem encapsulamento de concreto), de mesmo comprimento que as hastes concretadas, a qual serviu de referência para se avaliar a redução da resistência de aterramento advinda do concreto. Na [Figura 4.4](#) são apresentados os resultados de medições de resistência de aterramento tanto para a haste concretada quanto para a convencional, às 13:00h e às 18:00h.

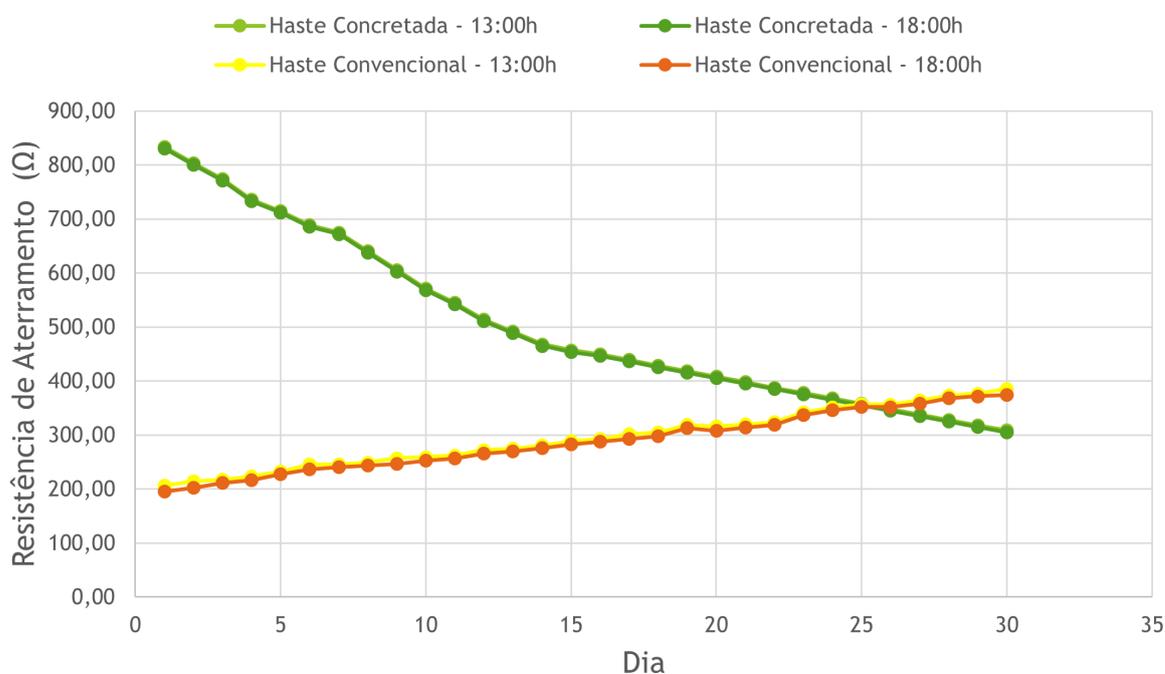


Figura 4.4 – Resistência de Aterramento (Ω) para: (i) Haste Concretada, com 1 m de comprimento e diâmetro de concreto de 10 cm, e (ii) Haste Convencional (sem encapsulamento de concreto), com 1 m de comprimento. Medições realizadas no horário das 13:00h e das 18:00h para ambas hastes. (Dados brutos no Apêndice A)

A partir dos dados apresentados na [Figura 4.4](#) (também disponíveis no Apêndice A, na [Tabela A.4](#) e [Tabela A.5](#)) algumas observações podem ser realizadas. O primeiro fenômeno observado foi que, com o passar dos 30 dias após a construção de ambos os aterramentos (concretado e convencional), nota-se que o aterramento concretado apresentou uma resistência de aterramento progressivamente decrescente. De forma que no dia 1 a resistência apresentada foi de 832 Ω enquanto que no dia 30 foi de 307 Ω , o que equivale a uma redução 63% no valor da resistência após um mês. Isso, muito provavelmente deve-se a já conhecida propriedade higroscópica do concreto, ou seja, sua capacidade de absorver e reter água na sua estrutura. Assim, uma vez inserido no solo, o concreto começa a absorver a umidade do solo e reter na sua estrutura, fazendo com que sua resistividade reduza à medida que absorve a umidade.

