

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ARMADURA NA MEDIÇÃO DE
RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO**

ANA CAROLINA DE SOUSA BRAZ

GABRIEL DUARTE DO NASCIMENTO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO DE 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ARMADURA NA MEDIÇÃO DE
RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO**

**ANA CAROLINA DE SOUSA BRAZ
GABRIEL DUARTE DO NASCIMENTO**

ORIENTADOR: MARCOS HONORATO DE OLIVEIRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO –2019
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ARMADURA NA MEDIÇÃO DE
RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO**

**ANA CAROLINA DE SOUSA BRAZ
GABRIEL DUARTE DO NASCIMENTO**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. Marcos Honorato de Oliveira, D.Sc (UnB)
(Orientador)

Prof. João Henrique da Silva Rêgo, D.Sc (UnB)
(Examinador interno)

Carlos Henrique Linhares Feijão, M.Sc. ECP(DETEC/DE/NOVACAP)
(Examinador externo)

BRASÍLIA/DF, 6 DE DEZEMBRO DE 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

BRAZ, ANA CAROLINA DE SOUSA

NASCIMENTO, GABRIEL DUARTE

Análise Da Influência Da Armadura Na Medição De Resistividade Elétrica

Superficial do Concreto

[Distrito Federal] 2019.

xxv, 40p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2019)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Ensaio não destrutivos

2. Inspeção

3. Controle tecnológico

4. Análise Experimental

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Bacharel)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BRAZ, A.C.S.; NASCIMENTO, G.D.(2018). Análise Da Influência Da Armadura Na Medição De Resistividade Elétrica Superficial do Concreto. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 40p.

CONCESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ana Carolina de Sousa Braz, Gabriel Duarte do Nascimento

TÍTULO: Análise Da Influência Da Armadura Na Medição De Resistividade Elétrica Superficial do Concreto

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Ana Carolina de Sousa Braz
SQN 405, Bloco N, Apartamento 103
CEP: 70846140 Brasília – DF – Brasil
e-mail: anadesousabraz@gmail.com

Gabriel Duarte do Nascimento
Qi 22 Conj f Casa 114 Guará I
CEP: 71015068 Brasília – DF - Brasil
E-mail: gabrielduarten@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Eu, Ana Carolina de Sousa Braz, agradeço aos meus familiares por todo o apoio, em especial a minha mãe, pela ajuda e acompanhamento de todos meus dilemas, principalmente nesse período em que precisei me submeter a uma cirurgia as vésperas da entrega da monografia.

Ao professor orientador Marcos Honorato por me guiar e incentivar não apenas nesta pesquisa, como também na vida.

Aos meus amigos do bonde, os filósofos, as do Iti, os stags, e as mamacitas, que me presenteiam com seu carinho, paciência e bom humor, tornando essa trajetória mais alegre e fácil de ser percorrida

Aos meus alunos do projeto de inglês na estrutural, por todos os abraços apertados, todos tão inocentes e curiosos, sempre preocupados com a teacher.

Aos meus líderes na Votorantim Cimentos, Oseias, Waldiley Roberto, Diana e Mauricio, por todos os ensinamentos e orientações

Aos colegas, professores e funcionários da Universidade de Brasília.

Eu, Gabriel Duarte do Nascimento, primeiramente, agradeço ao meus mais velhos, que sem eles não estaria aqui, a Leila, minha mãe que é exemplo de espontaneidade e seriedade caminhando lado a lado, você que me ensinou e ensina todos os dias algo novo, que tem a paciência com o seu filho mais impaciente e sempre disposta a me guiar para caminhos melhores e menos doloridos nessa vida. Marcelo, meu pai, a quem me assemelho muito, mais do que a aparência, que sempre me ensina, pelo exemplo que é, o que é ser homem, cujo o qual nunca falhou com seus compromissos e sempre esteve presente para aconselhar e orientar, antes mesmo de um anuncio meu por ajuda. Agradeço aos meus irmãos Mateus, Lara e Arthur, que para cada confusão, briga e estresse com certeza há o dobro em risadas, brincadeiras e felicidade. Que me fazem de exemplo e servem de exemplo, me ajudam a lembrar a importância de certas conquistas, que por agora, vocês que buscam, sem vocês não saberia o que é viver em comunidade.

Agradeço a Kátia Favilla, minha eterna madrastra e segunda mãe, a quem sempre me ensinou a levar a vida com mais leveza, sem perder a seriedade no que faz e fala. Quem me ajuda sempre e que me faz pensar diferente a cada conversa por mais boba que seja.

Agradeço ao B10, grupo de estudos e de amigos, que a UnB me trouxe, com a noites mal dormidas realizando projetos, estudos nas vésperas de provas, listas de exercícios a serem entregue, sem seus honrosos membros: Marcello G., Augusto X., Pedroza P. e o honorário membro Ian P., essa experiência com certeza teria sido mais curta e inacabada. Não podendo esquecer do bonde formado por pessoas únicas e que me trouxeram tantas risadas e companhia para bares, Surik, Igor, Guto, Maíra, Evaristo, Madrilles, Rato, Ângelo, Gabriel, Malagutti, Camilla, Loris, Gustavo, Rappel, Mineira, Mari, Felipe, Yann e vários outros. Vocês agregaram muito valor a essa experiência única.

Um agradecimento especial a Maíra Vitoriano que sempre esteve ali para me fazer companhia entre uma aula e outra, com um descanso nos banquinhos da FT, sempre disposta a me ouvir e confiante ao compartilhar suas agonias também, sem você as idas e vindas da UnB seriam chatas e frustrantes. Sem esquecer da Carolina Jardim que me acompanha antes dessa etapa e mesmo com afastamentos e aproximações fez questão de saber como eu estava e se estava concentrado nos estudos, porém com frequência querendo me levar para sair e relaxar quando necessário, ou seja, sempre. Agradecimento profundo e especial pois sem você não teria conhecido uma pessoa especial para nós dois.

Nunca esqueceria e nem tenho palavras suficientes para agradecer a Jéssica Amorim, Deusa, que sem ela com certeza esse projeto não estaria finalizado, mas além disso pelos momentos de carinho, risadas e afeto. Me ensina diariamente e constantemente, obrigado por acreditar em mim mesmo quando eu já tinha desistido, obrigado por me fortalecer e caminhar ao meu lado, do fundo do meu coração, te amo!

Não posso deixar de agradecer aos professores da UnB que independente da interação e da soma de experiências, ajudaram a forma o tipo de profissional que sou hoje,

E para aqueles que por ventura acumularam experiência ruins sobre mim ou desentendimentos, só posso informa-los que tão pouco me importa, mas espero que feliz possam ser suas vidas. Axé para todos.

RESUMO

Os ensaios não destrutíveis têm se mostrado uma ótima opção de monitoramento, controle e análise das propriedades de estruturas de concreto armado por serem uma estratégia de investigação de fácil operação, baixo custo, rápida execução, com disponibilidade de resultados imediata e ausência de danos ao material analisado. Contudo, apesar do seu grande potencial de desenvolvimento, devido a sua recente inclusão ao mercado, tais procedimentos carecem de confiabilidade. Não existem normas nacionais reguladoras para a maioria desses procedimentos e as normas internacionais trazem diferentes abordagens, ocasionando uma certa resistência de aceitação do mercado. Desta forma, as propriedades das estruturas analisadas dependem, principalmente, da experiência profissional do operador do ensaio, o que resulta na impossibilidade de comparação de resultados de diferentes pesquisadores visto a ausência de uma padronização de uso.

Este trabalho visa estudar a influência da armadura sob aplicação da sonda de Wenner, mais especificamente o aparelho Resipod da Proceq, como ferramenta de ensaio não destrutivo na detecção da resistividade do elemento estrutural. Inicialmente, serão apresentados conceitos fundamentais sobre o princípio da tecnologia e a visão do funcionamento do equipamento. Além disso, serão apresentadas pesquisas e trabalhos já realizados sobre as tecnologias, em busca de uma uniformidade de procedimentos adotados e análise da posição e distância do equipamento em relação a armadura.

Palavras Chave: Sonda de Wenner, Resistividade, Ensaio Não Destrutíveis, Controle Tecnológico.

ABSTRACT

The nondestructible testing has proven to be a great option for monitoring, controlling and analyzing the properties of reinforced concrete structures as it is an easy-to-operate, low-cost, fast-running research strategy with immediate results availability and no material damage. However, despite their great development potential, due to their recent inclusion in the market, such procedures lack reliability.

There are no national regulatory standards for most of these procedures and international standards bring different approaches, causing some resistance to market acceptance. Thus, the properties of the structures analyzed depend mainly on the professional experience of the test operator, which results in the impossibility of comparing the results of different researchers given the absence of a standardization of use.

This work aims to study the influence of reinforcement under the application of the Wenner probe, specifically Proceq's Resipod apparatus, as a non-destructive test tool in the detection of the resistivity of the structural element. Initially, we will present fundamental concepts about the technology principle and the vision of the equipment operation. In addition, research and work on the technologies will be presented, seeking a uniformity of procedures adopted and analysis of the position and distance of the equipment in relation to the reinforcement.

Wenner Probe, Resistivity, Non-Destructible Tests, Technological Control.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	5
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	5
1.2. MOTIVAÇÃO.....	9
1.3. JUSTIFICATIVA.....	9
1.4. OBJETIVOS.....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	10
2.2. PROPRIEDADE SOB INVESTIGAÇÃO.....	11
2.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	13
2.4. O EQUIPAMENTO.....	17
2.5. LIMITAÇÕES E INFLUÊNCIAS.....	19
2.5.1. FATORES INTRÍNSECOS AO CONCRETO.....	19
• RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO.....	19
• AGREGADOS.....	20
• HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.....	20
• PRESENÇA DE ARMADURA.....	21
• ADIÇÕES E ADITIVOS.....	22
• PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.....	23
2.5.2. FATORES EXTRÍNSECOS AO CONCRETO.....	24
• TEMPERATURA.....	24
• CARBONATAÇÃO.....	25

•	TEOR DE UMIDADE	26
•	CORRENTE ELÉTRICA APLICADA	26
2.6.	ESTUDO DE CASO: MEDEIROS (2001)	27
2.7.	RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS E MÉTODOS DE ENSAIO	30
2.7.1.	Recomendação técnica RILEM – Test methods for on site measurement of resistivity of concrete	31
2.7.2.	Método de ensaio FDOT - Florida method of test for concrete resistivity as an electrical indicator of its permeability – FM 5-578	32
2.7.3.	Método de ensaio WA - Resistivity of concrete – Test method WA 622.1	34
2.7.4.	Norma UNE 83988-2 - <i>Determinación de la resistividad eléctrica – Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner</i>	37
3.	METODOLOGIA	40
3.1.	Objetivo	40
3.2.	Escolha das amostras	40
3.2.1.	Características das amostras	40
3.2.1.1.	Bloco de concreto	40
3.2.1.2.	Laje Lisa	41
3.3.	Aquisição e registro dos dados	44
4.	ELABORAÇÃO, TRATAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS.....	47
4.1.	Análise da influência da armadura com medições em paralelo à barra de aço	47
4.1.1.	Bloco de concreto	47
4.1.2.	Laje	48
4.2.	Análise da influência da armadura com medições em perpendicular à barra de aço	49
4.2.1.	Bloco de concreto	49
4.2.2.	Laje	51

4.3. Análise da influência da armadura nas medidas realizadas inclinadas à 45° em relação à barra de aço	52
4.3.1. Bloco de concreto	52
4.3.2. Laje	53
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	54
6. CONCLUSÃO	55
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

Lista de Figuras

Figura 2-1 Representação gráfica do processo corrosivo (SANTOS 2006)	12
Figura 2-2 Relação entre a intensidade de corrosão das armaduras e a resistividade ôhmica (ANDRADE 1992).....	13
Figura 2-3– Esquema do método de quatro pontos (adaptação de GOWERS e MILLARD 1999)	13
Figura 2-4 - Efeito das dimensões da seção do concreto nas leituras de resistividade (GOWERS & MILLARD, 1999)	15
Figura 2-5– Estrutura do equipamento Resipod (Manual de operação Proceq)	17
Figura 2-6– Modelos do equipamento (Manual de operação Proceq)	18
Figura 2-7– Equipamento Resipod em uso (Manual de operação Proceq)	18
Figura 2-8 – Orientação de posicionamento (Manual de operação Proceq)	21
Figura 2-9– Orientação de posicionamento (Manual de operação Proceq)	22
Figura 2-10– Orientação de posicionamento – Adaptação de LENCIONI (2010)	24
Figura 2-11- Variação da resistividade com a mudança sazonal(Adaptação de Medeiros 2001)	25
Figura 2-12- Aparelho RM MKII (ensaio realizado no Laboratório de Corrosão da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo).....	27
Figura 2-13- Corpos-de-prova empregados no estudo (MEDEIROS 2001).....	28
Figura 2-14 - Influência da distância das bordas nas leituras (MEDEIROS 2001)	29
Figura 2-15-Influência da umidade nas leituras de resistividade (MEDEIROS 2001).....	29
Figura 2-16- Influência da presença da armadura sobre as leituras (MEDEIROS 2001)	30
Figura 2-17- Tomada de medidas de resistividade elétrica do concreto pelo método dos quatro pontos, segundo orientações da RILEM (2000, p. 609).....	31
Figura 2-18- Procedimento de leitura da resistividade elétrica superficial adotado pelo Departamento de Transportes da Flórida (FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2004, p. 3).....	33
Figura 2-19 Medidor de resistência adaptado para o uso em concreto (MAIN ROADS WESTERN AUSTRALIA, 1998)	35
Figura 2-20 Placa para calibração do medidor de resistência.	37
Figura 2-21 Esquema de medida da resistividade elétrica pelo método de Wenner	39

Figura 3-1 Bloco de Concreto. (Imagem Autoral)	41
Figura 3-2– Dimensões dos modelos locais ensaiados, com unidades em mm	42
Figura 3-3- Detalhes das armaduras do modelo (Siqueira, 2019).....	42
Figura 3-4- Projeto das armaduras de flexão das lajes em planta (medidas em mm)	43
Figura 3-5 Esquema de ensaio adotado para as medidas realizadas sobre e paralelamente à barra de aço.....	45
Figura 3-6 Esquema de ensaio adotado para as medidas realizadas perpendicularmente à barra de aço.....	45
Figura 3-7 Esquema de ensaio adotado para as medidas inclinadas a 45° em relação à barra de aço	46
Figura 4-1 – Dados Bloco medidos em paralelo, ResipodLink	47
Figura 4-2 Dados Bloco medido em paralelo, Excel	48
Figura 4-3 – Dados Laje medido em paralelo, ResipodLink	48
Figura 4-4 – Dados Laje medido em paralelo, Excel	49
Figura 4-5– Dados Bloco medido em perpendicular, ResipodLink.....	50
Figura 4-6- Dados Bloco medido em perpendicular, Excel	50
Figura 4-7– Dados Laje medido em perpendicular, ResipodLink	51
Figura 4-8– Dados Laje medido em perpendicular, Excel.....	51
Figura 4-9 – Dados Bloco medidos à 45°, ResipodLink.....	52
Figura 4-10– Dados Bloco medidos à 45°, Excel	53
Figura 4-11– Dados Laje medidos à 45°, ResipodLink	53
Figura 4-12– Dados Laje medidos à 45°, Excel.....	54

Lista de Tabelas

Tabela 1-1- principais tipos de END disponíveis para investigação de estruturas de concreto armado. Bungey e Millard (1996)	8
Tabela 2-1.1 – Critérios de avaliação da resistividade elétrica do Concreto (ARAUJO PANOSSIAN, 2015)	16
Tabela 2-2 Critérios de avaliação do concreto armado quanto a resistividade com relação ao risco de corrosão – CEB 192.....	16
Tabela 2-3 Planilha de registro dos dados apresentada no método de ensaio FM 5-578.....	33

Lista de Equações

Equação 1 - relação de resistência.....	Erro! Indicador não definido.
Equação 2 - resistividade.....	Erro! Indicador não definido.
Equação 3 – resistividade do concreto	37

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A NBR 6118:2014 exige que as estruturas de concreto armado sejam projetadas e construídas de modo que, sob influência ambientais previstas e quando utilizadas conforme estabelecido em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e comportamento adequado em serviço durante o período correspondente à sua vida útil. Além disso, define vida útil como o período durante o qual se mantém as características da estrutura de concreto, desde que sejam atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e construtor, bem como de execução dos reparos necessários, decorrentes de eventuais danos acidentais.

Não apenas as normas brasileiras de regulamentação, como também todo o segmento de construção civil, tem direcionado estudos e orientações a durabilidade das estruturas de concreto armado. Essa tendência surgiu em função dos crescentes problemas de degradação precoce observados nas edificações.

Segundo Medeiros, Andrade e Helene (2011), no início das construções em concreto, no princípio do século XX e até a década de 80, comandava apenas o bom senso e a experiência do profissional, sendo a durabilidade claramente subjetiva, assegurada exclusivamente através de exigências prescritivas, em que a principal característica controlada era a resistência média à compressão e que, durante muito tempo, foi tida como fonte única e segura das especificações de projeto.

Com o acúmulo de acervo científico, percebeu-se que uma alta resistência a compressão apenas não garante durabilidade frente as condições de exposição a que o material é submetido, e que um maior conhecimento da deterioração das estruturas, possibilitou o mapeamento das diversas patologias que a acometem e o desenvolvimento de modelos matemáticos comportamentais frente a diversas condições de exposição.

