

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

LIDIANNE DO NASCIMENTO FARIAS

INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO E DOS PARÂMETROS DE
ENSAIO NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA OBTIDA PELO MÉTODO DIRETO

FEIRA DE SANTANA, BA - BRASIL
FEVEREIRO, 2020

LIDIANNE DO NASCIMENTO FARIAS

**INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO E DOS PARÂMETROS DE
ENSAIO NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA OBTIDA PELO MÉTODO DIRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Materiais de Construção e Estruturas.

Orientadores:

Prof. Dra. Cintia Maria Ariani Fontes

Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL

FEVEREIRO, 2020

Ficha catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado - UEFS

Farias, Lidianne do Nascimento
F238i Influência da composição do concreto e dos parâmetros de ensaio na resistividade elétrica obtida pelo método direto / Lidianne do Nascimento Farias. – 2020.
112f.: il.

Orientadores: Cintia Maria Ariani Fontes, Paulo Roberto Lopes Lima.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Feira de Santana. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2020.

1. Concreto. 2. Resistividade elétrica. I. Fontes, Cintia Maria Ariani, orient. II. Lima, Paulo Roberto Lopes, orient. III. Universidade Estadual de Feira de Santana. IV. Título.

CDU: 624.012.45

Rejane Maria Rosa Ribeiro – Bibliotecária CRB-5/695

**INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO E DOS PARÂMETROS DE
ENSAIO NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA OBTIDA PELO MÉTODO DIRETO**

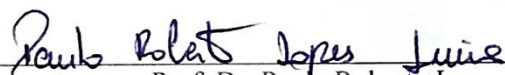
Lidianne do Nascimento Farias

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Aprovado por:



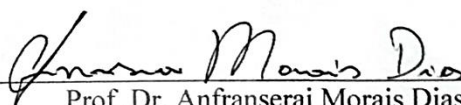
Prof.^a Dr.^a Cintia Maria Ariani Fontes
(Universidade Estadual de Feira de Santana)



Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima
(Universidade Estadual de Feira de Santana)



Prof. Dr. Ronaldo Alves Medeiros Júnior
(Universidade Federal do Paraná)



Prof. Dr. Anfranserai Morais Dias
(Universidade Estadual de Feira de Santana)

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL

FEVEREIRO, 2020

À minha mãe.

À minha avó, Maria Lapa (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu Deus por ter conseguido chegar até aqui. A Ti Senhor toda honra e toda glória por esta etapa vencida.

Todo meu amor e a minha gratidão à minha mãe. Agradeço por sempre estar do meu lado, me dando apoio, por cuidar de mim e pela educação que sempre me foi dada.

À minha avó (in memorian), que sempre esteve presente em todos os meus momentos e acreditava em mim. A saudade é muito grande.

Agradeço aos meus irmãos: Lizziane, Lussandra e Alex. E aos cunhados, Mateus e Luciano. Presentes e incentivadores. Também fazem parte desta conquista.

Aos meus sobrinhos, apesar de tão novos, trouxeram pureza, momentos de descontração e alegria.

À Ramiro, companheiro e grande incentivador, sempre acreditou em mim. Você fez parte de tudo isso desde o início. Sou muito grata por todo apoio que você sempre me deu.

Aos meus amigos e aos meus familiares. Em especial à família Nascimento Silva. Por toda alegria que foi compartilhada em cada conquista.

Agradeço imensamente aos meus orientadores. À professora Cintia Fontes e ao professor Paulo Roberto, pela orientação, por todo conhecimento que foi compartilhado ao longo desses dois anos, contribuições que foram dadas a este trabalho, tempo dedicado, dúvidas esclarecidas, profissionalismo, todo incentivo e compreensão. Enfim, toda gratidão eu tenho por vocês.

Agradeço ao professor Anfraserai Dias, por todo apoio na montagem do equipamento para a execução dos ensaios de resistividade elétrica pelo método direto, fundamental para que o procedimento experimental deste trabalho fosse realizado.

Agradeço a todos os colegas de mestrado pela convivência diária que fizeram essa jornada se tornar mais leve, em especial, Itamara, Juliane, Patrícia, Paulo Henrique. Agradeço também aos colaboradores dos laboratórios de pesquisa de materiais e estruturas

(LABOTEC I e II) por cada ajuda que me foi dada, em especial, Mariana, Cátia, Mirela, Sr. Nilson, Izabela e Marta.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental por ter contribuído na minha formação.

Agradeço à FAPESB pelo fornecimento da bolsa de mestrado.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental e à Universidade Estadual de Feira de Santana por esta oportunidade. Agradeço ao Laboratório de Durabilidade da UFBA (LEDMa/UFBA) pelo apoio na realização dos ensaios de resistividade elétrica pelo método dos quatro pontos (sonda Wenner).

Por fim, agradeço a todos aqueles que fizeram parte desta trajetória. Cada pequena contribuição se tornou fundamental para realização deste trabalho.

Resumo da dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO E DOS PARÂMETROS DE ENSAIO NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA OBTIDA PELO MÉTODO DIRETO

Lidianne do Nascimento Farias

Fevereiro/2020

Orientador 1: Prof.^a Dra. Cintia Maria Ariani Fontes

Orientador 2: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

A resistividade elétrica é vista como um parâmetro de verificação da durabilidade em estruturas, pois indica a resistência do concreto quanto à penetração de agentes agressivos. Além do que, considerando-se um método não destrutivo, pode-se tornar bastante útil sua utilização. Porém, tal propriedade pode ser influenciada por diversos fatores. Nesse contexto, o presente estudo avaliou o comportamento da resistividade elétrica devido alterações de composição das misturas (tipos de cimento, relações água/cimento e teores de brita) e quanto aos parâmetros de ensaio (teor de umidade, dimensão da amostra, idade e níveis de fissuração). A resistividade elétrica do concreto foi obtida através do Método Direto, conforme procedimentos da norma espanhola UNE 83988-1 (AENOR, 2008). Os resultados apontaram que a resistividade elétrica dos concretos aumentou com o tipo de cimento CPV-ARI, com o acréscimo no teor de agregado graúdo e com a redução da relação a/c. Em relação a dimensão dos corpos de prova e do seu grau de umidade, a redução desses parâmetros ocasionou um aumento substancial na resistividade dos concretos. Os níveis de fissuração mostraram que fissuras não visíveis sugerem uma baixa variação na resistividade quando aplicado níveis de tensão aos espécimes. Por fim, este trabalho determina valores de referência quanto à exposição do concreto aos níveis de corrosão, propondo o Método Direto como forma de avaliação da resistividade elétrica dos concretos.