Outro fato observado é que, nos 25 primeiros dias, a resistência da haste convencional foi inferior à da haste concretada, sugerindo que, para um melhor aproveitamento da técnica de encapsulamento de aterramentos por concreto, é importante que o aterramento seja construído com pelo menos um mês antes da sua utilização. Dessa forma, o concreto teria um tempo de maturação quanto à sua resistividade, para que após isso o aterramento possa ser utilizado.

Observando-se a [Figura 4.4](#) pode-se notar que após o 25º dia, a haste concretada apresentou uma resistência inferior à da haste convencional. **Finalmente, no 30º dia, a haste convencional apresentou uma resistência de 380 Ω enquanto a haste concretada forneceu um valor de 307 Ω , indicando que a utilização do encapsulamento de concreto foi capaz de fornecer uma redução de aproximadamente 20% no valor da resistência do aterramento.** Este resultado foi obtido em um período de temperaturas altas e umidades baixas na cidade de Vitória da Conquista. Possivelmente, se houvessem dias mais úmidos, a diferença no valor da resistência seria bem maior, dada a capacidade do concreto de absorver a umidade do solo.

Nota-se também que, mesmo após 30 dias de observação, a resistência da haste concretada não se estabilizou em um valor (patamar). Ou seja, existe a possibilidade de que se a resistência fosse medida por mais do que 30 dias, poderia-se chegar a valores de resistência menores ainda, sendo essa uma proposta interessante para trabalhos futuros.

Quanto ao gráfico da resistência da haste convencional (na [Figura 4.4](#)), observa-se que a resistência manteve uma sólida tendência de aumento durante os dias

observados. O motivo desse fenômeno ainda não ficou claro. Contudo, uma possível explicação é que o conteúdo de água do solo tenha se reduzido ao longo dos 30 dias de medições, fazendo com que a resistividade do solo aumentasse e consequentemente a resistência de aterramento da haste convencional também. Caso essa hipótese seja verdadeira, a haste concretada conseguiu absorver água do solo à uma taxa superior que a própria elevação da resistividade do solo devido à uma escassez de água no solo. Infelizmente, não foi possível fazer uma observação mais acurada da resistividade do solo devido a limitações do terrômetro utilizado, o qual possuía apenas 3 eletrodos e só permitia medições de resistência de aterramento.

Finalmente, os resultados das medições indicam que a utilização de um encapsulamento de concreto fabricado com cimento CP V e uma relação A/C de 0,7 (ou seja, a mesma composição do corpo de prova 9 da [Tabela 3.2](#)), foi capaz de, em um aterramento real, reduzir a resistência de aterramento em aproximadamente 20%, após 30 dias, no solo avaliado. Além disso, essa redução poderia ser potencialmente maior para solos com maior resistividade.

Capítulo 5

Considerações Finais

Neste trabalho foi apresentado uma avaliação do efeito que o tipo de cimento, bem como a relação água/cimento (a/c), tem na resistividade elétrica do concreto, com o objetivo de obtenção de um concreto que seja promissor para uso em aterramentos encapsulados por concreto. Além disso, objetivou-se a construção de uma terramento do tipo haste encapsulada por concreto utilizando o melhor concreto entre os avaliados (quanto à resistividade elétrica).

Três tipos de cimento e três relações a/c foram avaliados, resultando em um total de nove tipos de concreto estudados. Assim, nove corpos de prova de concreto foram confeccionados e testados quanto a sua resistividade durante 61 dias, sendo selecionado o concreto do corpo de prova com menor resistividade. Após isso, foi construído um aterramento com haste concretada utilizando o concreto selecionado e, em seguida, medida sua resistência de aterramento durante 30 dias.

Os resultados obtidos indicaram que **o concreto produzido com o tipo de cimento CP V e relação a/c de 0,7 apresentou a menor resistividade elétrica, após 61 dias de medições (fora do solo)**, sendo obtido um valor de 350 Ω .m.

As medições de resistência de aterramento da haste encapsulada por concreto, indicaram que, **após 30 dias, a resistência da haste concretada foi aproximadamente 20% inferior à uma haste convencional de mesmo comprimento**. Mais que isso, os gráficos de resistência versus tempo da haste concretada não apresentaram uma acomodação ou valor de patamar, indicando uma possibilidade de reduções ainda maiores no valor da resistência caso fossem efetuadas medições por mais de 30 dias.