A NBR 6118:2014 lista os mecanismos mais importantes e frequentes de envelhecimento e de deterioração das estruturas de concreto como:

Mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto:

- lixiviação (águas puras e ácidas);
- expansão (sulfatos);
- expansão (reação álcali-agregado);
- reações deletérias (superficiais tipos eflorescências).

Mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura:

- corrosão devida à carbonatação;
- corrosão por elevado teor de íon cloro (cloreto).

Mecanismos de deterioração da estrutura propriamente dita:

- ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas (fadiga), deformação lenta (fluência), relaxação, e outros considerados em qualquer norma ou código regional, nacional ou internacional, mas que não fazem parte de uma análise de vida útil e durabilidade tradicional.

Como apresentado por Machado e Machado (2015), o concreto é um material que, assim como qualquer outro, está sujeito à ação deletéria do meio ambiente e das agressões físicas e químicas. Assim, o processo de enfraquecimento e desgaste de uma estrutura de concreto é natural e, a fim de garantir a sua vida útil, a estrutura necessita de manutenção regular e reparos, o que muitas vezes não é verificado devido à falta de financiamento para processos de manutenção e negligência frente aos problemas estruturais.

Para promover a manutenção da vida útil das construções e evitar que estas deixem de responder as exigências para que foram projetadas, as inspeções de estruturas de concreto armado são responsáveis pela detecção de inconformidades que possam acomete-las. O monitoramento periódico é um procedimento crucial para prevenção de patologias e permite que por uma detecção previa de problemas se possa realizar reparos mais simples e de menor custo.

A inspeção visual detalhada é a primeira técnica aplicada em qualquer tipo de peça ou componente e está frequentemente associado a outros ensaios de materiais. O simples fato de observar a estrutura pode dar ao profissional informações suficientes para direcionar para um

posterior ensaio de verificação. Contudo, as ferramentas mais empregadas de ensaio para o controle e análise do estado de deterioração são usualmente invasivas, necessitando de tempo, reparo localizado e alto valor orçamentário.

Ensaio invasivos ou realizados sobre testemunhos extraídos da estrutura (destrutivos), como o ensaio de resistência à compressão, a avaliação da profundidade de carbonatação e a determinação do teor de íons de cloreto, por vezes são indispensáveis e/ou insubstituíveis para suas respectivas finalidades. Entretanto, além de serem ensaios onerosos, apresentam restrições dos locais de retirada das amostras para que não se comprometa a estabilidade da estrutura, acarretando num número de amostras coletadas relativamente pequeno, o que muitas vezes leva ao profissional a adotar uma análise conservadora por falta de informações suficientes para o mapeamento completo da estrutura. Ademais, já estão disponíveis no mercado equipamentos e tecnologias que permitam testes não destrutivos com razoável precisão, evitando assim danos a estrutura.

Segundo Lorenzi (2015 apud Wiggenhauser 2009), aplicação de ensaios não destrutivos para a garantia de qualidade de estruturas de concreto armado tem obtido consideráveis progressos recentemente. Impulsionado pelo avanço tecnológico pela transferência de conhecimento de outras áreas de teste de matérias e da medicina, métodos de investigação versáteis tem surgido com com frequência aumentando o potencial para investigação de estruturas de concreto.

Ensaio não destrutivos (END) são ensaios realizados em materiais, acabados ou semiacabados, para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, através de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior.

A corrosão das armaduras é uma das manifestações patológicas mais frequentemente observadas nas estruturas de concreto armado, logo é de grande importância se estudar os parâmetros relacionado a esse fenômeno. Como apresentado na Tabela 1.1, o ensaio de resistividade é uma das opções de ensaio não destrutível de investigação de corrosão no aço. Esse método destaca-se, pois, a resistividade juntamente com o acesso de oxigênio, controla o processo eletroquímico que gera o fenômeno da corrosão das armaduras imersas no concreto. Além disso apresenta rapidez nas leituras, é de fácil utilização, baixo custo e pode ser utilizado tanto em laboratório quanto em campo.

Tabela 1-1- principais tipos de END disponíveis para investigação de estruturas de concreto armado. Bungey e Millard (1996)

Propriedade sob investigação	Ensaio	Tipo de Equipamento
Corrosão no aço	Potencial	Eletroquímico
	Resistividade	Elétrico
	Resistência de polarização	Eletroquímico
	Impedância	Eletroquímico
	Cobrimento	Eletromagnético
	Carbonatação	Químico/Microscópico
	Concentração de cloretos	Químico/Elétrico
Qualidade, Durabilidade e Deterioração do Concreto	Dureza superficial	Mecânico
	Pulso Ultrassônico	Eletromecânico
	Radiografia	Radioativo
	Radiometria	Radioativo
	Absorção de nêutrons	Radioativo
	Umidade Relativa	Químico/Eletrônico
	Permeabilidade	Hidráulico
	Absorção	Hidráulico
	Petrográfico	Microscópico
	Sulfatos	Químico
	Expansão	Mecânico
	Volume de vazios	Microscópico
	Tipo e Teor de cimento	Químico/Microscópico
	Resistência à abrasão	Mecânico

Já quanto à qualidade, durabilidade e deterioração do concreto, também apresentado como propriedades sob investigação de ensaios não destrutíveis da Tabela 1.1, assim como o ensaio de medição de resistividade, ensaio de pulso ultrassônico ou VPU destaca-se pela rapidez nas leituras, é de fácil utilização, baixo custo, podendo ser utilizado tanto em laboratório quanto em campo, além disso, a medição de velocidade de pulso ultrassônico pode investigar diversas propriedades como fissuração excessiva, presença de vazios, resistência a compressão e módulo de elasticidade.

Este estudo visa analisar a influência da armadura quanto a sua distância e posição na mediação de resistividade elétrica superficial do concreto por meio do método de wenner.

1.2. MOTIVAÇÃO

A utilização de ensaios não destrutíveis tem crescido e sido muito aplicada em diversas inspeções na construção civil, mostrando-se uma alternativa prática e eficiente, principalmente quando comparada a ensaios destrutivos ainda mais empregados no mercado. Entretanto, existe uma resistência devido à falta de uma padronização nacional de métodos, o que leva a cada profissional a adotar métodos de ensaio e critérios de avaliação estrangeiros e justificar suas escolhas ou desenvolver seus próprios métodos de análise.

A motivação deste trabalho está na inexistência de uma uniformidade de procedimentos e variabilidade de metodologias adotados, colaborando para uma baixa assertividade do ensaio visto a falta de mapeamento dos fatores de influência.

1.3. JUSTIFICATIVA

Os ensaios não destrutivos se apresentam como uma alternativa interessante e inovadora. O desenvolvimento e ganho de confiabilidade dessas técnicas pode revolucionar o mercado de manutenção e inspeção das edificações, reduzindo a necessidade de reforços por um simples e barato monitoramento, controle, e análise das condições de degradação e segurança das estruturas.

O alcance desse cenário esbarra na falta de uma recomendação normativa que provenha uma base confiável a utilização desses ensaios, logo esse estudo visa fortalecer o acervo científico, e contribuir com a definição de parâmetros que podem vir a estabelecer um padrão nacional.

1.4. OBJETIVOS

O objetivo desse estudo é a verificação da eficácia do método de Wenner ou método dos quatro pontos de medição de resistividade elétrica superficial do concreto, mais precisamente pelo uso do equipamento Resipod Proceq, como ferramenta não destrutiva de ensaio na investigação da corrosão das armaduras. A investigação ocorre por meio da análise da influência da distância e posição da armadura na medição.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados com maior detalhamento as propriedades investigadas, os princípios de funcionamento da tecnologia, descrição do equipamento utilizado, aplicações do método, bem como parâmetros que influenciam a obtenção de resultados confiáveis. Além disso, será exposto um estudo semelhante sobre o tema já concluído para visualização do procedimento experimental.

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A resistividade elétrica superficial do concreto pode ser medida de várias formas, sendo as principais o método do eletrodo externo, método dos dois pontos, método direto, método da resistividade elétrica volumétrica e pelo método de Wenner, objeto desse estudo.

O método de Wenner ou método dos quatro pontos, ainda que não normatizado, é conhecido e empregado pelos profissionais brasileiros na obtenção de resistividade superficial do concreto. Ele foi inicialmente desenvolvido por Wenner para a obtenção de resistividade elétrica dos solos e descrito na ASTM G57 - *Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*. Para estudo geotécnico, esse método é normatizado no Brasil pela norma NBR 7117:1981 – Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos, contudo seu uso em concreto carece de recomendações normativas.

A associação Brasileira de Normas Técnicas normatiza a medição de resistividade elétrica volumétrica através da norma NBR 9204/1985 Concreto Endurecido – Determinação da resistividade elétrica-volumétrica. O monitoramento da resistividade elétrica superficial do concreto, realizada pelo chamado método dos quatro pontos, ou pelo método de Wenner, apresenta algumas vantagens em relação à monitoramento por meio da resistividade de volumétrica.

Lencioni (2010) afirma que enquanto a resistividade elétrica volumétrica é aplicada somente em ensaios de laboratório, a resistividade elétrica superficial pode ser empregada tanto em laboratório quanto in situ. Além disso, evidencia que a técnica de ensaio da resistividade elétrica volumétrica faz uso de Mercúrio, metal cujo emprego vem sendo banido devido à sua toxicidade e ao risco de contaminação ambiental.

Conforme Cascudo (2005), atualmente esse método apresenta adaptações para aplicação em concreto por meio de equipamentos comerciais, que apresentam como vantagem a possibilidade do uso *in situ* e o fato de serem totalmente não destrutivos, tendo em vista que tais equipamentos apenas encostam-se à superfície do concreto, obtendo rapidamente as medidas desejadas.

Segundo a Proceq AS, líder global no desenvolvimento de soluções para ensaios não destrutivos portáteis, o método apresenta diversas vantagens em ser utilizado em inspeções periódicas, pois além da fácil execução, dispõem de informações úteis as seguintes aplicações:

- Estimativa da probabilidade de corrosão
- Indicação da taxa de corrosão
- Correlação com permeabilidade de cloreto
- Avaliação no local da eficácia da cura
- Determinação das necessidades por área para sistemas de proteção catódica
- Identificação de áreas úmidas e secas numa estrutura de concreto
- Indicação das variações nas relações de água/cimento numa estrutura de concreto
- Identificação das áreas numa estrutura mais suscetível à penetração de cloreto
- Correlação com a permeabilidade de rocha à água

2.2. PROPRIEDADE SOB INVESTIGAÇÃO

A resistividade elétrica do concreto, de acordo com Helene (1993), é uma propriedade de interesse no estudo da cinética do processo de corrosão eletroquímica das armaduras. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a partir do momento que a passividade da armadura é destruída, a resistividade elétrica e a disponibilidade de oxigênio passam a controlar a taxa de corrosão.

Segundo Araujo e Panossian (2015), a resistividade elétrica pode ser definida como uma propriedade física do concreto que indica a resistência ao fluxo de corrente elétrica de natureza iônica na solução aquosa (fase líquida do concreto) contida na sua rede de poros comunicantes: bolhas, interstícios e canais capilares.

Segundo Panossian (1993), a corrosão metálica pode ser definida como a transformação de um metal em íon metálico pela sua interação química ou eletroquímica com o meio em que se encontra.

Quanto a relação da resistividade elétrica e o processo corrosivo das armaduras em concreto armado, é apresentado por Araujo e Panossian(2013) que a resistividade elétrica do concreto controla a corrente elétrica estabelecida entre a área anódica (oxidação do metal) e a área catódica (redução do oxigênio) de corrosão da armadura. Estas áreas estão evidenciadas na figura 2.1.

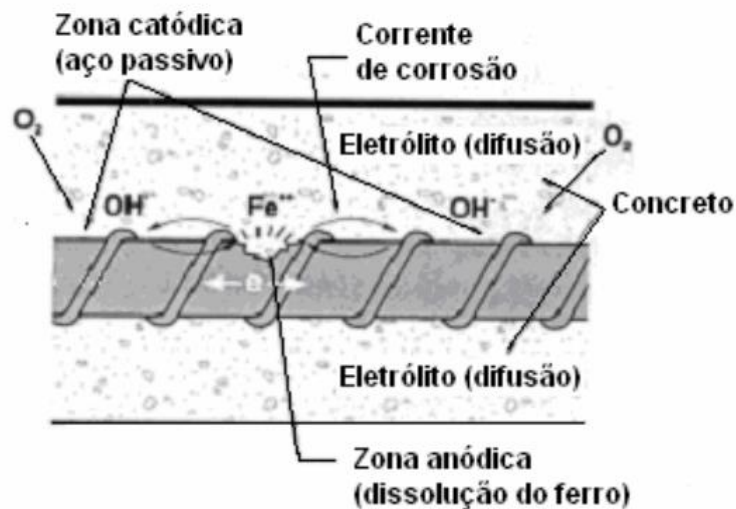


Figura 2-1 Representação gráfica do processo corrosivo (SANTOS 2006)

Como apresentado por Santos (2006), a camada passivadora se constitui em uma película de óxidos extremamente fina aderente à superfície da barra que pode ser destruída pela presença de íons cloreto em quantidades suficientes de forma localizada ou pela redução do PH do concreto devido ao efeito da carbonatação. Medeiros (2001) apud Andrade (1992) evidencia para diferentes tipos de cimento a correlação aproximada da resistividade com a velocidade de corrosão, apresentada na figura 2.2

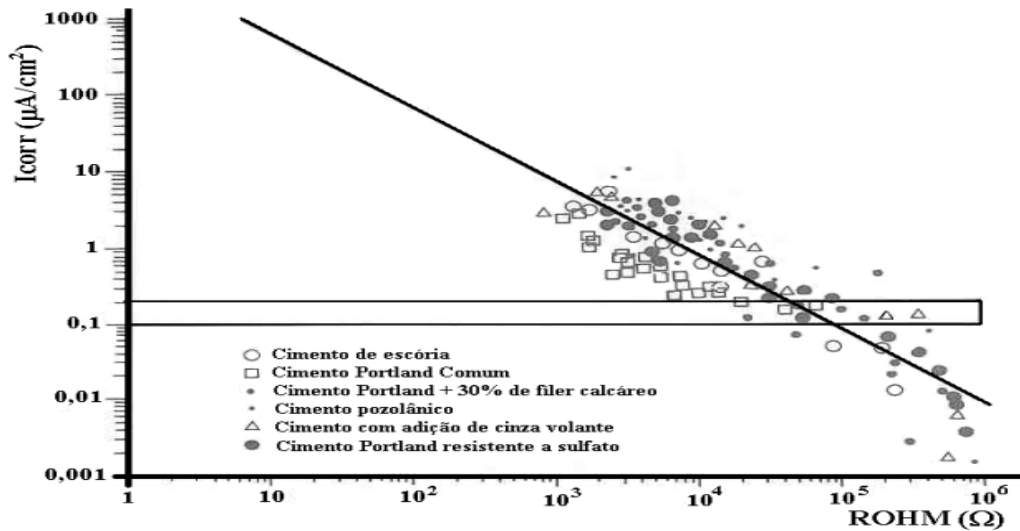


Figura 2-2 Relação entre a intensidade de corrosão das armaduras e a resistividade ôhmica (ANDRADE 1992)

2.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O processo de medição da resistividade superficial do concreto ocorre inicialmente pelo alinhamento e disposição de quatro eletrodos em contato direto com a superfície do concreto, igualmente espaçados. O equipamento imprime uma pequena corrente alternada (I) entre os dois eletrodos externos e a diferença de potencial (V) resultante é medida pelos dois eletrodos internos.

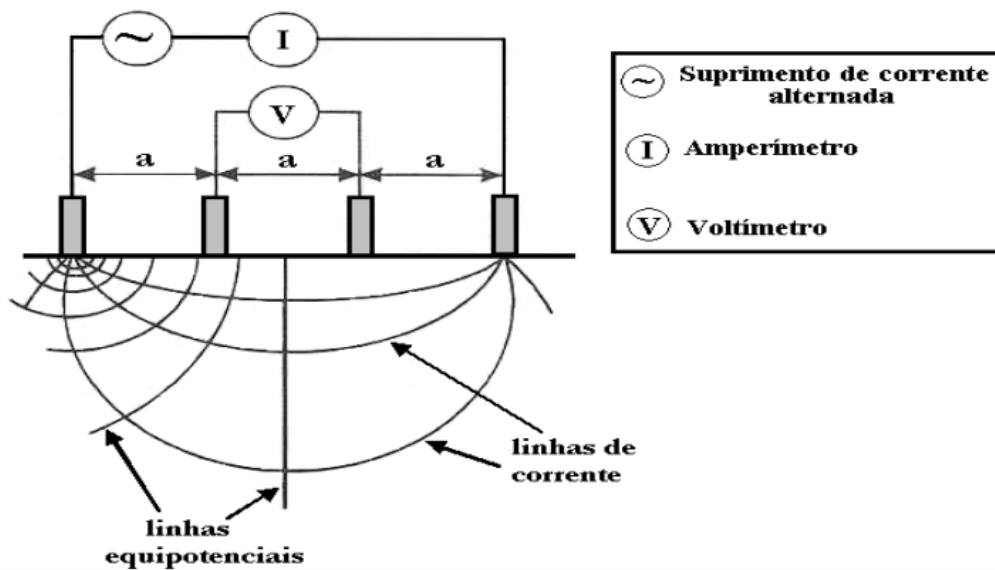


Figura 2-3– Esquema do método de quatro pontos (adaptação de GOWERS e MILLARD 1999)

A Figura 2.3 apresenta um esquema apresentado por Gowers e Millard (1999) para o funcionamento do método de Wenner, onde se pode perceber as linhas de corrente induzidas e as linhas equipotenciais medidas pelo equipamento.