Abstract of dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

INFLUENCE OF CONCRETE COMPOSITION AND TEST PARAMETERS ON THE ELECTRICAL RESISTIVITY OBTAINED BY THE DIRECT METHOD

Lidianne do Nascimento Farias

February/2020

Advisor 1: Professor DSc. Cintia Maria Ariani Fontes

Advisor 2: Professor DSc. Paulo Roberto Lopes Lima

Department: Civil and Environment Engineering

Electrical resistivity is seen as a parameter for verifying durability in structures, as it indicates the strength of concrete in terms of penetration by aggressive agents. In addition, considering it a non-destructive method, its use can be quite useful. However, this property can be influenced by several factors. In this context, the present study evaluated the behavior of electrical resistivity due to changes in the composition of mixtures (types of cement, water/cement ratios and gravel contents) and in terms of test parameters (moisture content, sample size, age and levels cracking). The electrical resistivity of the concrete was obtained through the Direct Method, according to the procedures of the Spanish standard UNE 83988-1 (AENOR, 2008). This test method has characteristics that have not been much investigated by the brazilian scientific community. The results showed that the electrical resistivity of the concrete increased with the type of cement CPV-ARI, with the increase in the content of coarse aggregate and with the reduction of the a/c ratio. Regarding the size of the specimens and their degree of humidity, the reduction of these parameters caused a substantial increase in the resistivity of the concretes. Cracking levels showed that invisible cracks suggest a low variation in resistivity when stress levels are applied to specimens. Finally, this work determines reference values regarding the exposure of concrete to corrosion levels, proposing the Direct Method as a way of evaluating the electrical resistivity of concrete.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO GERAL	3
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
2	RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO	5
2.1	INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DE PRODUÇÃO DO CONCRETO NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	9
2.1.1	Relação água/cimento.....	9
2.1.2	Agregados.....	10
2.1.3	Consumo e tipo de cimento.....	12
2.1.4	Adições minerais.....	13
2.1.5	Cura e grau de hidratação do cimento	15
2.2	INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS E CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO.....	16
2.2.1	Temperatura	16
2.2.2	Teor de umidade	18
2.2.3	Exposição à agentes agressivos.....	21
2.2.4	Presença de fissuras.....	22
2.3	MÉTODOS PARA MEDIDA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA	23
2.3.1	Método da resistividade volumétrica (NBR 9204).....	24
2.3.2	Método do disco	25
2.3.3	Método dos dois eletrodos.....	25
2.3.4	Método direto ou resistividade volumétrica.....	26
2.3.5	Método dos quatro pontos ou método de Wenner.....	27
2.3.6	Geometria da amostra e espaçamento entre os eletrodos	28
2.3.7	Comparação entre os métodos de ensaio.....	31
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	34
3.1	VARIÁVEIS DO ESTUDO	34
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	34
3.2.1	Cimento	34
3.2.2	Agregado miúdo.....	35
3.2.3	Agregado graúdo	36
3.2.4	Água.....	37

3.3	PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	37
3.4	DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIO	40
3.4.1	Resistividade elétrica.....	40
3.4.1.1	Ensaio de resistividade elétrica pelo método direto	40
3.4.1.2	Teor de umidade	44
3.4.1.3	Dimensão da amostra.....	45
3.4.1.4	Efeito do nível de fissuração na resistividade	47
3.4.2	Resistência à compressão axial.....	50
3.4.3	Módulo de elasticidade.....	50
3.4.4	Absorção de água por imersão.....	51
3.4.5	Absorção de água por capilaridade	51
3.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA	52
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	53
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	53
4.2	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE E IMERSÃO	57
4.3	RESISTIVIDADE ELÉTRICA PELO MÉTODO DIRETO	59
4.3.1	Influência da idade	59
4.3.2	Efeito do tipo de cimento na resistividade elétrica	61
4.3.3	Efeito da relação água/cimento na resistividade elétrica	63
4.3.4	Efeito do teor de agregado graúdo na resistividade elétrica	66
4.3.5	Efeito do teor de umidade na resistividade elétrica	69
4.3.6	Efeito da dimensão dos corpos de prova na resistividade elétrica	74
4.3.7	Efeito do nível de fissuração da amostra na resistividade elétrica	78
4.3.8	Correlação com a resistência à compressão axial.....	81
4.3.9	Correlação com o módulo de elasticidade	83
4.3.10	Correlação com a absorção de água do concreto	84
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	87
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Processo de corrosão analisado pelo fluxo elétrico (Fonte: HORNBOSTEL et al., 2013).....	6
Figura 2 Relação entre resistividade elétrica e coeficiente de difusão (Fonte: SENGUL, 2014).....	7
Figura 3 Relação entre resistividade elétrica e relação a/c (Fonte: HUGHES et al., 1985 apud ROSA, 2005)	10
Figura 4 Relação entre resistividade e teor de agregados (Fonte: SENGUL, 2014)..	11
Figura 5 Modelo de condução elétrica (mesoescala) em concretos (Fonte: HOU et al., 2017).....	11
Figura 6 Relação entre resistividade elétrica e os tipos de cimento (Fonte: MEDEIROS-JUNIOR; LIMA, 2016)	13
Figura 7 Relação entre resistividade elétrica e adições minerais (sílica e metacaulinita) no avanço de idade do concreto (Fonte: GHODDOUSI; ADELZADE, 2017).....	14
Figura 8 Relação entre resistividade elétrica e relação a/c com o avanço do tempo de cura do concreto (Fonte: MEDEIROS-JUNIOR et al., 2014).....	15
Figura 9 Resistividade elétrica sob a influência de adições minerais e tempo de cura do concreto (Fonte: Adaptado de GHOSH; TRAN, 2015)	16
Figura 10 Relação entre resistividade elétrica e temperatura (Fonte: TOMLINSON et al., 2017).....	17
Figura 11 Variação da resistividade elétrica em relação ao grau de saturação (Fonte: ELKEY; SELLEVOLD, 1995).....	19
Figura 12 Relação entre condições de umidade e resistividade elétrica do concreto (Fonte: SENGUL, 2014)	19
Figura 13 Resistividade elétrica em função da profundidade da fissura (Fonte: LATASTE et al., 2003)	23
Figura 14 Representação gráfica do método do disco (Fonte: AZARSA; GUPTA, 2017).....	25
Figura 15 Representação gráfica do método direto (Fonte: LAYSSI et al., 2015)...	26
Figura 16 Representação gráfica do método dos quatro pontos (Fonte: SBARTAÏ et al., 2007).....	27
Figura 17 Correlação entre configuração, distância entre sondas e geometria (Fonte: MORRIS et al., 1996).....	29
Figura 18 Resistividade elétrica dos concretos antes e depois da correção geométrica (Fonte: CHEN; CHANG; YEIH, 2014)	30
Figura 19 Comparação entre os métodos de medida (Fonte: Adaptado de COSTA; AZZI, 2017).....	32
Figura 20 Comparação entre métodos de medida (Fonte: Adaptado de GUDIMETTLA; CRAWFORD, 2014).....	33
Figura 21 Produção dos concretos. a) Mistura dos componentes do concreto em betoneira, b) Ensaio de abatimento pelo tronco de cone, c) Corpos de prova moldados	