Capítulo 6

Sugestões para Trabalhos Futuros

Após a realização do trabalho verificou-se algumas possibilidades e caminhos para que fossem desenvolvidos trabalhos com maior profundidade e alcance. Portanto, a seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- 1) Verificar concretos preparados com outros tipos de cimentos para além dos que foram avaliados;
- 2) Monitorar a resistividade por mais de 60 dias e a resistência de aterramento por mais de 30 dias;
- 3) Realizar a verificação de corpos de prova de concreto enterrados dentro do solo, de forma a se incluir a interação entre concreto e solo;
- 4) Realizar a inspeção do sistema de aterramento, tanto o encapsulado em concreto quanto o convencional, um ano após a instalação, a fim de verificar a integridade física de ambos;
- 5) Estudar sistemas de aterramento encapsulado por concreto em três tipos distintos de solo, caracterizados por baixa, média e alta resistividade;
- 6) Estabelecer correlações entre os níveis de umidade, pressão atmosférica e a resistência de aterramento das hastes encapsuladas por concreto;

REFERÊNCIAS

ABNT-NBR:15715. *ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT-NBR 15715 - Sistemas de aterramento de subestações - requisitos*. [S.l.], 2009. (Citado na página 7.)

ABNT-NBR:16697. *ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT-NBR 16697 - Cimento Portland-Requisitos*. [S.l.], 2018. v. 12. (Citado na página 29.)

ABREU, A. G. de. *Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais*. 142 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998. (Citado 2 vezes nas páginas 18 and 19.)

AGUIAR, C. A. *Concreto de cimento Portland branco estrutural: análise da adição de pigmentos quanto a resistência à compressão*. 88 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. (Citado na página 17.)

AL-ABDUL-HADI, S. S. *Electrical Resistivity of Concrete in Relation to Corrosion of Reinforcement*. 277 p. Dissertação (Mestrado) — King Fahd University of Petroleum & Minerals, Saudi Arabia, 2006. (Citado na página 17.)

ANDROVITSANEAS, V. P.; GONOS, I. F.; STATHOPULOS, I. A. Performance of ground enhancing compounds during the year. In: IEEE. *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Austria: Viena, 2012. p. 1–5. (Citado na página 7.)

AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: a review. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2017, 2017. (Citado na página 14.)

BORTOLUZZI, H. *Choque elétrico - Barra Shopping Sul*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. (Citado na página 10.)

BRAMESHUBER, W. et al. Non-destructive determination of the water-content in the concrete cover using the multiring-electrode. In: *International Symposium (NDT-CE 2003) Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. [S.l.: s.n.], 2003. (Citado na página 16.)

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, M. C. Standardization, to a reference of 25 c, of electrical resistivity for mortars and concretes in saturated or isolated conditions. *Materials Journal*, v. 99, n. 2, p. 119–128, 2002. (Citado na página 18.)