A relação entre a corrente elétrica e o potencial elétrico é dada pela Lei de Ohm:

$$i = \frac{V}{R}$$

Onde: V é a voltagem (V);

I é a corrente (A);

R é a resistência do sistema (Ω)

A resistividade está relacionada, pela Lei de Ohm, a resistência do sistema pela seguinte relação:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

Onde: ρ é a resistividade ();

A é área da seção transversal do material condutor (cm²);

L é o comprimento do material condutor (cm);

Contudo, não há como mensurar as dimensões da rede de poros comunicantes do concreto que permitem a passagem de corrente elétrica em solução aquosa de natureza iônica.

Com os parâmetros de corrente elétrica e diferença de potencial é possível determinar a resistência elétrica da porção do concreto contido dentro de uma semiesfera de raio igual ao espaçamento entre os eletrodos, centrada no ponto médio entre os dois eletrodos internos. Logo, considerando um volume de material semi-infinito, de modo que as dimensões do elemento de concreto sejam grandes em comparação com a distância dos eletrodos, a resistividade pode ser obtida com a seguinte expressão:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{V}{I}$$

Onde: ρ é a resistividade ($\Omega \cdot \text{cm}$);

a é o espaçamento entre eletrodos (cm);

V é a voltagem (V);

I é a corrente (A).

Gowers e Millard (1999) recomendam que o espaçamento entre eletrodos seja menor do que $\frac{1}{4}$ da menor dimensão da peça de concreto. Isso evita fuga de corrente, pois a corrente pode fluir não só através do concreto como também pelo ar em redor da peça. Essa exigência impede o desvio dos resultados esperados, pois o ar é sempre mais resistivo que o concreto. O efeito das dimensões pode ser evidenciado pelas relações experimentais obtidas por Gowers e Millard (1999) na figura 2.4.

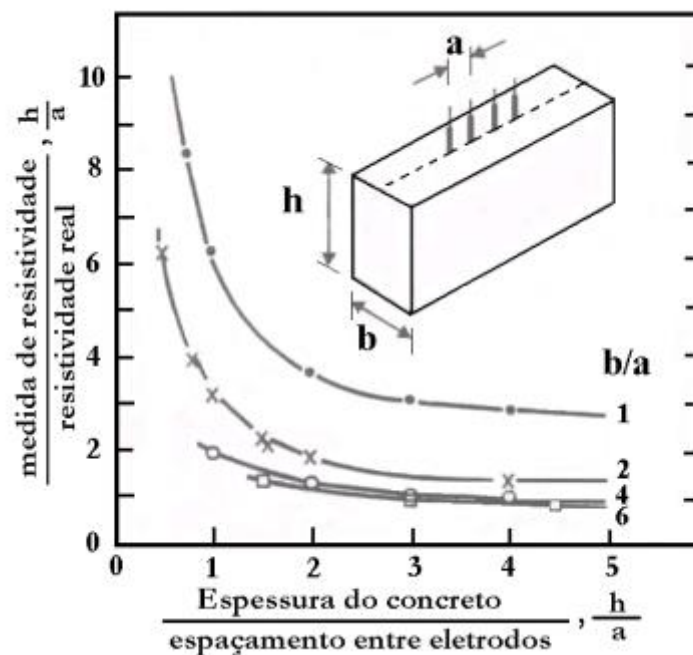


Figura 2-4 - Efeito das dimensões da seção do concreto nas leituras de resistividade (GOWERS & MILLARD, 1999)

Para avaliação do risco de corrosão de armaduras, diversos pesquisadores definiram critérios limites baseados em faixas de variação de valores obtidos para a resistividade elétrica do

concreto. Araujo e Panossian (2015) listam alguns dos critérios referenciados na literatura quanto a avaliação do risco de corrosão de armaduras que se encontram na tabela 2.1.

Tabela 2-1.1 – Critérios de avaliação da resistividade elétrica do Concreto (ARAUJO PANOSSIAN, 2015)

Valores de resistividade do concreto (k Ω .cm)							Risco de Corrosão
González (2004)	Smith (2004)	Morris (2002)	Polder (2001)	Feliu (1996)	Browne e Geohegan (1978)	Langford e Broomfield 1987	
< 20	< 8	< 10		<10	< 5	< 5	Muito alto
20 a 50	8 a 12	10 a 300	< 10	10 a 100	5 a 10	5 a 10	Alto
			10 a 50		10 a 20	10 a 20	Moderado
50 a 100	> 12	> 300	50 a 100		>20	> 20	Baixo

Apesar do surgimento de novos critérios em recentes pesquisas sobre o tema, os critérios definidos por Browne e Geohegan são adotados pelo Comité Euro- Internacional du Béton (CEB) com grande aceitação no meio técnico científico, portanto, serão adotados nesse estudo.

Tabela 2-2 Critérios de avaliação do concreto armado quanto a resistividade com relação ao risco de corrosão – CEB 192

Resistividade do concreto (k.cm)	Risco de Corrosão
< 5	Muito alto
5 a 10	Alto
10 a 20	Moderado
> 20	Baixo

Segundo Araujo e Panossian (2015), há possibilidade de se estabelecer o critério de avaliação do risco de corrosão na própria estrutura, por meio do seu monitoramento ao longo dos anos. Essa alternativa facilita a avaliação em campo de edificações que executam inspeções periódicas.

2.4. O EQUIPAMENTO

Todas as informações disponibilizadas nesta seção são dos manuais, certificados e especificações técnicas da Proceq SA. O Resipod representa uma evolução do medidor de resistividade que é padrão na indústria, o RM MKII da CNS Farnell, operando pelo princípio do dispositivo de Wenner.

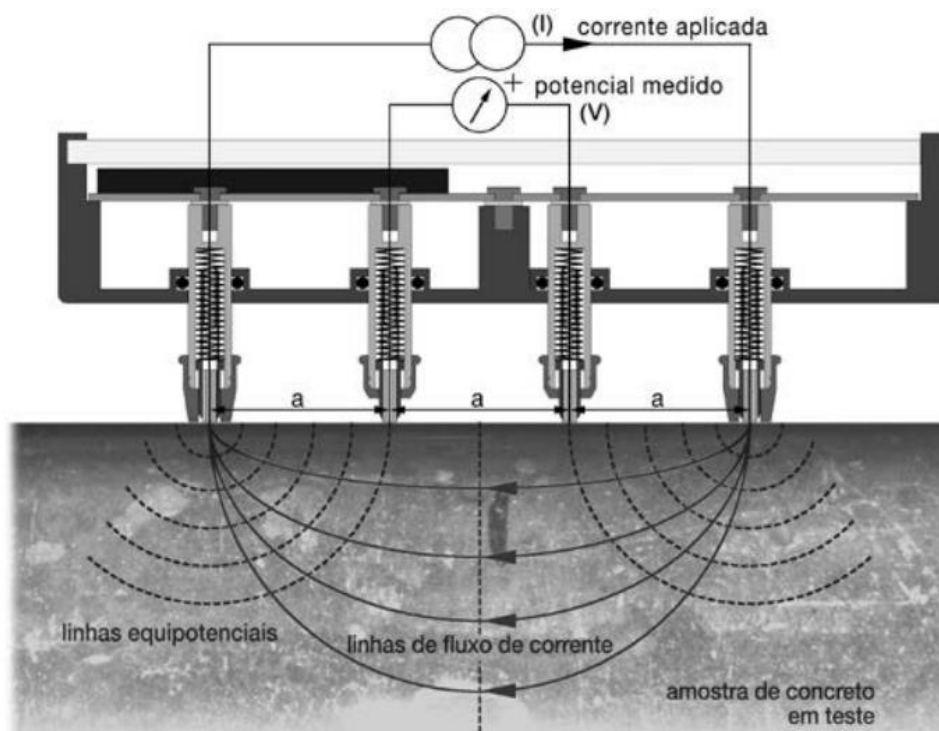


Figura 2-5– Estrutura do equipamento Resipod (Manual de operação Proceq)

O equipamento foi concebido para medir a resistividade elétrica do concreto. Em resumo, é aplicada uma corrente às duas sondas nas extremidades e a diferença de potencial é medida entre as duas sondas internas. A corrente induzida é carregada por íons no líquido do poro da estrutura.



Figura 2-6– Modelos do equipamento (Manual de operação Proceq)

A resistividade calculada depende do espaçamento destas sondas. Devido à natureza não homogênea do concreto, é preferível um espaçamento maior das sondas, tendo em vista que isso permite um fluxo mais homogêneo da corrente de medição. No entanto, normalmente deve-se compensar isto com a necessidade de evitar a influência do aço de reforço. O espaçamento de 50 mm é usualmente considerado como adequado.



Figura 2-7– Equipamento Resipod em uso (Manual de operação Proceq)

O Resipod possui duas faixas de corrente. Usualmente induz uma corrente de 200 μA através da amostra, quando a resistência é alta demais o aparelho automaticamente comuta para 50 μA . Sua gama de medição de resistividade elétrica varia entre 1 $\text{k}\Omega\text{cm}$ e 1000 $\text{k}\Omega\text{cm}$. e frequência do aparelho é de 40 Hz.

2.5. LIMITAÇÕES E INFLUÊNCIAS

Diante da quantidade de estudo do comportamento dos materiais e das estruturas, espera-se a comprovação e demonstração das conclusões teóricas na prática. Todavia, a parte experimental pode ser frustrante quando os resultados não correspondem com os esperados nem apontam para uma nova direção. Esse cenário é comum no âmbito acadêmico, mas não há como garantir as mesmas condições nem mesmo condições ideais para a realização de um ensaio experimental. Desta forma, para garantir a confiabilidade das leituras realizadas deve-se conhecer as limitações do ensaio e, principalmente, os parâmetros que influenciam as medidas obtidas para que eles sejam evitados ou mesmo reduzidos. Nem sempre é possível isolar os parâmetros de influência das leituras, contudo o conhecimento dessas limitações permite uma melhor interpretação dos resultados obtidos.

Embora o princípio de medida de resistividade elétrica superficial do concreto seja bastante simples, alguns fatores podem influenciar significativamente as leituras realizadas. Nesta seção eles serão divididos em fatores intrínsecos ao concreto e fatores extrínsecos ao concreto.

2.5.1. FATORES INTRÍNSECOS AO CONCRETO

- **RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO**

A relação água/cimento é um dos parâmetros mais importantes para o desempenho do concreto. Este parâmetro influencia, consideravelmente, a estrutura porosa da pasta de cimento, especificamente no volume total de poros e na quantidade de poros de maiores diâmetros. Assim, quanto maior a relação água/cimento, maior o volume de poros e maior é a probabilidade de existirem poros com maiores diâmetros e interconectados e, portanto, menor será a resistividade elétrica (SANTOS,2006).

Além disso, segundo Lencioni (2010), resistividade elétrica do concreto diminui com o aumento da relação a/c, pois a concentração de íons na água livre, que é o principal condutor de eletricidade no interior do concreto, está diretamente relacionada à quantidade de água empregada na mistura.

- AGREGADOS

Segundo Lencioni (2010) apud Gowers e Millard (1999), quando empregada a técnica de Wenner para monitoração da resistividade elétrica, assume-se que o material monitorado seja homogêneo, mas as partículas de agregado do concreto apresentam, geralmente, uma resistividade elétrica muito mais elevada que a da pasta de cimento, o que faz com que grande parte da corrente seja conduzida através da pasta. Assim, a resistividade elétrica do concreto, segundo Santos (2006), é muito mais sensível às alterações das características da pasta de cimento do que às mudanças no tipo de agregado.

Entretanto, segundo Santos (2006 apud Monfore 1968) a presença de agregados, partículas praticamente não-condutoras, entre a matriz de concreto, causa a obstrução da passagem de corrente elétrica, fazendo com que o comprimento efetivo da trajetória a ser percorrida pela corrente seja maior do que a dimensão do material na direção da corrente. Assim, quanto maior for o teor de agregados, maior será o seu efeito de obstrução e maior será a resistividade.

As recomendações do manual de operação da sonda de Wenner sugerem que o espaçamento das sondas seja maior do que o tamanho máximo do agregado, já que o material agregado usualmente é não condutor e a corrente flui no líquido do poro da pasta do concreto.

- HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

A variação de resistividade com o tempo está relacionada à hidratação da pasta de cimento. Durante o processo de hidratação do cimento, os compostos formados passam a preencher, de forma progressiva, parte dos vazios inicialmente ocupados pelo eletrólito, alterando a estrutura dos poros da pasta. Este efeito de preenchimento provocado pelos produtos da hidratação do cimento diminui a conectividade dos capilares. Além disso, a quantidade de água evaporável presente nos poros e a concentração dos íons em dissolução variam durante o processo de hidratação do cimento e, como o fluxo da corrente através do concreto depende do movimento de íons na água evaporável da matriz, é provável que esta variação também influencie a resistividade. (SANTOS, 2006)

O efeito da hidratação do cimento pode ser evitado estabelecendo-se idades para ensaio no concreto. Estudos prévios permitem definir idades a partir da qual a hidratação do cimento possa ser considerada relativamente estável e não mais um fator determinante na evolução

da resistividade elétrica. Concretos novos apresentam grande variação nos valores da resistividade elétrica superficial. (LENCIONI 2010).

- PRESENÇA DE ARMADURA

A armadura conduz corrente muito melhor do que o concreto e irá provocar alterações na homogeneidade do fluxo de corrente. Leituras realizadas sobre as barras resultam em falsas medidas de resistividade elétrica. Mesmo que apenas um dos quatro eletrodos esteja próximo à barra, o fluxo de corrente não será ideal, e resultados errôneos poderão ser produzidos. Neste caso, a leitura resultante poderá ser um falso valor baixo ou alto, dependendo de qual eletrodo estiver próximo à barra (LENCIONI 2010).

Segundo o manual de operação do equipamento, a influência das armaduras sobre a medição é particularmente o caso quando a espessura de camada de concreto for inferior a 30 mm. Sempre que possível, os vergalhões não devem estar diretamente abaixo da sonda e não devem correr paralelamente à ela. A orientação de medição recomendada é determinada pelo espaçamento dos vergalhões comparada com o espaçamento das sondas.

A orientação ideal é a de medir diagonalmente aos vergalhões, como mostrado. Isso é possível se a distância entre as sondas for inferior ao espaçamento da armação dos vergalhões.

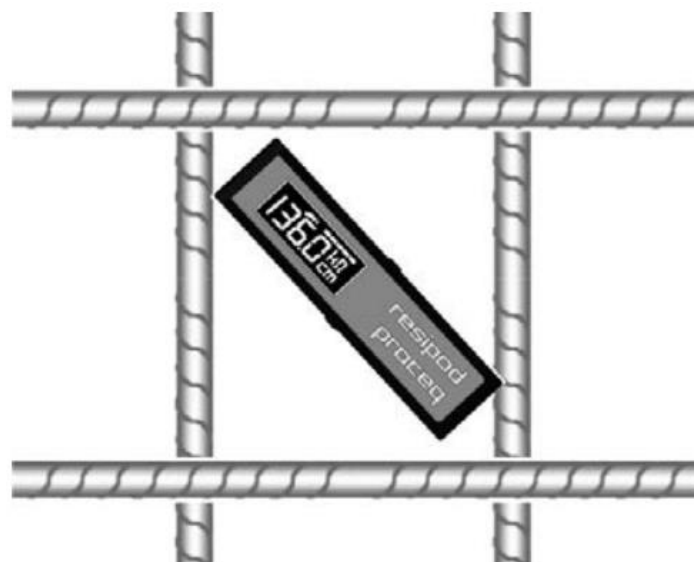


Figura 2-8 – Orientação de posicionamento (Manual de operação Proceq)

Caso o espaçamento dos vergalhões seja tão pequeno que os mesmos possam ser evitados, pode-se minimizar a influência do aço medindo perpendicularmente aos vergalhões, como mostrado.

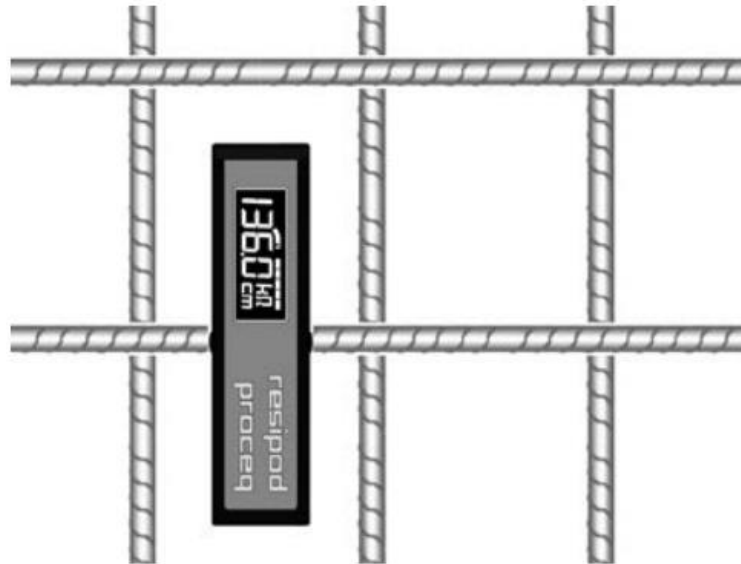


Figura 2-9– Orientação de posicionamento (Manual de operação Proceq)

RILEM TC154-EMC: TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS PARA MEDIÇÕES DA CORROSÃO METÁLICA recomenda-se que sejam feitas 5 medições do mesmo local movendo a sonda alguns mm entre cada medição para obter um valor médio dos 5 valores medidos.