em forma cilíndrica 100 mm x 200 mm e d) Corpos de prova desmoldados após 24 horas.....	39
Figura 22 Equipamento utilizado para medição da resistividade pelo método direto (Fonte: Adaptado de UNE 83988-1, 2008)	41
Figura 23 Medida da resistividade elétrica. a) Equipamento confeccionado para medições da resistividade b) Corpo de prova no momento da medição da resistência..	42
Figura 24 Resistivímetro - Método de Wenner (Fonte: PROCEQ SA, 2017).....	42
Figura 25 Relação entre método direto e superficial obtida pela calibração do equipamento.....	43
Figura 26 Ensaio de teor de umidade. a) Leitura corpo de prova seco em estufa, b) Corpos de prova imersos em água potável, c) Momento da pesagem da massa do corpo de prova.....	45
Figura 27 Ensaio dimensão da amostra. a) Momento do corte do corpo de prova, b) Corpo de prova seccionado ao meio (100x100 mm), c) Medição do corpo de prova (100x50 mm).	46
Figura 28 Esquema utilizado para ensaio dimensão da amostra. a) Corte da seção ao meio (100x100 mm), b) Corte da seção em quatro partes (100x50 mm).....	47
Figura 29 Diagrama de representação do comportamento de tensão do concreto sob compressão uniaxial (Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro, 2006)	48
Figura 30 Ensaio de fissuração	49
Figura 31 Ensaio de resistência à compressão axial	50
Figura 32 Ensaio de módulo de elasticidade.....	51
Figura 33 Ensaio de absorção de água por capilaridade. a) Vista frontal do momento do ensaio, b) Pesagem do corpo de prova, c) Vista superior dos corpos de prova selados com plástico filme	52
Figura 34 Influência do tipo de cimento nas propriedades mecânicas. a) Resistência à compressão, b) Módulo de elasticidade	54
Figura 35 Influência da relação água/cimento nas propriedades mecânicas	55
Figura 36 Influência do teor de agregado graúdo nas propriedades mecânicas.....	56
Figura 37 Absorção de água por capilaridade das misturas.....	58
Figura 38 Resistividade elétrica dos concretos – 28 e 56 dias de idade	60
Figura 39 Tipo de cimento x resistividade elétrica	61
Figura 40 Relação água/cimento x resistividade elétrica.....	64
Figura 41 Teor de agregado graúdo x resistividade elétrica	66
Figura 42 Teor de umidade x Resistividade elétrica da mistura CPIIF55_46%	69
Figura 43 Teor de umidade x Resistividade elétrica da mistura CPIIF55_40%	70
Figura 44 Teor de umidade x Resistividade elétrica da mistura CPIIF55_43%	70
Figura 45 Teor de umidade x Resistividade elétrica da mistura CPIIZ55_43%	71
Figura 46 Teor de umidade x Resistividade elétrica da mistura CPV55_43%	71
Figura 47 Teor de umidade x Resistividade elétrica da mistura CPIIF50_43%	72
Figura 48 Teor de umidade x Resistividade elétrica da mistura CPIIF60_43%	72
Figura 49 Corpos de prova em dimensão 100 mm x 50 mm para avaliação da resistividade elétrica quanto à homogeneidade dos concretos	75
Figura 50 Efeito da dimensão da amostra.....	77

Figura 51	Relação apresentada por Mehta e Monteiro (2006) e os percentuais de carregamento do estudo (Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2006))	79
Figura 52	Perfis das curvas tensão-deformação. a) Ciclo 1, b) Ciclo 2, c) Ciclo 3 e d) Ciclo 4.....	80
Figura 53	Relação entre a resistência à compressão e a resistividade elétrica pelo método direto de todas misturas	81
Figura 54	Relação entre resistência à compressão e resistividade elétrica superficial por Medeiros-Junior (2014).....	82
Figura 55	Relação entre o módulo de elasticidade e resistividade elétrica pelo método direto de todas as misturas.....	83
Figura 56	Relação entre módulo de elasticidade e resistividade elétrica por Hongyu et al. (2015).....	84
Figura 57	Relação entre a absorção de água e a resistividade elétrica pelo método direto. a) absorção por capilaridade, b) absorção por imersão	85
Figura 58	Relação entre absorção de água e resistividade elétrica pelo método volumétrico por Santos (2006). a) absorção capilar, b) absorção por imersão	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Risco de corrosão baseado na resistividade elétrica conforme CEB 192	6
Tabela 2	Risco de corrosão baseado na resistividade elétrica conforme Polder (2001)	7
Tabela 3	Síntese dos resultados de resistividade encontrado por diversos autores.....	8
Tabela 4	Ciclo de molhagem-secagem estabelecido por Banea (2015).....	20
Tabela 5	Fator de forma para diferentes amostras e espaçamento entre pontos pela UNE 83988-2.....	31
Tabela 6	Coefficiente de determinação (R^2) do comparativo entre métodos de resistividade direta e quatro pontos	33
Tabela 7	Ensaio de caracterização do cimento	35
Tabela 8	Caracterização da areia utilizada.....	36
Tabela 9	Caracterização do agregado graúdo utilizado	36
Tabela 10	Nomenclatura das misturas e divisão por análise.....	37
Tabela 11	Traço unitário, consumo de cimento e abatimento dos concretos produzidos.....	37
Tabela 12	Ensaio realizado por mistura de concreto.....	40
Tabela 13	Resultados médios das propriedades mecânicas das misturas.....	53
Tabela 14	Resultados médios das propriedades físicas das misturas	57
Tabela 15	Resultados médios de resistividade elétrica obtidos pelo método direto .	59
Tabela 16	Teste-t para comparativo de médias do tipo de cimento na resistividade elétrica das misturas.....	63
Tabela 17	Teste-t para comparativo de médias da influência da relação a/c na resistividade elétrica das misturas	65
Tabela 18	Teste-t para comparativo de médias da influência do teor de agregado graúdo na resistividade elétrica das misturas	67
Tabela 19	Resultados médios de resistividade elétrica por seção da amostra.....	74
Tabela 20	Relação entre duas resistividades obtidas pelo método direto em diferentes dimensões de amostras cilíndricas.....	78
Tabela 21	Resultados médios de resistividade elétrica pelo método direto sob o efeito de carregamentos de tensão	78
Tabela 22	Risco de corrosão baseado na resistividade elétrica pelo método direto..	89