- CAVALIN, G.; CERVELIN, S. *Instalações elétricas prediais: conforme norma NBR 5410: 2004*. [S.l.]: Erica, 2006. (Citado na página 5.)
- CHI, J. M.; HUANG, R.; YANG, C. C. Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method. *Journal of marine science and technology*, v. 10, n. 1, p. 3, 2002. (Citado na página 16.)
- DALZIEL, C. F. Dangerous electric currents. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 65, n. 12, p. 1123–1124, Dec. 1946. (Citado na página 11.)
- DIAS, A. D. *Malhas de aterramento em subestações energizadas: medições e análises*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2011. (Citado na página 23.)
- Eleto Energia Materiais Elétricos. Aterramento elétrico: você entende a sua importância? <<https://eletoenergia.com.br/aterramento/aterramento-eletrico-voce-realmente-entende-a-sua-importancia/>> [Acessado em 14 de Dezembro de 2023]. 2023. (Citado na página 6.)
- GOWERS, K.; MILLARD, S. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion. *Aci Mater. J*, v. 96, n. 5, p. 536–541, 1999. (Citado 2 vezes nas páginas 25 and 26.)
- HALLMARK, C. L. The use of conductive cement to extend and protect made ground electrodes. In: *In: Proceedings of the AREMA Annual Conference*. Dallas, DA, USA: [s.n.], 2000. p. 9–13. (Citado 2 vezes nas páginas 8 and 9.)
- HELENE, P. R. do L. *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. (Citado na página 15.)
- HOPPE, T. F. *Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz*. 146 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005. (Citado 3 vezes nas páginas 16, 22, and 26.)
- IEEE Std. 80. *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. [S.l.], 2000. 1-192 p. (Citado na página 11.)
- IEEE Std. 81. *IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems - in IEEE Std 81.2-1991*. [S.l.], 1992. 1-112 p. (Citado na página 11.)
- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. *Aterramento Elétrico*. 4. ed. [S.l.]: Sagra-DC Luzzatto, 1998. 214 p. (Citado 2 vezes nas páginas 1 and 14.)
- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. *Aterramento Elétrico*. 5. ed. Florianópolis: Edição do Autor - LabPlan, 2002. (Citado 6 vezes nas páginas 7, 9, 10, 11, 13, and 23.)
- KOLEVA, D. A. et al. Electrical resistivity and microstructural properties of concrete materials in conditions of current flow. *Cement and Concrete Composites*, v. 30, n. 8, p. 731–744, 2008. (Citado na página 18.)

LEITE, C. M.; FILHO, M. L. P. *Técnicas de aterramentos elétricos: cálculos projetos e softwares para aterramentos elétricos*. 4. ed. [S.l.]: Oficina de Mydia, 1996. (Citado 2 vezes nas páginas 6 and 14.)

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G. Comportamento da corrente elétrica durante ensaio de migração de cloretos em diferentes amostras de concreto. In:

.Santiago:[s.n.],2014.p. 1--9. (Citado na página 15.)

MENDES, S. S. E. et al. Reinforced concrete resistivity measurement techniques. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. [S.l.: s.n.], 1991. v. 91, n. 1, p. 71–88.

(Citado 3 vezes nas páginas 15, 26, and 27.)

MENDES, S. S. E. et al. Electrical resistivity as a durability parameter for concrete design: Experimental data versus estimation by mathematical model. *Construction and Building Materials*, v. 192, p. 610–620, 2018. (Citado na página 22.)

NETO, C. Z. M. *Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz e diferentes teores de carbono grafítico*. 165 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011. (Citado na página 29.)

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. (Citado 2 vezes nas páginas 19 and 20.)

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015. 912 p. (Citado na página 15.)

POLDER, R. B. et al. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a rilem tc 154-emc technical recommendation. *Materials and Structures*, v. 33, p. 603–611, Dec. 2000. (Citado 2 vezes nas páginas 15 and 17.)

PREMINGER, J. Evaluation of concrete encased electrodes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-11, n. 6, p. 664–668, 1975. (Citado na página 8.)

REAL, L. V. *Efeito de adições pozolânicas na estimativa de vida útil do concreto exposto a cloretos através da resistividade elétrica superficial*. 148 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. (Citado na página 29.)

ROWLAND, P. W. Industrial system grounding for power, static, lightning, and instrumentation, practical applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 31, n. 6, p. 1358–1362, Nov.-Dec. 1995. (Citado na página 8.)

SANTOS, L. *Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto*. 161 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2006. (Citado 3 vezes nas páginas 15, 19, and 22.)

VIANA, M. J.; FERREIRA, S. dos S. *Proteção contra choques elétricos em canteiros de obras*. São Paulo, 2018. (Citado na página 10.)

VISACRO, S. *Aterramentos Elétricos*. [S.l.]: Artliber, 2002. 160 p. (Citado 4 vezes nas páginas 5, 7, 13, and 14.)

WENNER, F. A method of measuring earth resistivity. *US Department of Commerce, Bureau of Standards, Washington*, v. 12, n. S-258, p. 469–478, 1916. (Citado 6 vezes nas páginas x, 5, 23, 31, 35, and 36.)

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. *Electrical resistivity of concrete A Literature Review*. Skokie, Illinois, USA, 2003. 57p p. (Citado na página 23.)

WHITTINGTON, H. W.; MACCARTER, J.; FORDE, M. C. The conduction of electricity through concrete. *Magazine of concrete research*, v. 33, n. 114, p. 48–60, Mar. 1981. (Citado na página 21.)