O efeito da presença da armadura pode ser evitado nos ensaios de resistividade elétrica superficial empregando-se um equipamento próprio para detecção de metais no concreto, facilmente encontrado no mercado. (LENCIONI 2010).

- **ADIÇÕES E ADITIVOS**

As adições minerais, tais como cinza volante, sílica ativa e escória de alto-forno, e os fillers, materiais inertes de pequenas dimensões, exercem influência na resistividade elétrica do concreto, pois, provocam o refinamento dos poros da matriz, por ação química e/ou física, e diminuem a concentração iônica da solução. Sendo assim, o concreto com adições minerais apresenta uma maior resistividade elétrica quando em comparação com um concreto convencional. A densificação da matriz e o aumento da quantidade de poros de

menores diâmetros dificultam a condução da corrente através do concreto e, portanto, aumentam a resistividade elétrica (LENCIONI 2010).

Segundo Santos (2006), a influência dos aditivos na resistividade do concreto é apenas indireta, pois plastificantes, redutores, aceleradores e incorporadores provocam alterações no estado fresco, como redução da relação água/cimento, aumento da trabalhabilidade, evolução do processo de hidratação, e essas alterações são os reais parâmetros de influência na resistividade elétrica do concreto.

- **PARÂMETROS GEOMÉTRICOS**

Como já mencionado neste capítulo, a corrente induzida pelo equipamento pode se propagar por materiais ao redor da peça. Para evitar esse fenômeno Gowers e Millard (1999) apresentam um esquema que mostra como se deve regular o espaçamento entre eletrodos para evitar leituras equivocadas, apresentado na figura 2.9.

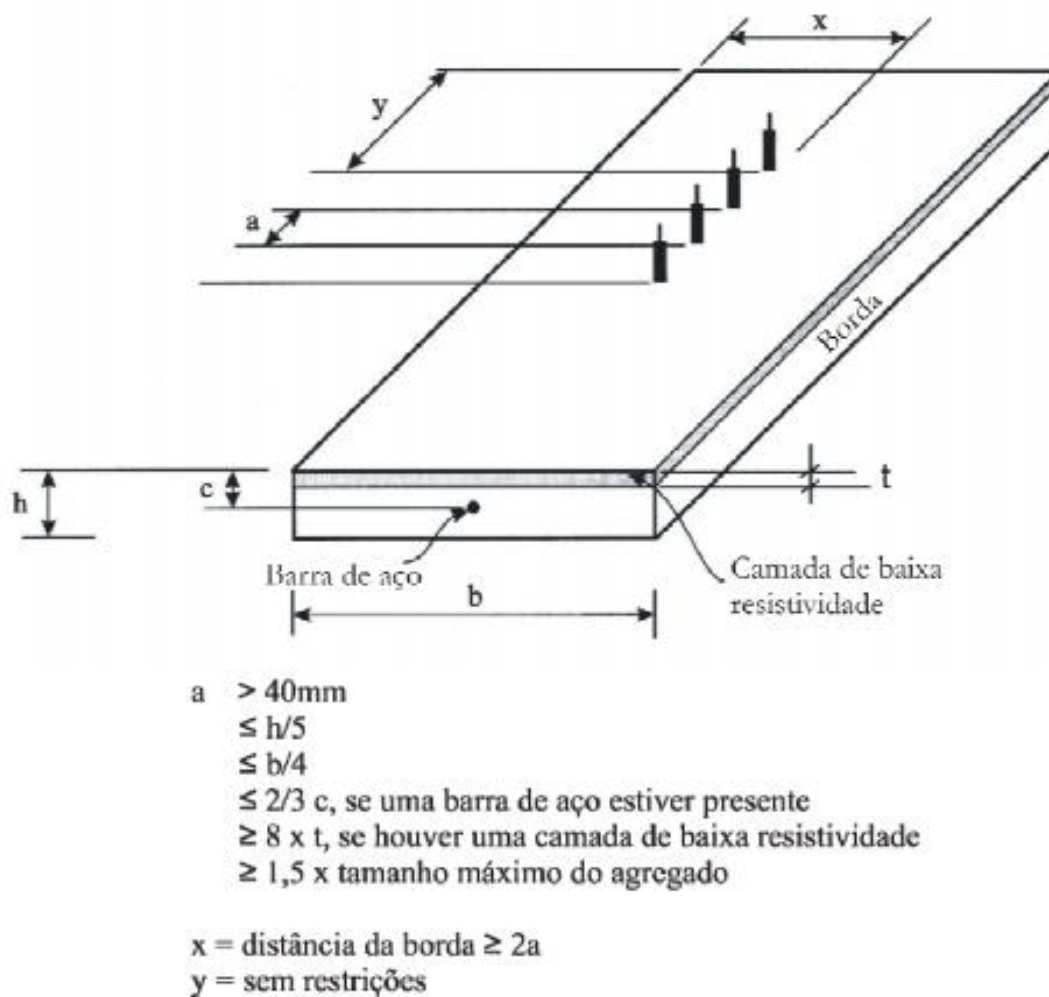


Figura 2-10– Orientação de posicionamento – Adaptação de LENCIONI (2010)

2.5.2. FATORES EXTRÍNSECOS AO CONCRETO

- TEMPERATURA

Segundo o manual de operação do equipamento, a temperatura do concreto deverá ser medida e registrada com as medições de resistividade. A resistividade diminui na medida em que a temperatura aumenta. Ainda segundo o documento, valores de referência para medições de resistividade são tipicamente definidos em 20°C (68°F), estudos empíricos mostraram que a elevação da temperatura em um grau pode reduzir a resistividade em 3% para concreto saturado e 5% para concreto seco.

A RILEM (2000), Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages, afirma que variações de temperatura são fatores de influência importantes na resistividade do concreto. Um aumento de temperatura provoca a queda da resistividade. De acordo com a instituição, a mobilidade dos íons na solução dos poros e mudanças na interação íon-sólido com a pasta de cimento são as causas dessa relação. A instituição recomenda que seja evitada a tomada de medidas em condições de clima muito quentes ou muito frias.

Uma mudança sazonal do inverno para o verão pode mudar os valores de resistividade na ordem de 100% (MEDEIROS, 2001), como pode ser ilustrado na Figura 2.10 para um caso na Europa.

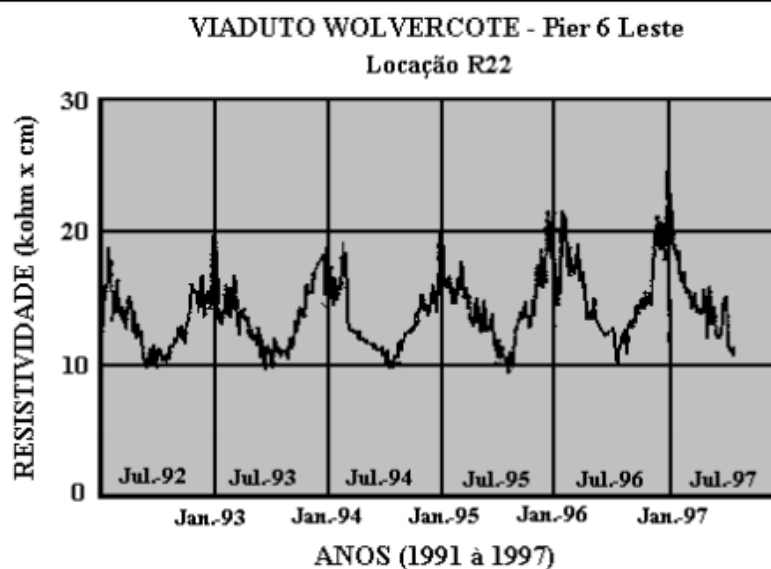


Figura 2-11- Variação da resistividade com a mudança sazonal(Adaptação de Medeiros 2001)

- CARBONATAÇÃO

Segundo o manual de operação do equipamento, o concreto carbonatado possui resistividade maior que o concreto sem carbonatação, no entanto, desde que a espessura da camada carbonatada seja significativamente menor do que o espaçamento das sondas, o efeito desta camada é pequeno. Conseqüentemente, se a camada carbonatada for espessa, pode ser necessário aumentar o espaçamento das sondas para obter bons resultados.

Segundo Lencioni (2010 apud Millard 1991) a carbonatação gera a precipitação de carbonato de cálcio pelos poros, o que provoca o endurecimento da superfície do concreto, havendo um aumento significativo da resistividade elétrica na superfície.

- **TEOR DE UMIDADE**

Segundo Santos (2006) o grau de saturação dos poros é a variável que possui maior influência na resistividade elétrica do concreto, pois, o fluxo da corrente através do concreto se dá predominantemente pela água contida nos poros, quanto maior o grau de saturação dos poros do concreto, menor será a sua resistividade elétrica.

A umidade relativa é um parâmetro decisivo para o grau de saturação dos poros, que por sua vez controla a resistividade elétrica do concreto de cobertura e desta forma limita a transferência de carga elétrica entre áreas anódicas e catódicas do aço. Assim, quanto mais saturados estiverem os poros do concreto, menor será a resistividade elétrica e mais elevada, a princípio, a velocidade de corrosão (LENCIONI 2010).

Conforme o manual de operação do equipamento, um teor de umidade maior diminui a resistividade em função da saturação ou em decorrência de uma alteração na relação de água/cimento.

É conveniente evitar realizar medidas de resistividade elétrica superficial logo após a ocorrência de chuvas e evitar a molhagem excessiva da superfície do elemento monitorado – a molhagem da superfície deve ser realizada no momento do ensaio, e feita com a ajuda dos próprios eletrodos, que geralmente contam com esponjas ou plugues de madeira que devem ser umedecidos a cada medida. (LENCIONI 2010).

- **CORRENTE ELÉTRICA APLICADA**

Segundo Gowers e Millard (1999) o uso de corrente contínua no ensaio de resistividade elétrica superficial tende a polarizar os eletrodos do equipamento utilizado e realizar leituras errôneas, logo, é recomendado o uso de corrente alternada.

Além de todos os fatores intrínsecos e extrínsecos ao concreto, existe a influência da experiência do operador do equipamento. Apesar de ser um ensaio simples é necessário

garantir que os procedimentos do ensaio estejam sendo seguidos. O equipamento consegue minimizar estes efeitos pela aferição de uma má conexão entre os eletrodos externos, má conexão entre os eletrodos internos ou quando a um fluxo excessivo com resistividade fora da faixa. Entretanto, esses alertas não garantem uma boa execução do experimento. O conhecimento técnico e operador e procedimentos pré-estabelecidos são a principal garantia de bons resultados.

2.6. ESTUDO DE CASO: MEDEIROS (2001)

Medeiros utilizou a sonda de Wenner para estudar a influência da umidade, da presença de armaduras e da posição das leituras na relação entre a resistividade elétrica superficial e a velocidade de corrosão das armaduras.

Para isso, foi utilizado o equipamento RM MKII resistivity meter fabricado pela C.N.S. Electronics LTD como demonstrado na figura 2.11.



Figura 2-12- Aparelho RM MKII (ensaio realizado no Laboratório de Corrosão da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo)

Foram selecionados 3 corpos de prova prismáticos de dimensões 15 x 11,5 x 28 cm e mais 2 com dimensões 15 x 13 x 26 cm, cada um com três barras de aço ϕ 12,5 mm embutidas, como exposto na figura 2.12.

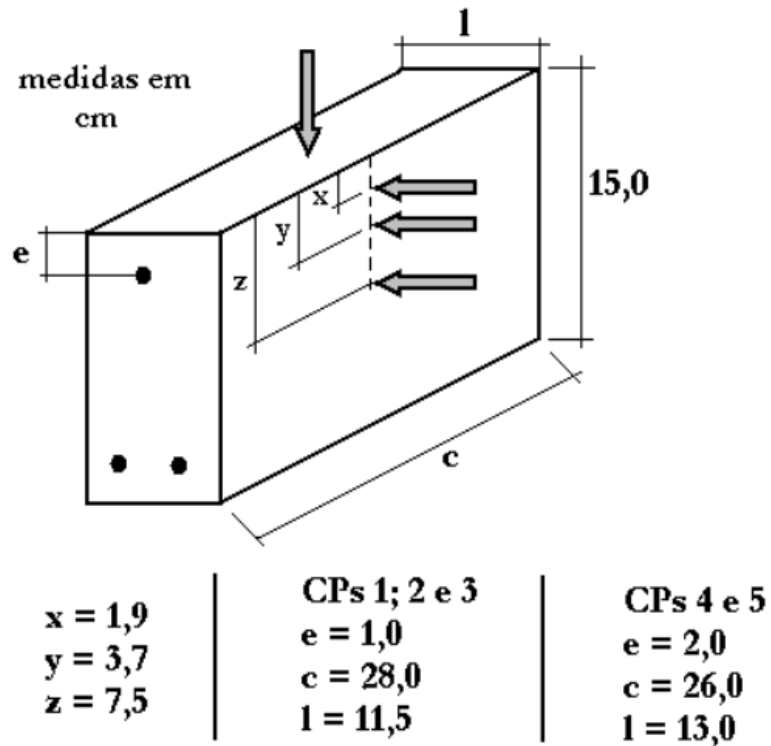


Figura 2-13- Corpos-de-prova empregados no estudo (MEDEIROS 2001)

A partir destes corpos-de-prova, foram realizadas medidas de resistividade nos locais indicados pelas setas apontada na Figura 2.12, com superfície seca ao ar e com superfície levemente úmida. Como se pode ver na Figura 2.12, os locais de leituras escolhidos são a superfície do concreto sobre a armadura, superfície do concreto livre da armadura (centro do corpo-de-prova) e regiões próximas das bordas.

Para posição das leituras, percebe-se na Figura 2.13 que a medida que os locais de leitura são deslocados do centro para as bordas, o contorno de baixa condutividade tem o efeito de aumentar a resistividade aparente do material, fazendo com que a mesma se distancie da real.

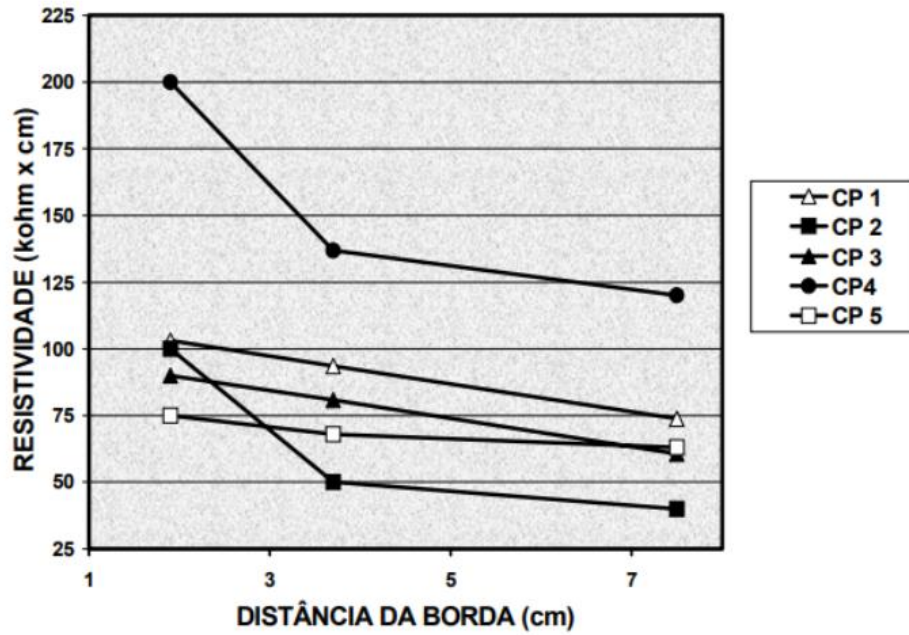


Figura 2-14 - Influência da distância das bordas nas leituras (MEDEIROS 2001)

Já quanto a umidade, percebe-se na Figura 2.14, que um simples umedecimento superficial faz as leituras diminuírem bruscamente, isto significa que uma chuva fina pode ter grande reflexo nos resultados.

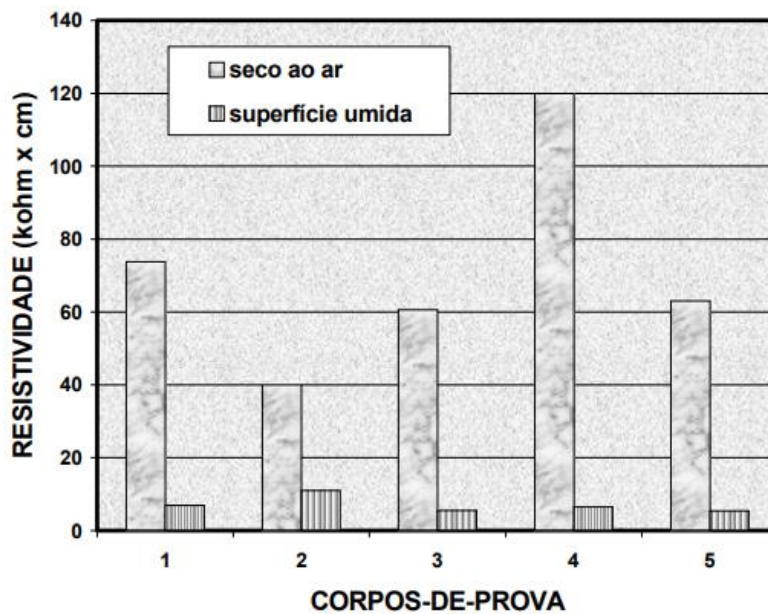


Figura 2-15-Influência da umidade nas leituras de resistividade (MEDEIROS 2001).