1 INTRODUÇÃO

A preocupação cada vez maior com o desempenho, estabilidade e segurança das edificações ocasionaram o aprimoramento de materiais, métodos e a consolidação das tecnologias nas construções.

Conforme Coutinho e Gonçalves (1994), duas das propriedades fundamentais que envolvem os materiais são, a resistência e a durabilidade. No entanto, por muito tempo, a resistência à compressão era o único parâmetro de avaliação recomendado. Logo, constatou-se que o concreto também envelhece, e que, os cuidados que se deve ter vão além da sua composição, execução e cura. Ou seja, o essencial não está só em construir uma edificação, mas também dar condições para que seja capaz de suportar as solicitações para o qual foi projetada durante toda sua vida útil (COUTINHO, 2005; NEVILLE, 1997). Então, em vista de um melhor desempenho das construções, o estudo da durabilidade foi avançado.

A experiência prática mostra que vários são os aspectos que acarretam a perda de durabilidade do concreto e ocasionam a sua deterioração, entre estes, em ordem decrescente de importância está: a corrosão das armaduras, exposição aos ciclos de congelamento e descongelamento, reação álcali-sílica e o ataque de agentes agressivos, tais como cloretos e sulfatos no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A corrosão das armaduras é uma das manifestações patológicas mais frequentemente observadas, o que vem causando sérios danos às estruturas de concreto. A causa mais comum para o início desse fenômeno está na migração de agentes agressivos para o interior do concreto, (OLSSON *et al.*, 2013), através dos mecanismos de transportes. Esses mecanismos são fortemente dependentes da estrutura dos poros, configuração das fissuras do material e das influências das condições ambientais (umidade e temperatura). Ensaio de difusão iônica, absorção capilar ou permeabilidade investigam a probabilidade de ocorrência de penetração de agentes deteriorantes, podendo estimar a durabilidade do concreto (BRANDÃO, 1998; NEVILLE; BROOKS, 2010).

No entanto, apesar da importância desses ensaios, tais práticas não fornecem uma durabilidade que seja facilmente controlada. A inserção de indicadores de durabilidade durante o dimensionamento das estruturas de concreto tem estimulado ainda mais o desenvolvimento de novos modelos concernentes a vida útil dos materiais (ANDRADE,

2004; SENGUL, 2014). Desta maneira, o modelo de vida útil baseado na resistividade elétrica é identificado como uma proposta abrangente às demandas relativas ao controle de durabilidade (ANDRADE *et al.*, 2009). Sendo assim, a resistividade surge como forma de monitoramento quanto à possível ocorrência de deterioração precoce das estruturas por meio da corrosão das armaduras e possibilitando meios de preveni-la.

A resistividade elétrica do concreto pode ser definida como uma propriedade que indica a dificuldade com que a corrente elétrica flui pelo seu interior. Por isso, pode fornecer indicações sobre a conectividade dos poros e umidade. E ser utilizada como uma medida indireta da capacidade do concreto em resistir à penetração de substâncias agressivas, líquidas ou gasosas (HELENE, 1993; ANDRADE, 2004; WHITING; NAGI, 2003).

Tal propriedade, então, é um dos principais indicadores de controle do processo corrosivo eletroquímico, qual pode influenciar no período de iniciação e na velocidade de propagação da corrosão das armaduras (LENCIONI, 2011). Cascudo (1997) afirma que a velocidade da taxa de corrosão depende muito da resistividade elétrica do concreto. Por sua vez, a propriedade se torna um indicador de durabilidade, pois quanto maior a sua taxa, menor a suscetibilidade de desencadear o processo corrosivo no concreto armado.

Uma das facilidades do ensaio de resistividade elétrica é a sua realização de forma não destrutiva ao concreto, permitindo que se avalie, continuamente, uma única peça ao longo do tempo. No entanto, é necessário considerar uma variedade de fatores que podem influenciar nos seus resultados, principalmente, quanto às características intrínsecas à matriz cimentícia que alteram a resistividade do concreto; os fatores ambientais que ocasionam alteração nas medidas de resistividade; e os métodos de medida utilizados (LAYSSI *et al.*, 2015; MENDES *et al.*, 2018; SANTOS, 2006; SENGUL, 2014; TOMLISON *et al.*, 2017). Por exemplo, fatores externos, como temperaturas mais altas, reduzem os valores de resistividade (AZARSA; GUPTA, 2017). E fatores internos, como uma menor porosidade, resultam em maior resistividade elétrica do concreto.