WOELFL, G. A.; LAUER, K. The electrical resistivity of concrete with emphasis on the use of electrical resistance for measuring moisture content. *Magazine of concrete research*, v. 1, n. 2, p. 64–67, Mar. 1979. (Citado 2 vezes nas páginas 19 and 21.)

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. *Física III: Eletromagnetismo*. São Paulo: Person Education do Brasil, 2009. (Citado 2 vezes nas páginas 17 and 18.)

APÊNDICE A

Dados de Medições

Neste apêndice, a seguir, são apresentados na [Tabela A.1](#), [Tabela A.2](#) e [Tabela A.3](#) os dados brutos de medições de resistividade elétrica dos corpos de prova de concreto, os quais foram apresentados graficamente na [Figura 4.1](#), [Figura 4.2](#) e [Figura 4.3](#).

Quanto à [Tabela A.4](#) e a [Tabela A.5](#), as mesmas apresentam os dados brutos das medições de resistência de aterramento da haste convencional e da haste concretada apresentadas na [Figura 4.4](#).

Tabela A.1 – Resistividade elétrica dos três concretos confeccionados com o cimento **CP II E-32**, para as relações A/C = 0,5; 0,6 e 0,7. Medições em laboratório (fora do solo). *Figura 4.1.*

Dias	RESISTIVIDADE ($\Omega.m$)			Dias	RESISTIVIDADE ($\Omega.m$)		
	A/C= 0,5	A/C= 0,6	A/C= 0,7		A/C = 0,5	A/C = 0,6	A/C = 0,7
1	43,85	30,58	22,96	32	342,61	323,69	302,81
2	46,82	37,70	25,11	33	354,73	335,14	305,18
3	49,79	44,82	27,26	34	366,85	346,59	307,55
4	52,76	51,94	29,41	35	378,97	358,04	309,92
5	55,73	59,06	31,56	36	391,09	369,49	312,29
6	58,70	66,18	33,71	37	403,21	380,94	314,66
7	61,67	73,30	35,86	38	413,55	391,17	317,03
8	73,65	81,78	45,23	39	423,89	401,4	319,4
9	85,63	90,26	54,60	40	434,23	411,63	320,86
10	97,61	98,74	63,97	41	444,57	421,86	322,32
11	109,59	107,22	73,34	42	454,91	432,09	323,78
12	121,57	115,70	82,71	43	465,25	442,32	325,24
13	133,55	124,18	92,08	44	475,59	452,55	326,7
14	145,53	132,66	101,45	45	485,93	459,22	328,16
15	153,37	140,46	114,12	46	496,27	465,89	329,62
16	161,21	148,26	125,77	47	506,61	472,56	331,08
17	169,05	156,06	138,44	48	508,98	479,23	332,54
18	176,89	163,86	151,11	49	511,35	485,9	333,67
19	184,73	171,66	163,78	50	513,72	492,57	334,8
20	192,57	179,46	176,45	51	516,09	499,24	335,93
21	200,41	187,26	189,12	52	518,46	505,91	337,06
22	213,64	200,02	201,79	53	520,83	512,58	338,19
23	226,87	212,78	214,46	54	523,2	519,25	339,32
24	240,1	225,54	226,58	55	525,57	521,6	340,45
25	253,33	238,3	238,7	56	527,94	523,95	341,58
26	266,56	251,06	250,82	57	530,31	526,3	342,71
27	279,79	263,82	262,94	58	534,69	528,65	343,84
28	293,02	276,58	275,06	59	539,07	531	344,97
29	306,25	289,34	283,52	60	543,45	533,35	346,1
30	318,37	300,79	291,98	61	547,83	535,70	347,69
31	330,49	312,24	300,44				

Tabela A.2 – Resistividade elétrica dos três concretos confeccionados com o cimento **CP II F-32**, para as relações A/C = 0,5; 0,6 e 0,7. Medições em laboratório (fora do solo). *Figura 4.2.*