Por fim, quanto a presença de armadura, a Figura 2-16 mostra que a presença de um elemento mais condutor (o aço) na área de influência do aparelho faz com que as leituras sejam subestimadas, comprometendo a confiabilidade dos resultados.

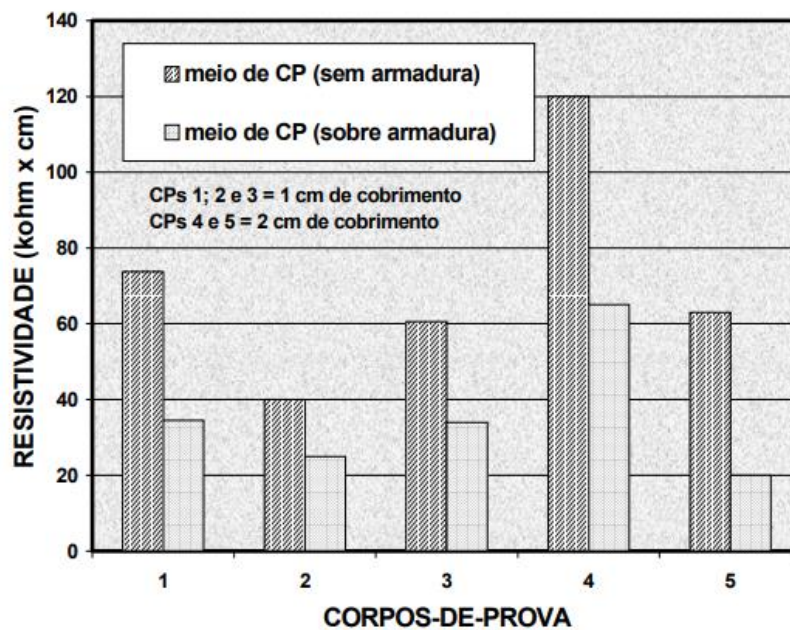


Figura 2-16- Influência da presença da armadura sobre as leituras (MEDEIROS 2001)

Os resultados confirmaram que diversos fatores podem interferir na leitura de resistividade elétrica superficial de concreto e que é de extrema importância seguir os procedimentos adequados para que evitar a interferência destes parâmetros.

2.7. RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS E MÉTODOS DE ENSAIO

Em função da dificuldade de acesso gratuito as normas e procedimentos internacionais, a seguir são descritas algumas recomendações técnicas e métodos de ensaio para obtenção da resistividade elétrica superficial do concreto pelo método de Wenner (ou dos quatro pontos) compilados pelo estudo “Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios” (LENCIONI,2011). Estas recomendações e métodos serão utilizados para determinação da metodologia do experimento mais adequada a análise da influência da posição e distância na medição de resistividade superficial do concreto pelo método de Wenner.

2.7.1. Recomendação técnica RILEM – Test methods for on site measurement of resistivity of concrete

“Test methods for on site measurement of resistivity of concrete” consiste na recomendação técnica desenvolvida pela International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems, and Structures RILEM (2000) que especifica ensaios de resistividade elétrica realizados in situ. Para ensaio de resistividade elétrica superficial do concreto apresenta as seguintes recomendações:

- A superfície do concreto deve estar úmida ou ser umedecida.
- A localização e disposição da armadura da peça deve ser determinada. As leituras da resistividade elétrica superficial do concreto pelo método de Wenner deve evitar ao máximo sua influência.
- Para minimizar a influência da armadura, as medições devem ser realizadas na diagonal da malha de aço demarcada, conforme demonstrado na figura 2-17.

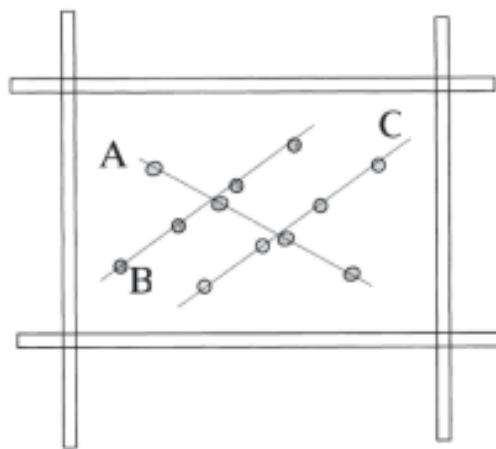


Figura 2-17- Tomada de medidas de resistividade elétrica do concreto pelo método dos quatro pontos, segundo orientações da RILEM (2000, p. 609).

- O relatório do ensaio deve apresentar:
 - Composição do concreto;
 - Exposição a condição ambiente;
 - Importância do elemento estrutural.

- O contato do eletrodo com a superfície do concreto deve ser intermediado por um eletrólito condutor, preferencialmente uma esponja ou madeira umedecida. Deve-se evitar uma umidificação intensa, porque apesar de necessária, uma umidificação excessiva pode criar uma película de água na superfície do concreto e provocar alterações nas medições.
- Sob concreto de mesma composição e condições controladas, é considerado bom um coeficiente de variação de 10% e considerado normal um coeficiente de 20%. Já para medições em campo, 30 % é um coeficiente normal de variação.
- O local de medição deve estar limpo e livre de contaminações (especialmente óleos).
- As esponjas ou contatos de madeira devem ser mantidos úmidos de forma a garantir contato suficiente, o que requer umedecê-los frequentemente, já que o concreto pode absorver a solução.

2.7.2. Método de ensaio FDOT - Florida method of test for concrete resistivity as an electrical indicator of its permeability – FM 5-578

“Florida method of test for concrete resistivity as an electrical indicator of its permeability – FM 5-578” consiste no método de ensaio apresentado pelo Departamento de Transportes da Flórida/EUA (Florida Department of Transportation - FDOT) que especifica o procedimento de ensaio para medição de resistividade elétrica de corpos de prova saturados em água e apresenta as seguintes recomendações:

- A sonda de Wenner utilizada para ensaios de resistividade elétrica superficial deve ter capacidade de realizar leituras entre 0 e 100 k Ω .cm e precisão de \pm 2%. A distância entre os eletrodos deve ser de 3,81cm.
- Os corpos de prova utilizados devem ser cilíndricos, de dimensões 10 x 20 cm. Devem ser ensaiados no mínimo 3 corpos de prova. Sua cura deve ser realizada em câmara úmida desde sua moldagem até a realização do ensaio. Deve-se evitar a cura em tanque saturado de cal, pois essa condição reduz a resistividade elétrica do concreto.
- Os corpos de prova devem ser marcados em pontos correspondentes a variação angular de 0°, 90°, 180° e 270°. Essas marcações deverão ser estendidas longitudinalmente pela lateral do corpo de prova para auxiliar a posição das leituras.

- Os eletrodos devem ser posicionados longitudinalmente na lateral do corpo de prova, de acordo com as marcações angulares realizadas (0°, 90°, 180° e 270°). As medições devem ser realizadas quatro vezes em cada uma das quatro posições para o mesmo corpo de prova, como exposto na figura 2-18.

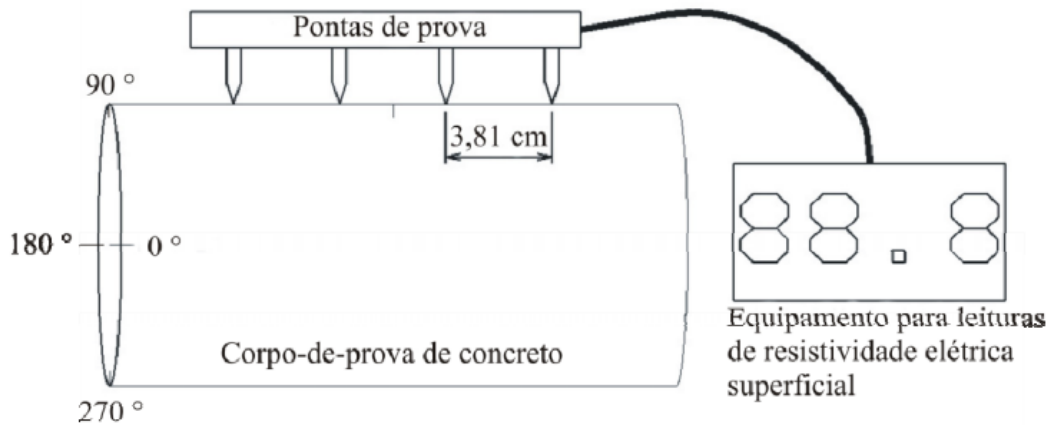


Figura 2-18- Procedimento de leitura da resistividade elétrica superficial adotado pelo Departamento de Transportes da Flórida (FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2004, p. 3)

- Os valores de resistividade elétrica superficial devem ser obtidos pela média das leituras de cada corpo de prova, conforme apontado na tabela 2-3..

Tabela 2-3 Planilha de registro dos dados apresentada no método de ensaio FM 5-578

Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)									
Corpo-de-prova	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°	Média
A									
B									
C									
Média do conjunto									

- O relatório do ensaio deve apresentar:
 - Dados do concreto;
 - Data de moldagem do corpo-de-prova;
 - Data de ensaio do material;
 - Idade do corpo-de-prova;
 - Nome do técnico responsável pelo ensaio;

- Resultados no ensaio.

2.7.3. Método de ensaio WA - Resistivity of concrete – Test method WA 622.1

“Resistivity of concrete – Test method WA 622.1” consiste no método de ensaio desenvolvido pelo Departamento de Estradas da Austrália Ocidental (Main Roads Western Australia) que especifica o procedimento para determinar a resistividade elétrica superficial do concreto in situ empregando uma sonda Wenner. Seu método se diferencia pelo uso do mesmo equipamento usado para solos, sendo adaptado ao uso para o concreto. A seguir as recomendações estabelecidas pelo procedimento:

- Para realização do ensaio, devem ser utilizados os seguintes equipamento:
 - Medidor de resistência elétrica do solo adaptado ao concreto (Figura 2-19)

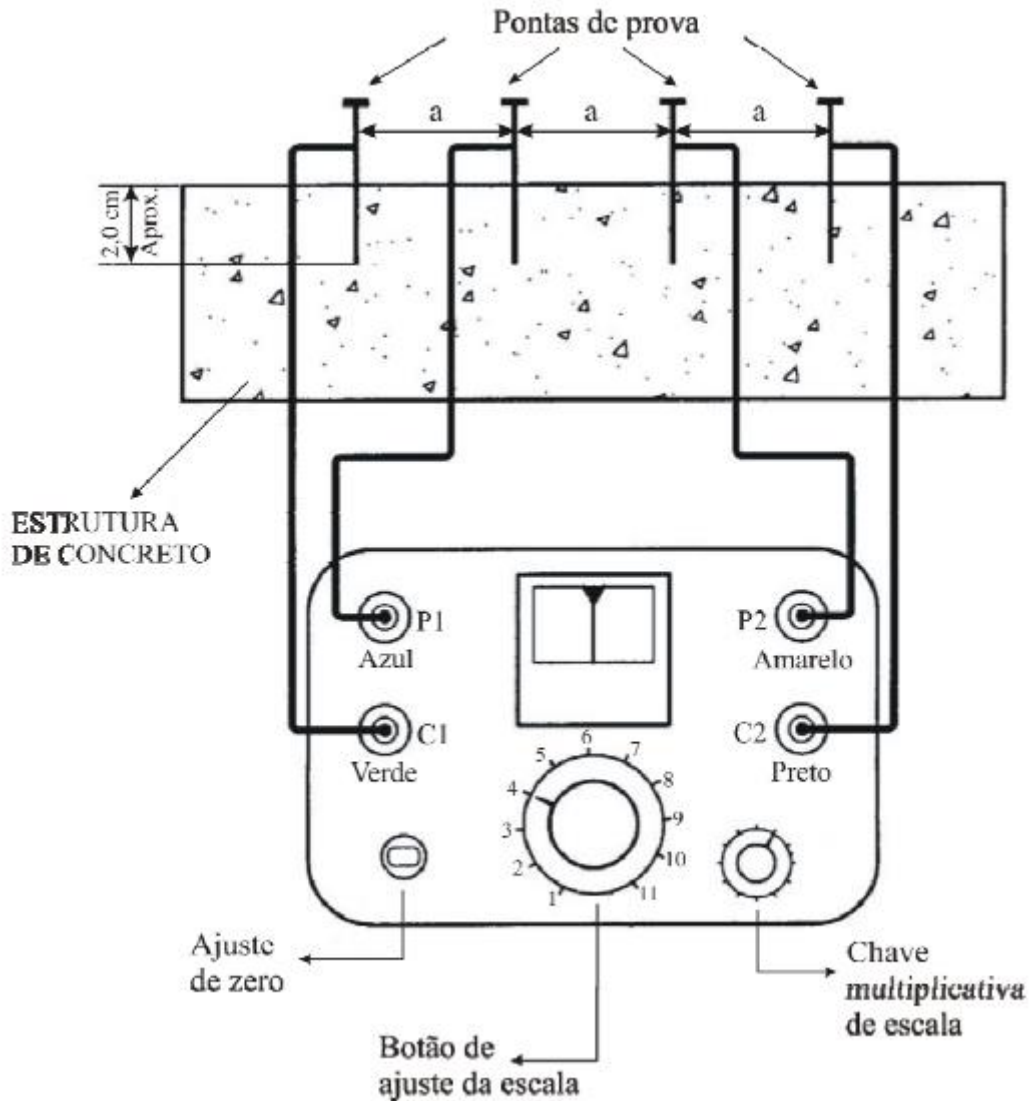


Figura 2-19 Medidor de resistência adaptado para o uso em concreto (MAIN ROADS WESTERN AUSTRALIA, 1998)

- quatro pinos (pontas de prova) de aço (o diâmetro das pontas de prova devem ser inferiores a 1/10 do espaçamento empregado entre as mesmas. O formato dos pinos deve ser cilíndrico de modo a garantir um bom contato elétrico.
 - régua de aço de 30,0 cm;
 - broca para alvenaria;
 - martelo;
 - caneta para marcação;
 - medidor de cobertura da armadura (covermeter).
- O procedimento de ensaio deve ser realizado da seguinte forma:

- Identificar a área adequada para realização das medições, de modo a evitar defeitos como fissuras ou desagregações.
- Determinar a posição dos quatro pontos pela medição e marcação em uma linha aproximadamente retilínea, utilizando régua e caneta de marcação, como apresentado na figura 2-19. A linha definida pela união dos pontos marcados deverá ser paralela e posicionada entre barras de aço adjacentes.
 - A linha definida pela união dos pontos marcados pode atravessar perpendicularmente no máximo uma barra de aço, sem apresentar variações significativas. As medidas devem ser tomadas a partir de 2 cm da borda do corpo de prova.
 - Para garantir a assertividade da medição e evitar altas resistências de contato deve-se estabelecer um contato elétrico eficiente entre a sonda e a superfície do concreto. Em casos de carbonatação superficial, deve-se aumentar a profundidade do furo para além da carbonatação.
 - O espaçamento entre os pontos de medição deve ser maior do que o diâmetro máximo do agregado, mas deve evitar a influência da barra de aço. Aconselha-se um espaçamento de 5,0 cm para a maioria das situações.
- Perfurar com broca de diâmetro suficiente para o encaixe adequado de cada pino (ponto de prova) da sonda ao ponto marcado. A perfuração deve ter profundidade aproximada de 2,0 cm.
- Umidificar as perfurações e cada pino com água livre de contaminações e inserir o pino no furo. Realizar a fixação das pontas com uso de um martelo, para garantir que estejam firmes e na profundidade adequada.
- Antes da realização das leituras, calibrar o medidor de resistência por meio do conjunto de resistores 10 Ω , 100 Ω e 1000 Ω , apresentados na figura 2-19, (aconselha-se realizar o mesmo procedimento quando os resultados de ensaio se mostrarem duvidosos).

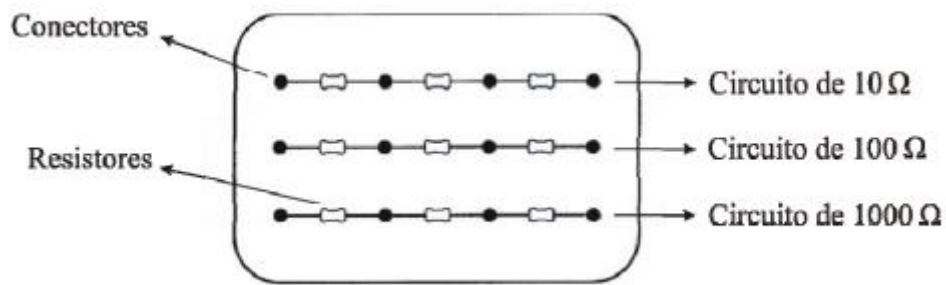


Figura 2-20 Placa para calibração do medidor de resistência.