Assim sendo, a depender de tais condições e métodos utilizados, estudos feitos por Ghosh e Tran (2015); Medeiros-Júnior (2014); Godinho *et al.* (2018); Kurda, Brito e Silvestre (2019); Lübeck *et al.* (2012); Silva e Brito (2013); Sbartai *et al.* (2007) mostraram que os valores de resistividade variaram entre 46 a 1.187 Ω .m. Outros fatores, como diferentes tipos de cimento, relação água/cimento, adições minerais, geometria, idade e condições

de exposição do concreto, também influenciam diretamente nestes valores. Nesse contexto, este trabalho buscou aprofundar os estudos do método direto como medida de resistividade elétrica, avaliando os efeitos proporcionados por alterações nos parâmetros de ensaio e composição de dosagem.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a resistividade elétrica dos concretos utilizando o método direto em diferentes tipos de composição do concreto e parâmetros de ensaio.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- avaliar o efeito do método direto de ensaio na resistividade elétrica dos concretos produzidos com as diferentes composições de misturas (tipo de cimento, relação água/cimento e teor de agregado graúdo);
- investigar a resistividade elétrica dos concretos quanto aos parâmetros de ensaio (teor de umidade, dimensão da amostra, tempo de cura e níveis de fissuração);
- estabelecer correlação entre as propriedades mecânicas e a resistividade elétrica dos concretos;
- verificar a existência de correlação entre a absorção de água e a resistividade elétrica dos concretos.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente estudo está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo introduz sobre a necessidade da utilização da resistividade elétrica como forma de parâmetro para investigação da durabilidade das estruturas. Também apresenta os objetivos geral e específicos do estudo.

O capítulo 2 trata sobre o tema do trabalho, reunindo os aspectos relevantes sobre a resistividade elétrica dos concretos, apresentando os parâmetros microestruturais, ambientais e de ensaio que influenciam nos resultados da propriedade.

O capítulo 3 descreve o programa experimental utilizado para o desenvolvimento da pesquisa. Neste capítulo são detalhados todos os materiais utilizados e suas

caracterizações. Assim como, descreve sobre o processo de produção dos concretos e os métodos de ensaios que foram utilizados.

O capítulo 4 apresenta os resultados que foram obtidos por meio dos ensaios realizados, assim como, suas discussões.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com o presente estudo, assim como as recomendações. Apresenta também as sugestões para trabalhos futuros.

As referências são apresentadas posterior às conclusões e recomendações do trabalho.

2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

A resistividade elétrica dos concretos está ligada diretamente ao processo de corrosão das armaduras, pois a sua verificação permite avaliar a facilidade de acesso dos íons cloreto e o dióxido de carbono antes de desencadeado o processo corrosivo e estimar a velocidade desse processo depois de desencadeado (HELENE, 1986). Azarsa e Gupta (2017) ressaltaram que quando os íons são transportados através da microestrutura, a resistividade está relacionada a capacidade do concreto de suportar a transferência desses íons.

De forma geral, a determinação da resistividade elétrica, definida como a propriedade do material de resistir a passagem de carga elétrica pelo seu interior (SANTOS, 2006; HELENE, 1993), ao ser relacionada com os mecanismos de transporte dos agentes agressivos nos poros do concreto (SANTOS, 2006), pode ser utilizada como um parâmetro de durabilidade e vida útil.

Conforme Mendes *et al.* (2018), essa propriedade atua como eficiente indicador de durabilidade do concreto, além de trazer vantagens devido a rapidez e facilidade de execução do ensaio. É considerado um ensaio não destrutivo, em que as amostras podem ser aproveitadas por longo período, em resumo, são requisitos substancialmente menores de mão-de-obra e tempo, o que diferencia do ensaio de difusão iônica, como Sengul (2014) cita.

Hornbostel *et al.* (2013) relatou que essa propriedade influencia diretamente no processo de corrosão eletroquímica porque tem capacidade de descrever exatamente o fluxo de íons entre as regiões do ânodo e do cátodo pela microestrutura do concreto (Figura 1). Contudo, a resistividade também pode ter uma correlação indireta com o processo de corrosão, influenciando as taxas de reação anódica e catódica. A taxa de corrosão pode ser descrita como fluxo de corrente elétrica i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

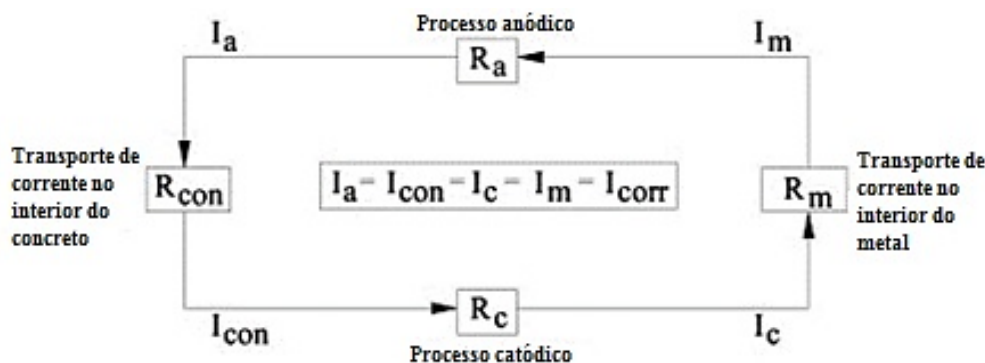


Figura 1 Processo de corrosão analisado pelo fluxo elétrico (Fonte: HORNBOSTEL *et al.*, 2013)

Pode-se dizer que a resistividade do concreto está estritamente relacionada com o modelo de vida útil das estruturas, conforme modelo proposto por Andrade (2004). No período de iniciação, a medição da resistividade pode indicar a influência da umidade no concreto ao longo do tempo e, conseqüente possibilidade de entrada de agentes agressivos; na propagação, após despassivação, a resistividade indica a intensidade da corrosão. Então, nesse aspecto, ela é vista como um dos parâmetros mais importantes que podem ajudar a avaliar a corrosão do aço no concreto (ANDRADE, 2004; HORNBOSTEL *et al.*, 2013; POLDER, 2001).

Encontra-se normatizado pelo CEB 192 (1989), os critérios de avaliação do concreto conforme valores de resistividade elétrica e a previsibilidade de corrosão. A Tabela 1 indica o previsto pela norma.

Tabela 1 Risco de corrosão baseado na resistividade elétrica conforme CEB 192

Resistividade elétrica (kΩ.cm)	Possibilidade de corrosão
> 20	Desprezível
10 – 20	Baixa
5 – 10	Alta
< 5	Muito alta

Fonte: CEB 192 (1989).