Dias	RESISTIVIDADE ($\Omega.m$)			Dias	RESISTIVIDADE ($\Omega.m$)		
	A/C= 0,5	A/C= 0,6	A/C= 0,7		A/C = 0,5	A/C = 0,6	A/C = 0,7
1	54,82	36,95	28,37	32	353,58	330,06	311,42
2	57,79	44,07	31,04	33	365,7	341,51	316,95
3	61,77	51,19	33,71	34	377,82	352,96	322,48
4	63,73	58,31	36,38	35	389,94	364,41	328,01
5	66,86	65,43	39,05	36	402,06	375,86	333,54
6	69,67	72,55	41,72	37	414,18	387,31	339,07
7	72,64	79,67	44,39	38	424,52	397,54	344,6
8	84,62	88,15	47,06	39	434,86	407,77	350,13
9	96,6	96,63	59,73	40	445,2	418	355,66
10	108,58	105,11	72,4	41	455,54	428,23	361,19
11	120,56	113,59	85,07	42	465,88	438,46	366,72
12	132,54	122,07	97,74	43	477,7	448,69	372,25
13	144,52	130,55	110,41	44	486,56	458,92	377,78
14	155,96	139,03	123,08	45	496,9	465,59	383,31
15	164,34	146,83	135,75	46	507,24	472,26	388,84
16	172,18	154,63	139,31	47	517,58	478,93	394,37
17	180,02	162,43	142,87	48	519,95	485,6	399,61
18	187,86	170,23	146,43	49	522,32	492,27	405,14
19	195,7	178,03	149,99	50	524,69	498,94	410,31
20	203,54	185,83	153,55	51	527,06	505,61	415,84
21	211,38	193,63	157,11	52	529,43	512,28	421,31
22	223,89	206,39	160,67	53	531,8	518,95	426,84
23	237,84	219,15	176,01	54	534,17	525,62	432,37
24	251,07	231,91	191,35	55	536,54	527,97	437,6
25	264,32	244,67	206,69	56	538,91	530,32	443,13
26	277,53	257,43	222,03	57	544,87	532,67	448,66
27	290,76	270,19	237,37	58	545,66	535,02	454,19
28	303,99	282,95	252,71	59	550,04	537,37	459,47
29	317,22	295,71	268,05	60	554,42	539,72	465
30	329,34	307,16	283,39	61	564,59	542,07	467,34
31	341,46	318,61	293,84				

Tabela A.3 – Resistividade elétrica dos três concretos confeccionados com o cimento **CP V**, para as relações A/C = 0,5; 0,6 e 0,7. Medições em laboratório (fora do solo). *Figura 4.3.*

Dias	RESISTIVIDADE ($\Omega.m$)		
	A/C= 0,5	A/C= 0,6	A/C= 0,7
1	40,72	26,89	19,87
2	49,04	33,73	21,54
3	57,36	40,57	23,21
4	65,68	47,41	24,88
5	74,05	54,25	26,55
6	82,37	61,09	28,22
7	90,69	67,93	29,89
8	106,34	72,55	37,11
9	121,99	77,17	44,33
10	137,64	81,79	51,55
11	153,29	86,41	58,77
12	168,94	91,03	65,99
13	184,59	95,65	73,21
14	200,24	100,27	80,43
15	200,51	100,97	78,54
16	200,78	101,67	76,65
17	201,05	102,37	74,76
18	201,32	103,07	72,87
19	201,59	103,77	70,98
20	201,86	104,47	69,09
21	202,13	105,17	67,2
22	197,76	105,794	66,59
23	193,39	106,418	65,98
24	189,02	107,042	65,37
25	184,65	107,666	64,76
26	180,28	108,29	64,15
27	175,91	108,914	63,54
28	171,54	109,538	62,93
29	176,22	110,162	70,6
30	180,9	111,102	78,27
31	185,58	112,042	85,94

Dias	RESISTIVIDADE ($\Omega.m$)		
	A/C = 0,5	A/C = 0,6	A/C = 0,7
32	190,26	112,982	93,61
33	194,94	113,922	101,28
34	199,62	114,862	108,95
35	204,3	118,342	116,62
36	209,62	121,822	119,86
37	214,94	126,302	123,1
38	220,26	130,782	126,34
39	225,58	135,262	130,12
40	230,9	139,742	133,36
41	236,22	144,222	136,6
42	241,54	148,702	139,84
43	248,32	153,182	143,08
44	255,1	159,702	149,6
45	261,88	166,222	156,12
46	268,66	172,742	162,64
47	275,44	179,262	169,16
48	282,22	185,782	175,68
49	289,19	192,302	182,2
50	300,53	200,122	188,72
51	311,87	207,942	198,5
52	323,21	215,762	208,28
53	334,55	223,582	218,06
54	345,89	231,402	227,84
55	357,23	241,362	237,62
56	373,96	251,322	247,4
57	390,69	261,282	257,18
58	407,42	277,132	260,53
59	430,17	302,102	263,88
60	452,92	347,722	267,23
61	461,82	383,64	272,23