- Conectar o medidor de resistividade aos pinos (pontas de prova) da sonda.
- Colocar na escala inferior ajustar o zero do medidor.
- Colocar na escala alta e reajustar o zero do medidor.
- Registrar a resistência, em ohms, necessária para atingir a leitura nula.
- A resistividade elétrica do concreto deve ser calculada pela a Equação 3:

Equação 1 – resistividade do concreto

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot \Omega$$

Onde: ρ = resistividade elétrica do concreto, em $\Omega \cdot \text{cm}$;

a = espaçamento entre as pontas de prova, em cm;

Ω = valor registrado no medidor de resistência, em Ω .

- O relatório de ensaio deve apresentar as seguintes informações:
 - valor de resistividade elétrica mais próximo de 100 $\Omega \cdot \text{cm}$;
 - identificação da estrutura de concreto;
 - posição da estrutura;
 - data do ensaio;
 - condições da superfície do concreto ensaiado;
 - localização das barras de aço nas proximidades das pontas de prova;
 - espaçamento entre as pontas de prova

2.7.4. Norma UNE 83988-2 - *Determinación de la resistividad eléctrica – Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner*

Norma UNE 83988-2 - Determinación de la resistividad eléctrica – Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner consiste da norma de regulamentação desenvolvida pela *Asociación Española de Normalización y Certificación – AENOR* (2008) que especifica o método de ensaio para monitoração da resistividade elétrica na superfície do concreto pelo método de Wenner. Esse método de ensaio é realizado em laboratório e aplicado em corpos de prova cilíndricos moldados ou extraídos. A seguir as principais recomendações apresentadas na norma.

- A temperatura e a umidade relativa do laboratório deve ser de 20 ± 2 °C e não inferior a 45%, respectivamente.
- Os corpos-de-prova, moldados ou extraídos, não devem conter armaduras, seu formato deve ser cilíndrico e com altura mínima de 20,0 cm.
- A cura deve ser realizada pela imersão dos corpos de prova em água a temperatura de $20^\circ \pm 2$ °C, os corpos de prova devem estar completamente saturados de água no momento da realização do experimento. As medições deverão ser realizadas num período máximo de 5m do corpo de prova fora do ambiente de saturação.
- Recomenda-se que as medidas de resistividade elétrica superficial do concreto sejam feitas empregando-se uma corrente alternada de até 40 mA e uma frequência inferior a 500Hz.
- Os quatro eletrodos, ou pontas de prova, devem ser fabricados em cobre ou outro metal condutor e seu diâmetro deve ser entre 0,4 cm e 0,6 cm. Os eletrodos devem ser rigidamente encaixados a um suporte de modo que seu espaçamento seja de 5,0 cm.
- Devem ser utilizadas Esponjas umedecidas com água potável nas extremidades dos eletrodos, de forma a garantir o contato efetivo do concreto com os eletrodos.

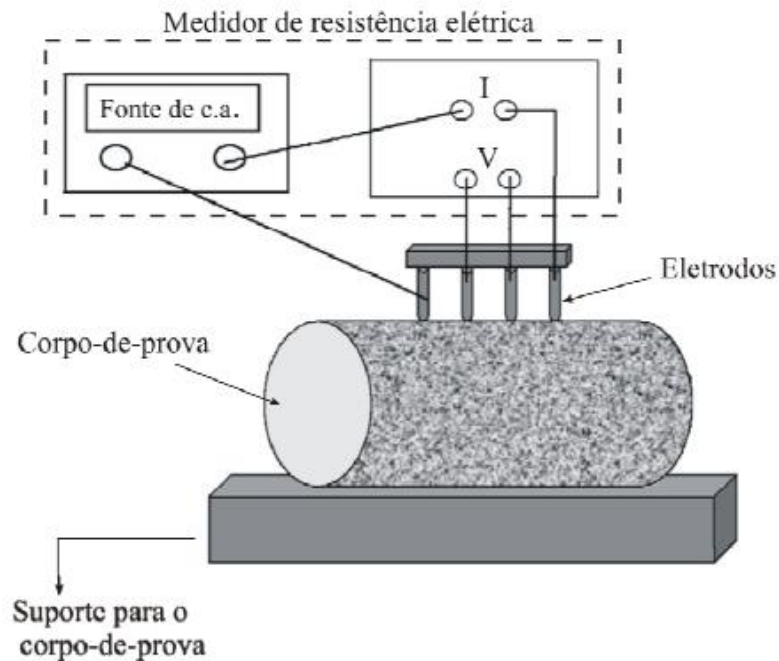


Figura 2-21 Esquema de medida da resistividade elétrica pelo método de Wenner

- O excesso de água deve ser removido por meio de um pano seco antes da realização das medições.
- Devem ser realizadas 6 medições na lateral do corpo de prova espaçadas por uma variação de 60°. Os eletrodos devem estar fixados num suporte não condutor.
- O valor da resistência elétrica do corpo de prova será obtido pela média dessas seis leituras, sendo que a resistência elétrica (R_e) é dada pela Lei de Ohm.
- O relatório de ensaio de apresentar as seguintes informações:
 - tipo de concreto (tipo de cimento, dosagem, condições de cura);
 - valor obtido para a resistividade elétrica superficial do concreto, em $\Omega.m$, em números inteiros;
 - dados do laboratório onde foi realizado o ensaio;
 - data e identificação do relatório de ensaio;
 - nome e identificação do cliente solicitante do ensaio;
 - descrição e numeração da amostra de concreto;
 - data de recebimento da amostra de concreto e de realização do ensaio;
 - especificações do método de ensaio;

- demais informações que se julgarem necessárias quanto à execução do ensaio;
- identificação dos responsáveis pelo relatório de ensaio;
- data do relatório de ensaio.
-

3. METODOLOGIA

3.1. Objetivo

O objetivo da metodologia é analisar a influência na determinação de resistividade elétrica superficial do concreto pelo método de Wenner ou método dos quatro pontos com uso do equipamento Resipod Proceq na investigação de corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado dado o posicionamento perpendicular, paralelo e diagonal do equipamento em relação aço da estrutura.

3.2. Escolha das amostras

Essa fase consiste em escolha das amostras para medição, execução das leituras, mapeamento e elaboração dos dados e por fim interpretação dos resultados.

Todos os ensaios serão realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília (LABEST), as amostras utilizadas para o ensaio serão as peças já existentes no laboratório.

Foram selecionados dois tipos de amostras, a primeira formada por um bloco de concreto com estado de deterioração bem avançado, a segunda uma laje para estudo do ensaio de pesquisa “Análise Experimental Da Punção Em Lajes Lisas De Concreto Armado Com Armadura De Cisalhamento Tipo Estribo Aberto” Siqueira, J.P.A; 2019.

3.2.1. Características das amostras

3.2.1.1. Bloco de concreto

A primeira amostra é composta por um bloco de concreto encontrado há mais de 10 anos no LABEST, com dimensões de 60x60 cm, sua armadura já estava exposta em alguns pontos, o

que de fato auxiliou no ensaio dado que não foi possível localizar o detalhamento da sua armadura.

Com um espaçamento de 20 em 20 centímetros foi possível realizar todas as medições, abaixo pode-se perceber o estado da peça na medição dos dados:



Figura 3-1 Bloco de Concreto. (Imagem Autoral)

Apesar da falta de disponibilidade das informações técnicas da amostra, as informações necessárias para o estudo puderam ser obtidas com medições no local e inspeção visual.

3.2.1.2. Laje Lisa

Por se tratar de uma peça mais recente, a segunda amostra traz consigo maiores informações; a peça utilizada foi a laje tipo *Crab No Anchore* (CNA,) lajes que não apresentam nenhuma forma de ancoragem nas barras longitudinais, sendo posicionadas internamente às armaduras, de acordo com Siqueira, JPA (2019). Desta forma, é possível obter o posicionamento e detalhamento da estrutura, pois sem ele seria inviável fazer a análise, dado que se tratava de uma peça bem conservada. Todas as informações a seguir foram retiradas do ensaio: “Análise Experimental Da Punção Em Lajes Lisas De Concreto Armado Com Armadura De Cisalhamento Tipo Estribo Aberto” Siqueira, J.P.A; 2019.

A laje tem as seguintes dimensões: 2500 x 2500 mm de comprimento, altura de 180 mm, cobrimento inferior e superior de 20 mm. Todas as lajes se apoiam em pilares contínuos de seção transversal quadrada de 300 mm com altura total de 1580mm, conforme Figura 3-2.

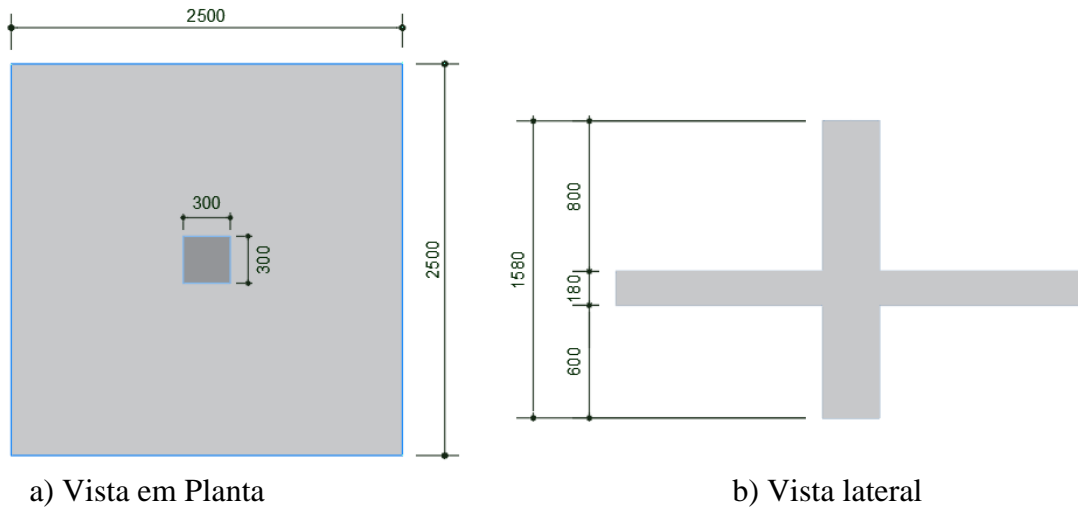


Figura 3-2– Dimensões dos modelos locais ensaiados, com unidades em mm
(Siqueira, 2019)

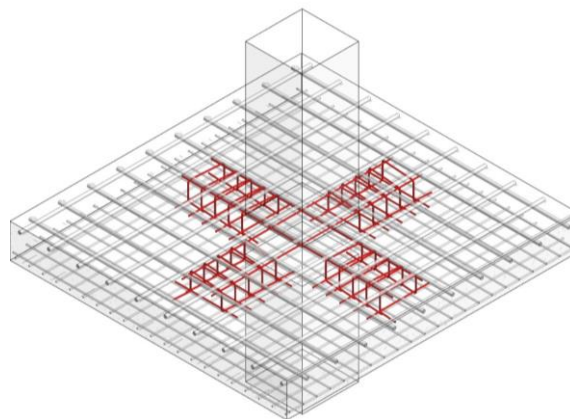
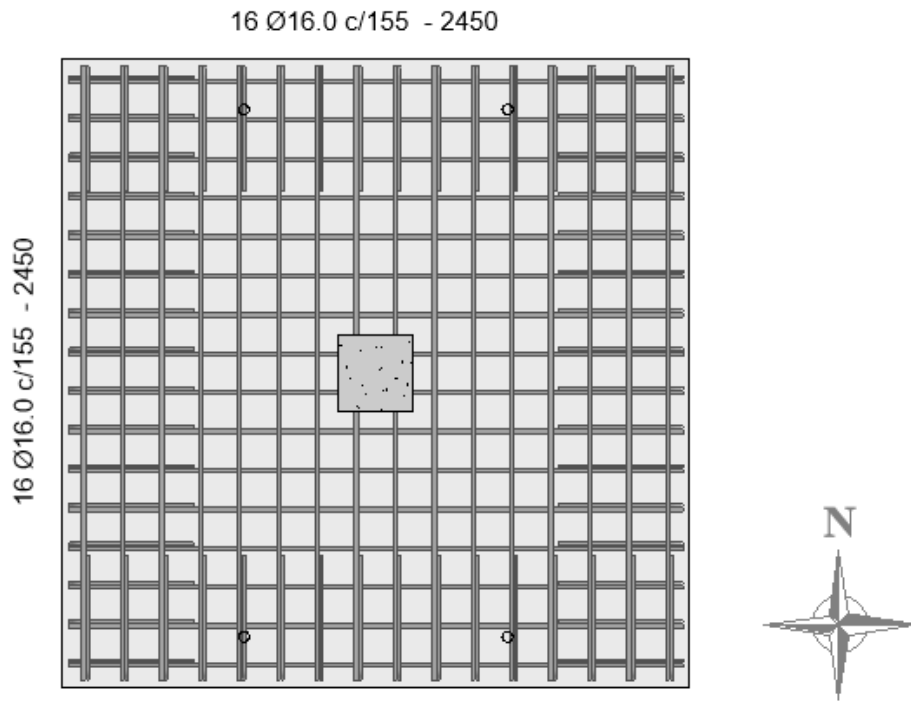
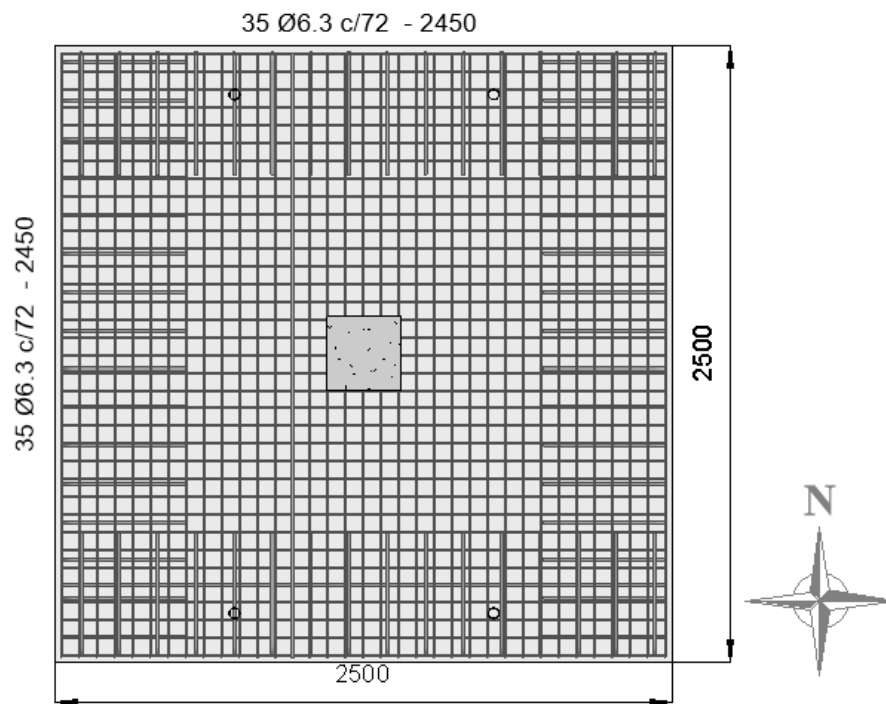


Figura 3-3- Detalhes das armaduras do modelo (Siqueira, 2019)



a) Armadura de flexão superior



b) Armadura de flexão inferior

Figura 3-4- Projeto das armaduras de flexão das lajes em planta (medidas em mm)

3.3. Aquisição e registro dos dados

As amostras acima descritas foram submetidas aos ensaios de resistividade elétrica superficial e a distintas análises conforme exposto a seguir.

Para a obtenção dos dados, foram estabelecidas algumas etapas preparatórias das amostras:

- Identificou-se a localização e disposição das barras das armaduras, de acordo com o detalhamento apresentado acima;
- Realizou-se a marcação das distancias de medição de 1cm em 1cm, com posição inicial sobre o eixo da primeira barra até a última medida a distância de 10cm a 15 cm da primeira barra;
- Foi realizada a limpeza das superfícies das amostras utilizando um pano seco para retirada de poeira e grãos maiores;
- Umidificou-se a superfície com 400 ml de água. Passado 15 minutos após a primeira umidificação da peça, realizou-se a umidificação novamente com 200 ml de água antes da primeira medição,
- Ao realizar a primeira medição umidificou-se os contatos do Resipod e posicionou-se o equipamento na primeira marcação sobre a barra.
- Realizou-se a medição paralela ao eixo da barra, perpendicular ao eixo da barra e na diagonal sob o ângulo de 45° em relação ao eixo da barra a cada marcação determinada, conforme apresentado nas figuras abaixo;
- Ao final de cada medição, aguardou-se cinco minutos e se umidificou novamente a superfície com 100 ml de água e os contatos do Resipod, a fim de garantir condições iguais em todas as tiragens.

O registro de cada amostragem foi mantido na própria memória do aparelho, sendo tiradas de doze a quinze medições para usarmos na análise da faixa de dez medições mais adequada.