Além deste, há outro critério de classificação da resistividade elétrica quanto ao risco de corrosão, este elaborado por POLDER (2001) – apresentado na Tabela 2. São notadas diferenças entre os valores apresentados pelo CEB 192 (1989).

Tabela 2 Risco de corrosão baseado na resistividade elétrica conforme Polder (2001)

Resistividade elétrica ($\Omega.m$)	Possibilidade de corrosão
< 100	Alta
100 – 500	Moderada
500 – 1000	Baixa
> 1000	Negligenciável

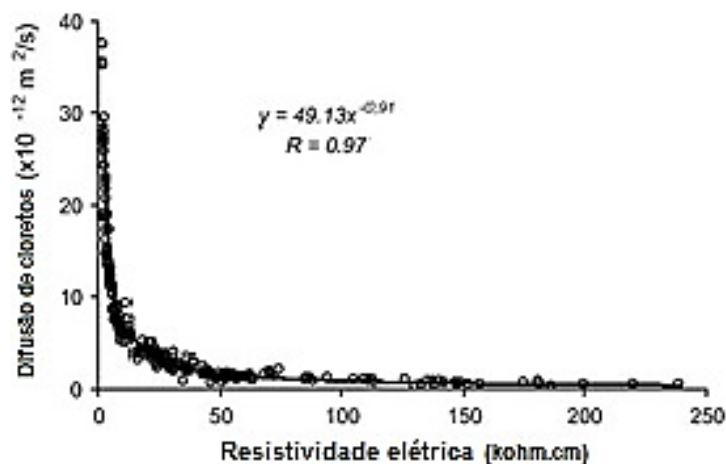
Fonte: Polder (2001).

Andrade (2004) correlacionou a resistividade do concreto com a previsão de início da ocorrência de corrosão (por meio da difusão). O autor relacionou o movimento das cargas elétricas com a condutividade do meio. Uma das equações descritas pode ser observada por meio da Equação 1:

$$D_e = \frac{K}{\rho_{es}} = k \cdot \sigma \quad (1)$$

Onde: D_e é o coeficiente de difusão efetivo ou estacionário; k é uma constante que é dependente da concentração agressiva externa; ρ é a resistividade efetiva (neste caso o concreto deve estar saturado) e σ é a condutividade elétrica (inversa da resistividade).

Sengul (2014) confirmou que o mecanismo da difusividade pode ser controlado indiretamente através da medida de resistividade, sendo esta propriedade um bom indicador da durabilidade do concreto. O autor estabeleceu comparativo entre resistividade elétrica e coeficiente de difusão, em meio a íons cloreto. Os resultados obtidos verificaram que quanto maior a resistividade elétrica menor o coeficiente de difusão (Figura 2), ou seja, menor a probabilidade de ingresso de agentes agressivos no concreto.

**Figura 2** Relação entre resistividade elétrica e coeficiente de difusão (Fonte: SENGUL, 2014)

A resistividade elétrica também pode ser correlacionada com as propriedades mecânicas dos concretos. Mendes *et al.* (2018), por exemplo, correlacionaram a resistividade elétrica com a resistência à compressão axial. Os autores verificaram uma influência proporcionalmente direta do comportamento da resistência mecânica, ou seja, à medida que a resistência à compressão aumentou, a resistividade elétrica também. Indicando que assim como a resistência mecânica, a resistividade é uma propriedade que depende fortemente das características de mistura do concreto.

Portanto, as principais influências nos resultados de resistividade elétrica se devem aos aspectos ligados às características internas do concreto (relacionada à sua microestrutura), além da geometria da amostra utilizada, método de medida utilizado, fatores ambientais e de exposição, entre outros. Vários estudos contemplam a análise da resistividade com influências de diversos fatores, a Tabela 3 traz uma síntese sobre as condições verificadas por alguns desses estudos.

Tabela 3 Síntese dos resultados de resistividade encontrado por diversos autores

Estudo	Parâmetro de avaliação	Tipo de amostra	Método	R.E. ($\Omega.m$)
Godinho <i>et al.</i> (2018)	Geometria	Cilíndrica (10 x 20 cm); prismática (10 x 4 x 16) e laje armada (25 x 25 x 7)	Quatro pontos	50 - 260
Sbartai <i>et al.</i> (2007)	Graus de saturação	Placas (25 x 25 x 8 cm)	Quatro pontos	54 - 960
Silva; Brito (2013)	Adição mineral e agregado	Cilíndrica (10 x 20 cm)	Direto	46 - 120
Kurda; Brito e Silvestre (2019)	Agregados reciclados e adições	Cilíndrica (10 x 20 cm)	Direto/ Quatro pontos	88 - 460
Ghoddousi; Adelzade (2017)	Adições em concreto auto-adensável	Cúbica (10 x 10 x 10 cm)	Adaptação do método direto	150 - 1100
Ghosh; Tran (2015)	Geometria (amostra e espaçamento entre sondas) e adições	Cilíndrica (10 x 20 cm) e (15 x 30 cm)	Quatro pontos	144 - 1187

Conforme os resultados descritos na Tabela 3 é possível inferir que há uma variabilidade nos resultados de resistividade elétrica proporcionada pela influência dos diversos parâmetros investigados por cada um dos estudos. Dessa forma, houve a necessidade de avaliá-las mais detalhadamente.

2.1 INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DE PRODUÇÃO DO CONCRETO NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA

As características de composição do concreto afetam as propriedades mecânicas e físicas do mesmo, além disso, são especialmente importantes para validação dos ensaios de resistividade.

Nesse sentido, a maioria dos estudos da resistividade elétrica, baseiam-se nas diferentes correlações entre os fatores responsáveis pela formação da microestrutura da pasta de cimento (poros), tais como: relação água/cimento, consumo e tipo de cimento, adições minerais, agregados, aditivos químicos, grau de hidratação, entre outros.

2.1.1 Relação água/cimento

Há uma forte influência da relação água/cimento na rede de poros do concreto endurecido, sendo assim, quanto maior a relação água/cimento maior a probabilidade da existência de uma microestrutura porosa, assim como poros com diâmetros maiores e/ou interconectados.