Tabela A.4 – Medições do **aterramento de haste convencional**: resistência de aterramento (Ω), umidade e pressão atmosférica.

Dia	Hora: 13:00h			Hora: 18:00h		
	Umidade	Pressão atm (hPa)	Resistência (Ω)	Umidade	Pressão atm (hPa)	Resistência (Ω)
1	28	1009	206,0	40	1010	195,4
2	34	1011	214,0	41	1011	202,6
3	36	1009	217,0	46	1011	211,5
4	32	1009	223,0	48	1010	216,3
5	39	1010	232,2	53	1011	227,6
6	40	1010	245,0	42	1011	236,3
7	28	1010	245,0	40	1010	240,0
8	34	1011	249,0	41	1011	243,1
9	36	1009	257,0	46	1011	246,7
10	32	1009	259,0	48	1010	252,8
11	39	1010	262,0	56	1011	256,8
12	40	1010	272,0	42	1011	265,7
13	28	1009	275,0	56	1010	269,8
14	34	1011	280,5	42	1011	275,9
15	36	1009	289,0	40	1012	283,0
16	32	1009	293,0	40	1010	287,9
17	39	1010	302,0	41	1011	292,8
18	40	1010	305,0	46	1011	297,7
19	35	1011	319,0	40	1010	313,0
20	33	1011	316,0	41	1011	308,0
21	28	1011	320,0	46	1011	314,0
22	35	1011	324,0	47	1011	319,0
23	36	1009	342,0	56	1010	337,0
24	32	1009	351,0	42	1008	346,0
25	39	1010	357,0	40	1015	352,0
26	40	1010	356,5	41	1013	351,5
27	36	1014	364,0	46	1014	358,2
28	32	1013	373,1	48	1014	368,1
29	39	1014	376,5	56	1013	371,5
30	40	1013	385,0	42	1014	374,0

Tabela A.5 – Medições do aterramento de *haste encapsulada por concreto*: resistência de aterramento (Ω), umidade e pressão atmosférica.

Dia	Hora: 13:00h			Hora: 18:00h		
	Umidade	Pressão atm (hPa)	Resistência (Ω)	Umidade	Pressão atm (hPa)	Resistência (Ω)
1	28	1009	833,00	40	1010	830,00
2	34	1011	803,20	41	1011	800,20
3	36	1009	774,10	46	1011	771,10
4	32	1009	735,80	48	1010	732,80
5	39	1010	715,00	53	1011	712,00
6	40	1010	688,67	42	1011	685,70
7	28	1010	675,00	40	1010	672,00
8	34	1011	640,34	41	1011	637,30
9	36	1009	605,68	46	1011	602,70
10	32	1009	571,00	48	1010	568,00
11	39	1010	545,00	56	1011	542,00
12	40	1010	514,00	42	1011	511,00
13	28	1009	492,00	56	1010	489,00
14	34	1011	468,00	42	1011	465,00
15	36	1009	457,00	40	1012	453,00
16	32	1011	449,00	49	1010	446,00
17	35	1010	439,00	41	1011	436,00
18	40	1010	428,00	46	1011	425,00
19	35	1011	418,00	40	1010	415,00
20	33	1011	408,00	41	1011	405,00
21	28	1011	398,00	46	1011	395,00
22	35	1011	387,00	47	1011	385,00
23	36	1009	378,00	56	1010	375,00
24	32	1009	368,00	42	1012	365,00
25	39	1010	358,00	40	1015	355,00
26	40	1010	348,00	41	1013	345,00
27	36	1014	338,00	46	1014	335,00
28	32	1013	328,00	48	1014	325,00
29	39	1014	318,00	56	1013	315,00
30	40	1013	309,00	42	1014	305,00