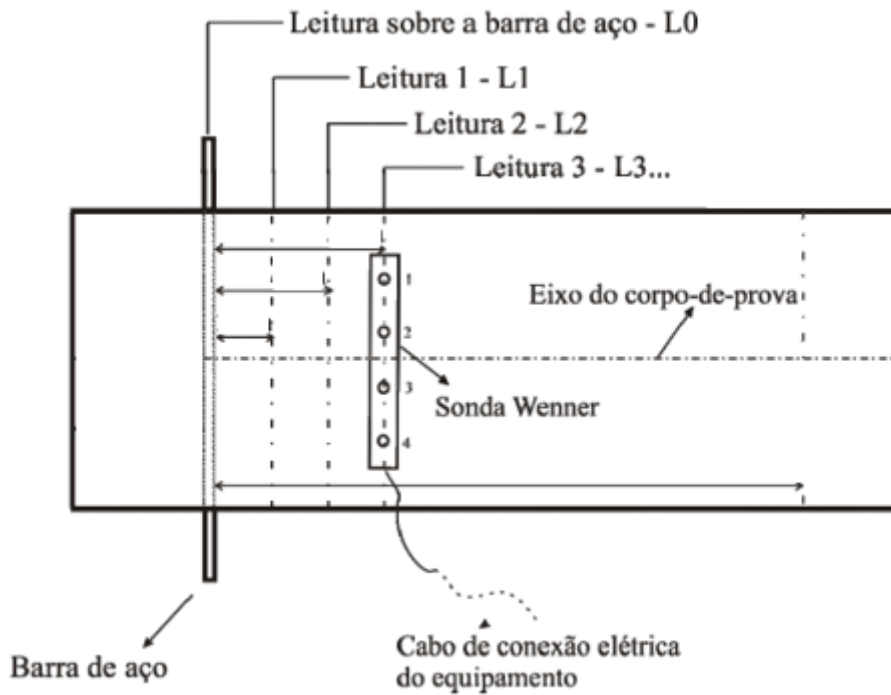


Figura 3-5 Esquema de ensaio adotado para as medidas realizadas sobre e paralelamente à barra de aço

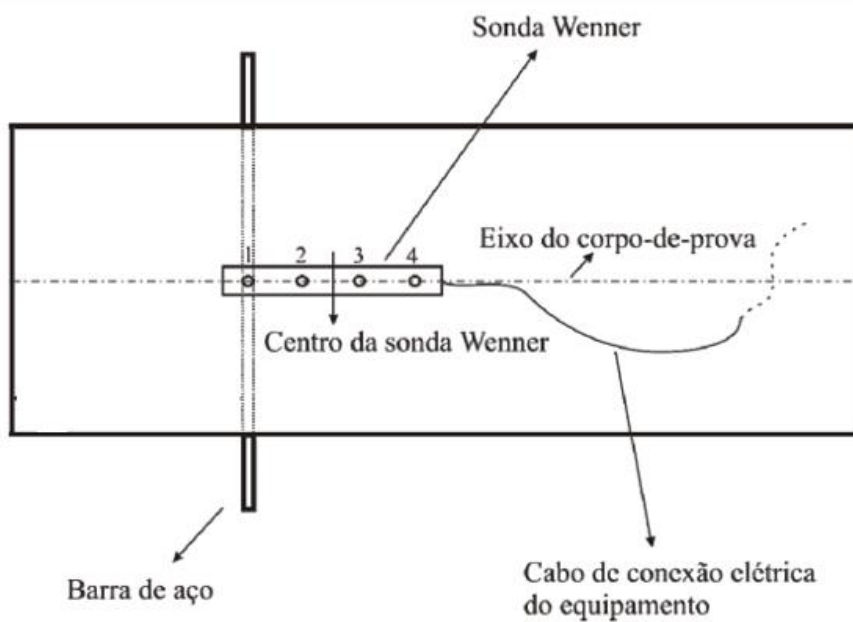


Figura 3-6 Esquema de ensaio adotado para as medidas realizadas perpendicularmente à barra de aço

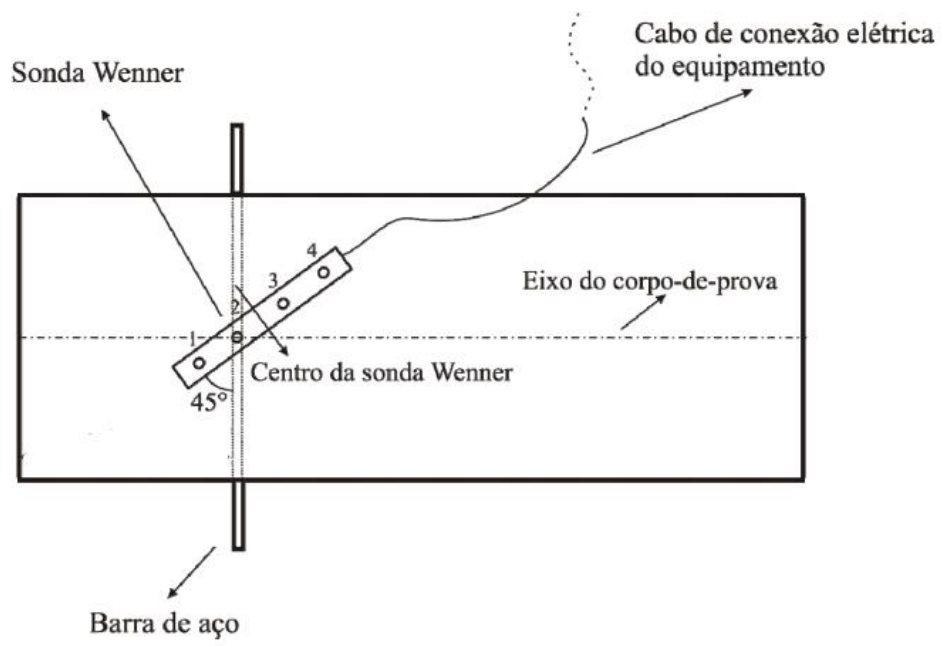


Figura 3-7 Esquema de ensaio adotado para as medidas inclinadas a 45° em relação à barra de aço

4. ELABORAÇÃO, TRATAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS.

4.1. Análise da influência da armadura com medições em paralelo à barra de aço

Com o objetivo de determinar até que distância, em cm, os valores de resistividade elétrica superficial medidos paralelamente à barra de aço da armadura da amostra (medidas realizadas a intervalos regulares de 1,0 cm) são influenciados pela presença e condutividade do aço.

4.1.1. Bloco de concreto

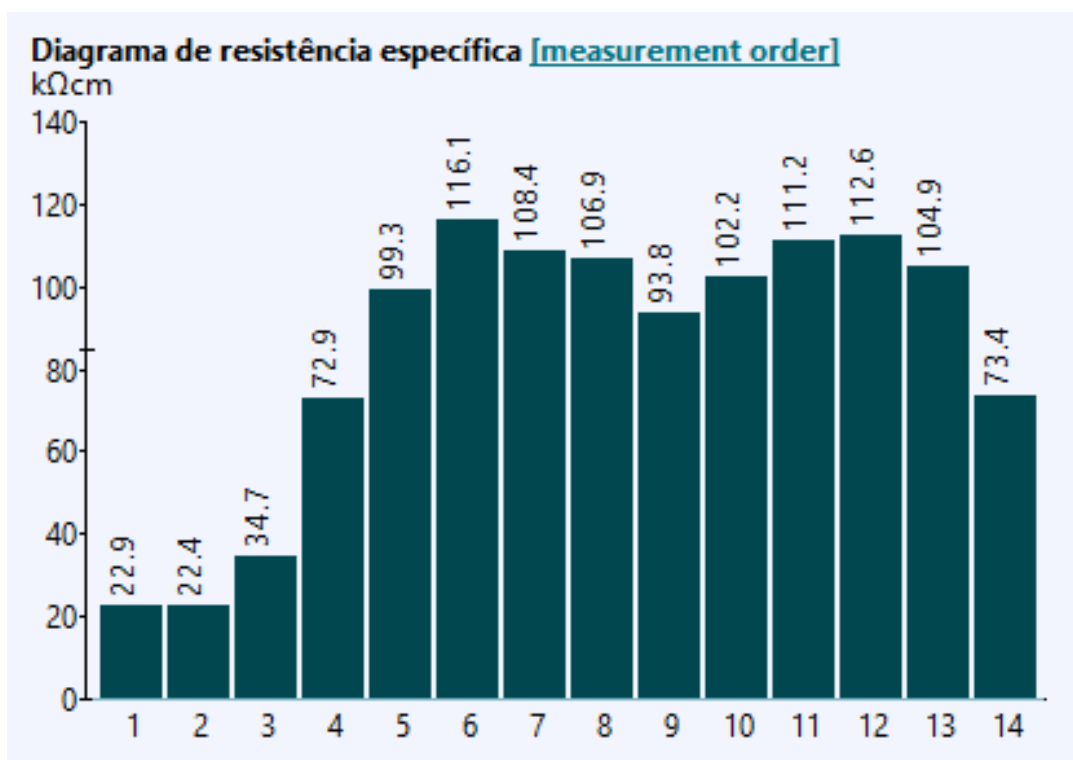


Figura 4-1 – Dados Bloco medidos em paralelo, ResipodLink

Pode-se observar na figura acima que foram extraídas 14 amostras partindo da barra de aço. Da amostra de número exibidas, há uma tendência de espelhamento dos dados. Essa tendência ocorre pelo fato da barra seguinte da armadura aumentar a sua influência na medição da

resistividade da peça, por isso, foi feito um tratamento dos dados no software Excel com as amostras de 1 a 10.

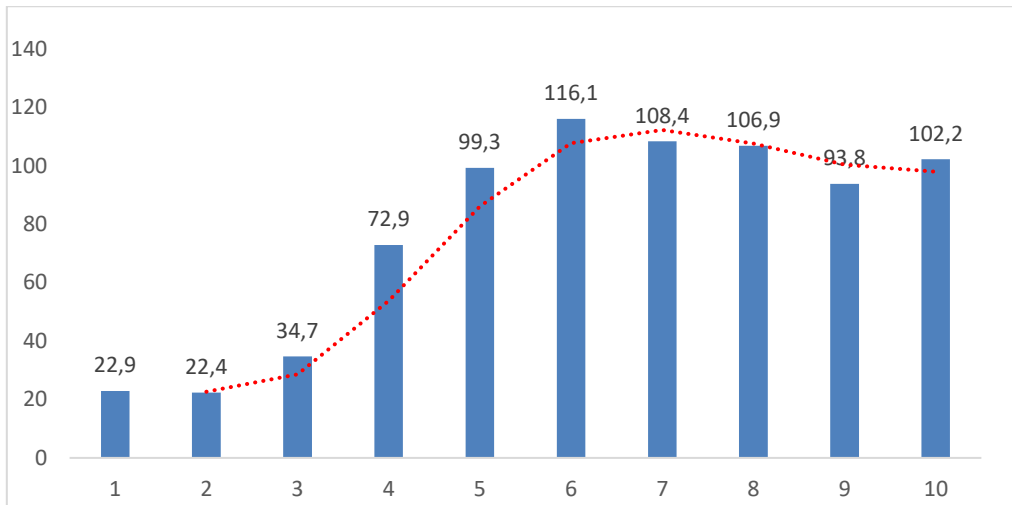


Figura 4-2 Dados Bloco medido em paralelo, Excel

Analisando as leituras acima, percebe-se que há um aumento da resistividade elétrica superficial do concreto ao passo que a medição de distância da primeira barra da armadura da peça, em seguida apresenta uma leve queda conforme se aproxima da seguinte barra da armadura.

4.1.2. Laje

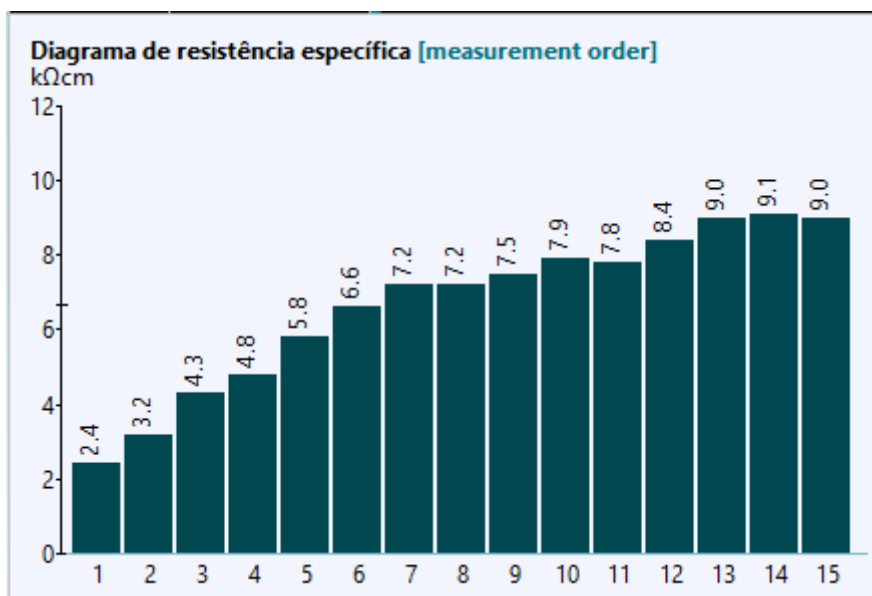


Figura 4-3 – Dados Laje medido em paralelo, ResipodLink

Observa-se no caso da laje que por haver um espaçamento maior entre as barras de aço da armadura, não houve dentro do número de mostras retiradas uma influência, mas para manter o padrão de análise, foram retiradas as primeiras dez amostras.

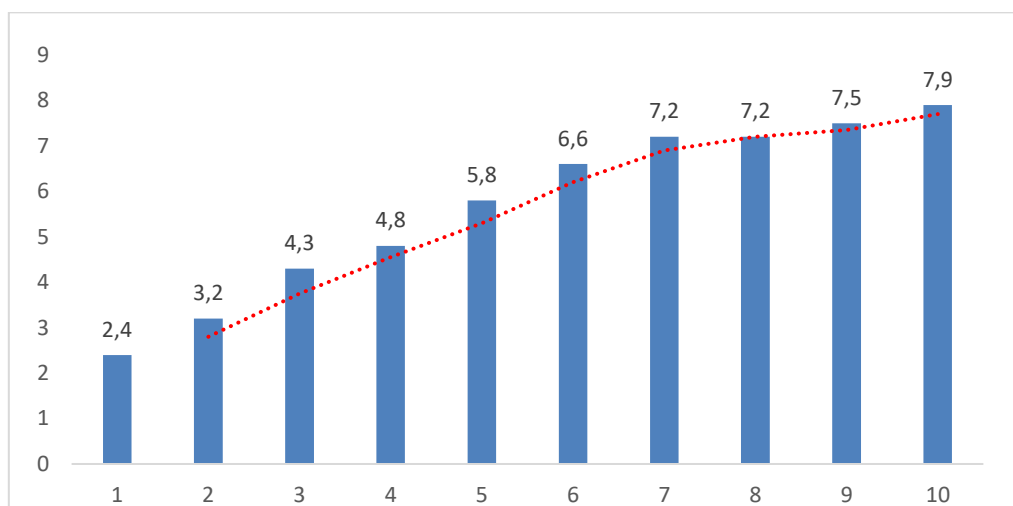


Figura 4-4 – Dados Laje medido em paralelo, Excel

Analisando as leituras acima, percebe-se que a um aumento da resistividade elétrica superficial do concreto ao passo que a medição de distância barra da armadura da peça.

4.2. Análise da influência da armadura com medições em perpendicular à barra de aço

Esta análise teve como objetivo verificar a influência da armadura imersa no concreto quando realizadas medidas de resistividade elétrica superficial posicionando-se os contatos do Resipod perpendicularmente à barra de aço, posicionando o centro do aparelho sobre a barra. Buscou-se detectar posições do contato sobre a armadura e analisar como resultam essas medidas afetadas pela condutividade do aço

4.2.1. Bloco de concreto

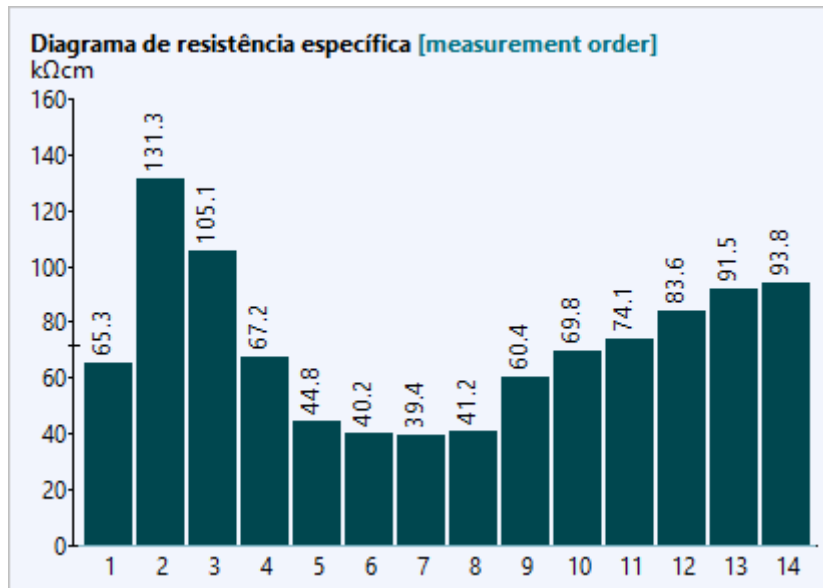


Figura 4-5– Dados Bloco medido em perpendicular, ResipodLink

Como foi seguido na medição em paralelo, serão extraídas e analisadas somente as dez primeiras amostras do caso.