A resistividade elétrica possui uma natureza abrangente em relação à microestrutura do concreto. Portanto, a redução da relação a/c provoca um substancial aumento na resistividade elétrica do concreto através da melhoria da estrutura dos poros na microestrutura, devido à diminuição da porosidade e conseqüente dificuldade da mobilidade iônica pela solução aquosa, ou seja, menor disponibilidade de eletrólito (ANDRADE *et al.*, 2009; NAGI, 2004 apud SILVA; BRITO, 2013).

Ao analisar o efeito da relação a/c na resistividade elétrica, a tendência observada por Hughes (1985) apud Rosa (2005) confirmou o esperado, ou seja, a resistividade aumenta enquanto a relação a/c diminuiu para misturas com mesmo consumo de cimento, com ganhos em torno de 33% a 50%. A Figura 3 ilustra o comportamento.

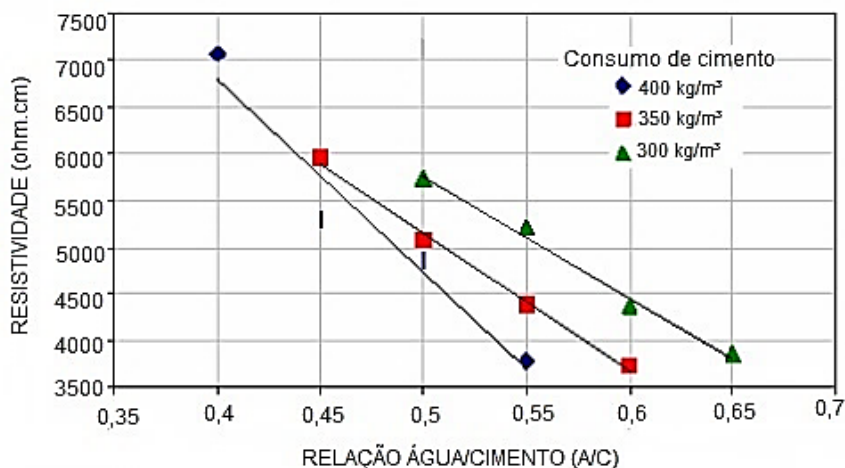


Figura 3 Relação entre resistividade elétrica e relação a/c (Fonte: HUGHES *et al.*, 1985 apud ROSA, 2005)

2.1.2 Agregados

A resistividade da pasta de cimento, em geral, é muito menor que a do agregado. Isso ocorre devido a facilidade de fluxo da corrente elétrica através dos poros presentes na pasta de cimento, que em suma, é muito maior que a dos agregados. Dessa forma, ao aumentar o teor de agregado na produção dos concretos, há um considerável aumento na resistividade elétrica, devido à obstrução da passagem de corrente elétrica causada pelas partículas de agregados praticamente não-condutoras e pela diminuição no volume da pasta cimentícia (AZARSA; GUPTA, 2017; MONFORE, 1968 apud JESUS, 2018; SENGUL, 2014).

Sengul (2014) relatou uma relação proporcional significativa entre a resistividade do concreto com a quantidade, tamanho e tipo de agregado. O autor produziu misturas com agregado calcário triturado de tamanhos entre 0-4 mm e 16-32 mm, em vários teores de incorporação, verificando que as resistividades mais altas foram obtidas com o aumento na quantidade, mesmo que para ambos os tamanhos de agregados. Como pode ser observado na Figura 4, misturas com 60% de agregado (16-32 mm) obtiveram uma resistividade elétrica em torno de 3 vezes maior que a da pasta de cimento, confirmando o indicado na literatura.

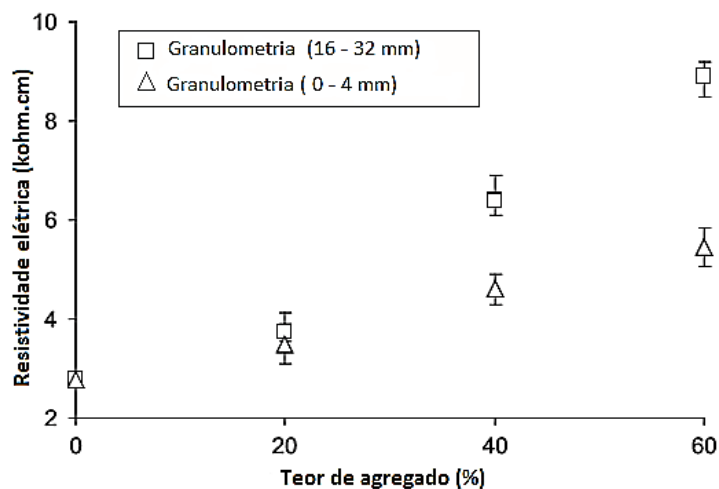


Figura 4 Relação entre resistividade e teor de agregados (Fonte: SENGUL, 2014)

Em relação ao tipo de agregado, a relação se deu entre o calcário britado e o cascalho. Os concretos com calcário moído obtiveram 29% e 54% de resistividade elétrica maior para os teores agregados de 60% e 73%, respectivamente, em relação ao cascalho, e isto foi explicado por Sengul (2014) através da provável melhoria das interfaces pasta-agregado. As partículas de calcário possuem uma melhor ligação com a pasta de cimento, proveniente da sua textura superficial áspera e ao formato irregular, isto, além de ter ocasionado melhoria na resistência mecânica desses concretos, pode ter ocasionado a redução na taxa de fluxo elétrico que afetou a resistividade.

Hou *et al.* (2017) apresentaram um modelo de condução elétrica (em mesoescala) em concretos, exibido na Figura 5:

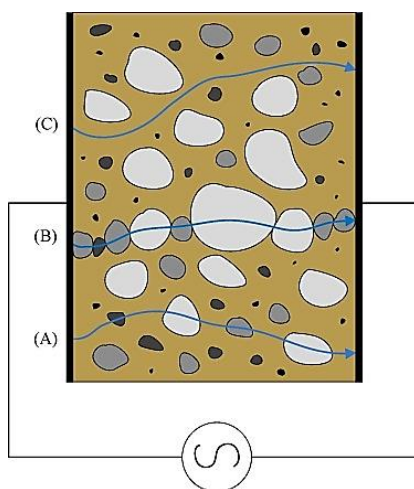


Figura 5 Modelo de condução elétrica (mesoescala) em concretos (Fonte: HOU *et al.*, 2017)

O modelo representado (Figura 5) indica que há três caminhos possíveis de condução elétrica nos concretos: (A) através do agregado em série, (B) através dos grânulos agregados com contato entre si, e (C) através da própria pasta. O caminho C mostra a forte influência do efeito do volume dos agregados na resistividade, os agregados submersos aleatoriamente na pasta (e em menor quantidade) poderão ocasionar uma diminuição da resistividade elétrica do concreto, pois a condução elétrica ocorrerá essencialmente pela pasta de cimento (HOU *et al.*, 2017).