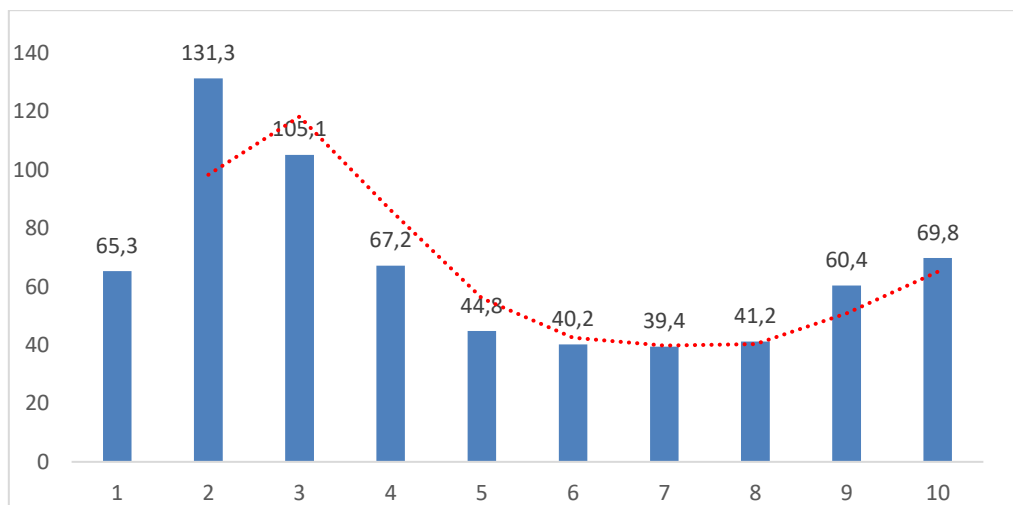


Figura 4-6- Dados Bloco medido em perpendicular, Excel

Analisando as leituras acima, percebe-se que a uma queda da resistividade elétrica superficial do concreto conforme a medição é influenciada pela presença de duas armaduras no raio de alcance do aparelho.

4.2.2. Laje

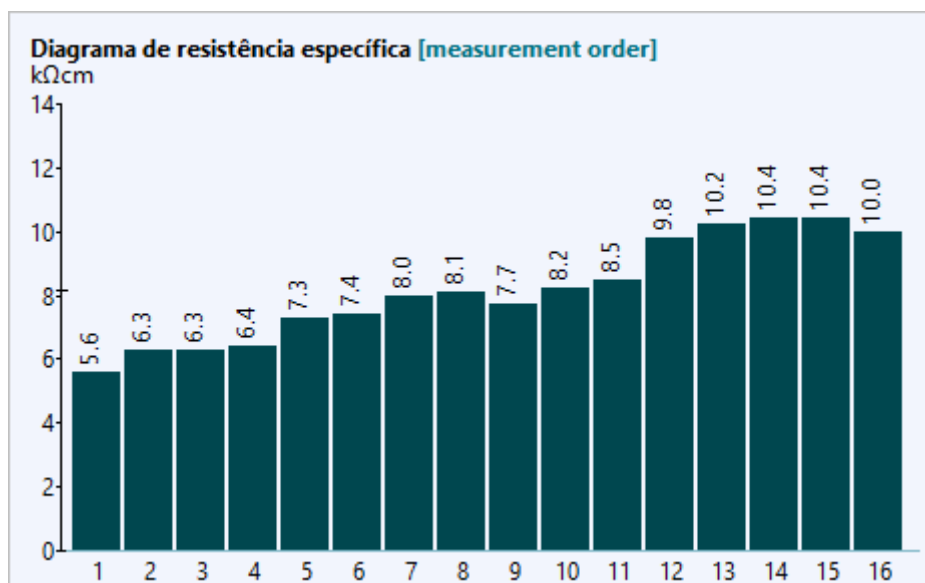


Figura 4-7– Dados Laje medido em perpendicular, ResipodLink
Como foi seguido na medição em paralelo, serão extraídas e analisadas somente as dez primeiras amostras do caso.

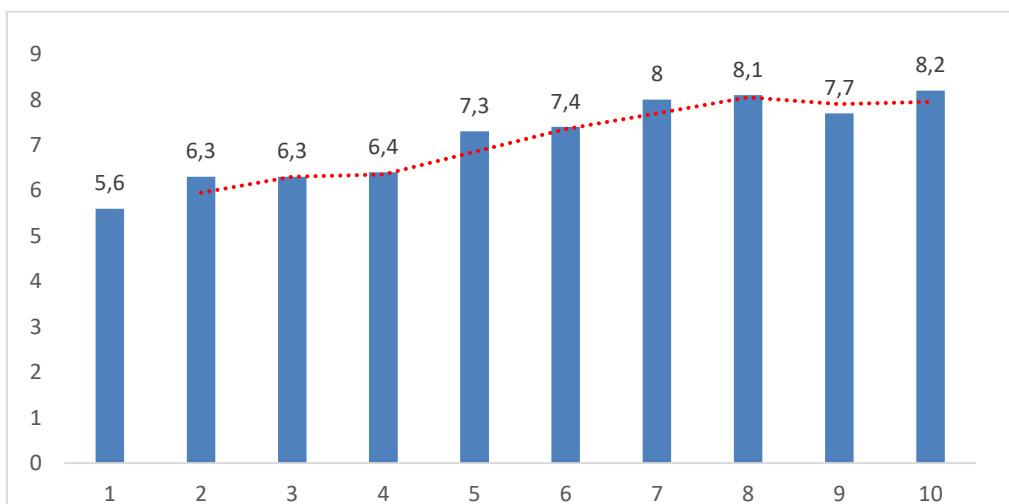


Figura 4-8– Dados Laje medido em perpendicular, Excel

Analisando as leituras acima, percebe-se que a um aumento da resistividade elétrica superficial do concreto conforme a medição de distância barra da armadura da peça.

4.3. Análise da influência da armadura nas medidas realizadas inclinadas à 45° em relação à barra de aço

Esta análise teve como objetivo verificar a influência da armadura da peça quando realizadas medidas de resistividade elétrica posicionando-se o aparelho Resipod inclinado à 45° em relação à barra de aço. Buscou-se, assim como realizado com as medidas perpendiculares à barra de aço, analisadas anteriormente, detectar como a posição dos contatos sobre a armadura resultassem em medidas afetadas pela condutividade do aço.

4.3.1. Bloco de concreto

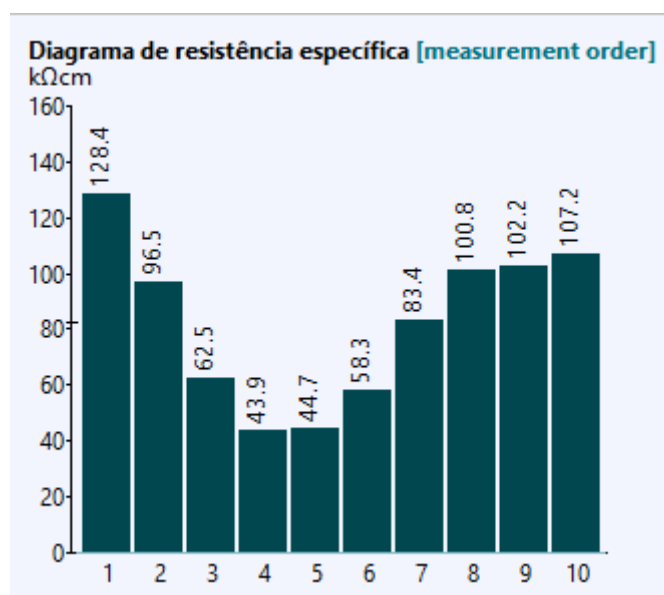


Figura 4-9 – Dados Bloco medidos à 45°, ResipodLink

Como foi seguido na medição em paralelo e perpendicular, serão extraídos e analisados somente as dez primeiras amostras do caso.

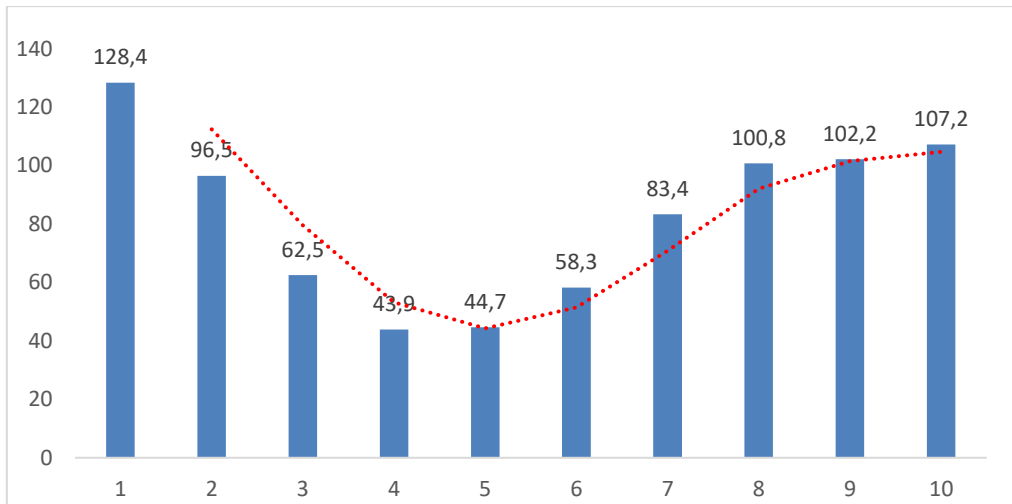


Figura 4-10– Dados Bloco medidos à 45°, Excel

Analisando as leituras acima, percebe-se que existe uma queda da resistividade elétrica superficial do concreto dado que a medição é influenciada pela presença de duas armaduras no raio de alcance do aparelho. Em seguida, apresenta-se um aumento conforme se afasta da influência da primeira barra da armadura.

4.3.2. Laje

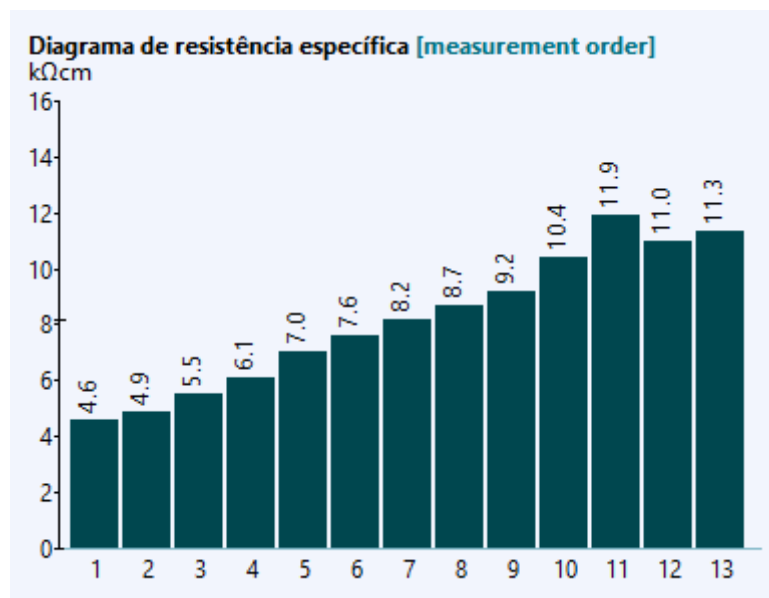


Figura 4-11– Dados Laje medidos à 45°, ResipodLink

Como foi seguido na medição em paralelo e perpendicular, serão extraídas e analisadas somente as dez primeiras amostras do caso.

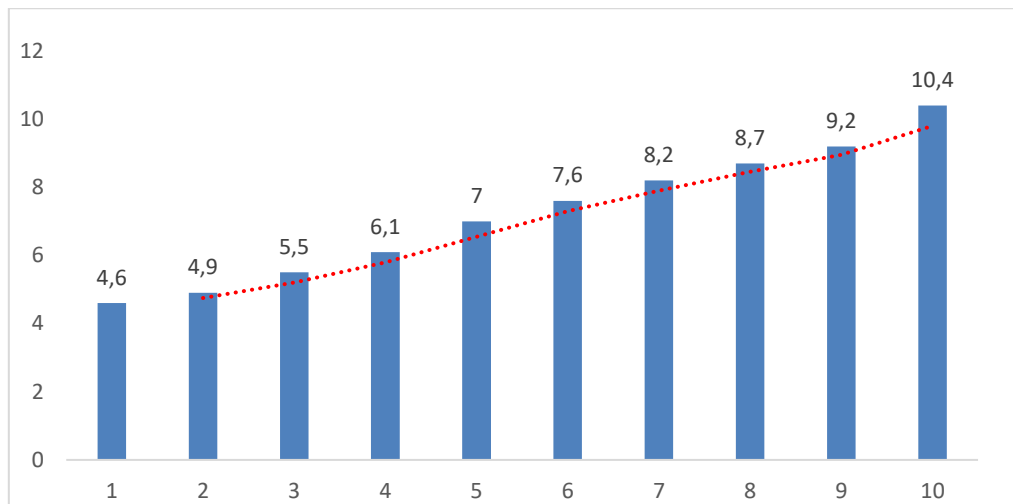


Figura 4-12– Dados Laje medidos à 45°, Excel

Analisando as leituras acima, percebe-se que há um aumento da resistividade elétrica superficial do concreto ao passo que a medição de distância barra da armadura da peça.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Ao realizar os ensaios variando a distância e posição da sonda de Wenner, foi possível estabelecer comparações entre os resultados obtidos por medições paralelas, perpendiculares e diagonais as barras da armadura. Nas medições paralelas em amostras de pequeno espaçamento entre as barras, todos os eletrodos estão equidistantes da do eixo da barra. Sendo assim, quando os eletrodos estão posicionados sobre a barra apresentam maior condutividade elétrica e conseqüentemente menor resistividade. A medida que se distanciam do eixo da barra, a resistividade aumenta até ser influenciada pela barra seguinte.

Já as medições perpendiculares e diagonais percebemos o mesmo comportamento, todavia, é possível visualizar melhor a influência da segunda barra, visto que nessa disposição as extremidades da sonda ficam cada qual mais próximas das barras adjacentes.

Nas medições em amostras com grandes espaçamentos, não há influência de uma segunda barra. Dessa forma, as medições paralelas apresentam maior variação entre a primeira e a última medição comparada as medições perpendiculares. Isso ocorre porque na primeira medição paralela todos os eletrodos estão sobre o eixo da barra, ou seja, submetidos a uma maior condutividade elétrica; enquanto na medição perpendicular, os eletrodos das extremidades da sonda estão mais distantes do eixo da barra, isto é, sob menor influência da condutividade da mesma.

Por fim, a medição diagonal apresentou valor intermediário entre as medições anteriores, tem em vista que a distância das extremidades estava mais próxima do eixo da barra que a medição perpendicular, mas não sobre a barra como a medição paralela.

6. CONCLUSÃO

O estudo bibliográfico mostrou que diversos fatores interferem na medição de resistividade elétrica superficial do concreto pelo método de Wenner. Mensurar a influência desses fatores é de fundamental importância para garantir a assertividade dos resultados. Assim, sabe-se que a influência da distância e da posição da sonda frente a armadura representam apenas uma parcela da interferência desses fatores, no entanto, espera-se que os resultados aqui apresentados contribuam para aplicação prática e suas conclusões para o desenvolvimento de uma metodologia padrão.

Por meio das análises dos ensaios realizados, conclui-se que a resistividade elétrica superficial do concreto cresce com aumento da distância da armadura e que a disposição das armaduras deve ser escolhida de forma a evitar a sua influência. Sendo assim, em amostras de grandes espaçamentos entre as barras é preferível a medição paralela aos eixos das barras no ponto central equidistante entre elas. Já em amostras de pequenos espaçamentos é preferível a medição em 45° de modo a evitar a influência tanto das barras verticais quando das barras horizontais de modo que nenhum eletrodo esteja posicionado sobre a barra.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C. Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras, Editora Pini, São Paulo, Brasil 1992.

ARAUJO, A; PANOSSIAN, Z. Resistividade Elétrica do Concreto na Avaliação do Risco de Corrosão nas Estruturas Atmosféricas. *Téchne* 200, 2013.

ARAUJO, A; PANOSSIAN, Z. Técnicas de medida da resistividade elétrica em estruturas atmosféricas de concreto convencional. *Téchne* 200, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. NBR9204:1985 - Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica-volumétrica. ABNT, Rio de Janeiro, (1985).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. NBR 7117:1981 – Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos, ABNT, Rio de Janeiro, (1981).

CASCUDO, O. Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações, editado por G. C. Isaia. IBRACON, São Paulo, Vol. 1, 2005.

GOWERS, K. R.; MILLARD, S. G.: Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using wenner technique. *ACI Materials Journal*, n. 96-M66, 1999.

HELENE, P. R. L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. Tese (Livre Docente). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

LENCIONI, J. W. Estudos sobre resistividade elétrica em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios. Tese de doutorado em Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2010.

LENCIONI, J. W. Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto – Estado-da-Arte. CIPAN, Córdoba, Argentina 2010.

LORENZI, A. Aplicação de redes neurais artificiais para estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de propagação do pulso ultrassônico, Porto Alegre, 2009, Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, 2009.

MACHADO, A. P.; MACHADO, B. A. Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP: teoria e prática. São Paulo: Editora Pini, 2015.

MEDEIROS, M. H. F. Estudo de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MILLARD, S. G. Reinforced concrete resistivity measurement techniques. Proceedings of Institute of Civil Engineers. Vol. 91, parte 2, 1991.

SANTOS, L. Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Engenharia Civil). Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SIQUERIA, J. P. A. Análise Experimental Da Punção Em Lajes Lisas De Concreto Armado Com Armadura De Cisalhamento Tipo Estribo Aberto. Dissertação (Mestrado em Estrutura e Engenharia Civil). Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

PROCEQ Resipod Family, Instruções de operação, Teste de durabilidade do concreto, Proceq 2017.