Shi (2004) apud Silva e Brito (2013) confirmaram o aumento da resistividade elétrica com o aumento do volume de agregado na mistura e acrescentaram que tal incremento se deve essencialmente à ascendência da matriz cimentícia na propriedade, isto é, o maior volume de agregado implica menos pasta e, conseqüentemente, menos “espaço” para a mobilidade iônica. No entanto, é importante destacar que a resistividade elétrica é muito mais sensível às alterações provenientes da pasta de cimento (SANTOS, 2006).

2.1.3 Consumo e tipo de cimento

A resistividade elétrica também é influenciada pelo consumo e tipo de cimento utilizado na produção do concreto. Como mencionado anteriormente, a resistividade da pasta de cimento é baixa, portanto, com a redução do consumo de cimento há uma tendência de aumento na resistividade elétrica do concreto devido à sensibilidade da propriedade às alterações da matriz (SANTOS, 2006). No entanto, em concretos com baixas relações água/cimento, o consumo de cimento não altera muito os valores de resistividade elétrica. A variação neste caso é reduzida devido à menor quantidade de eletrólito disponível para o fluxo de corrente (HOPPE, 2005).

Com relação ao tipo de cimento, autores como (MENDES *et al.*, 2018 e MEDEIROS-JUNIOR; LIMA, 2016) verificaram a influência das diferenciadas classes existentes no Brasil quanto à resistividade elétrica do concreto.

Em estudo elaborado por Medeiros-Junior e Lima (2016), maiores resistividades foram obtidas nos espécimes produzidos com cimentos que possuem quantidade significativa de adições minerais em sua composição, CPIII (com adição de escória de alto forno) e CPIV (com adição de cinza volante), como pode ser observado na Figura 6.

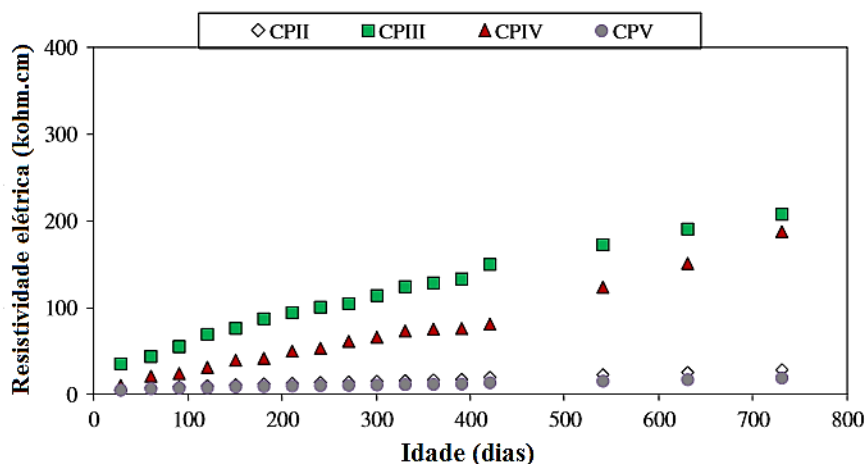


Figura 6 Relação entre resistividade elétrica e os tipos de cimento (Fonte: MEDEIROS-JUNIOR; LIMA, 2016)

Resultado semelhante foi encontrado por Mendes *et al.* (2018), no entanto, o cimento CP IV, com conteúdo pozolânico entre 15 e 50%, chegou a atingir em média, 129% maior que o CII utilizado pelos autores. Em geral, estas alterações são explicadas pelo refinamento dos poros proporcionado pelas adições minerais contidas nas composições desses cimentos. Whiting e Nagi (2003) finalizam que o tipo de cimento, quantidade de álcalis e quantidade de C_3A (aluminato tricálcio) são componentes relacionados a química do cimento que podem influenciar diretamente na resistividade elétrica do concreto.

2.1.4 Adições minerais

Adições minerais são essencialmente importantes na produção de concretos, visto que atuam como forma de melhoria em suas características de desempenho e durabilidade. Substituições no teor de cimento Portland por algum tipo de adição mineral modificam a microestrutura da matriz cimentícia proporcionando uma reestruturação na rede poros do concreto.

As adições pozolânicas reagem com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) disponível na matriz formando novos produtos hidratados do cimento que ocasionam o refinamento dos poros, fato que também está relacionado com o grau de hidratação dos concretos.

Com a permeabilidade do concreto reduzida, devido à redução da porosidade capilar e dos íons hidroxila (OH^-), há um possível aumento da resistência elétrica do concreto (AZARSA; GUPTA, 2017).

Lübeck *et al.* (2012) observaram um aumento de até cinco vezes na resistividade do concreto após a substituição de 50% e 70% do cimento Portland por escória de alto forno. Mota (2016) comprovou em seu estudo que adições como sílica ativa e metacaulinita promoveram melhoria nas propriedades físicas dos concretos, e isso, conseqüentemente, aumentou consideravelmente os aspectos de durabilidade. O autor relatou que quanto maior foi a quantidade adicionada destes materiais (entre teores de 5%, 10% e 15%), maior foi a durabilidade observada. A mesma tendência foi notada por Ghoddousi e Adelzade (2017), com a inclusão das mesmas adições que Mota (2016), ou seja, os concretos obtiveram incrementos na resistividade em torno de 83% e 85% (28 e 365 dias, respectivamente) nas misturas com os dois componentes, como observa-se na Figura 7 - (concreto referência (S-Ref), sílica ativa (S-SF), metacaulinita (S-MK) e sílica ativa/metacaulinita (S-SF/MK)).

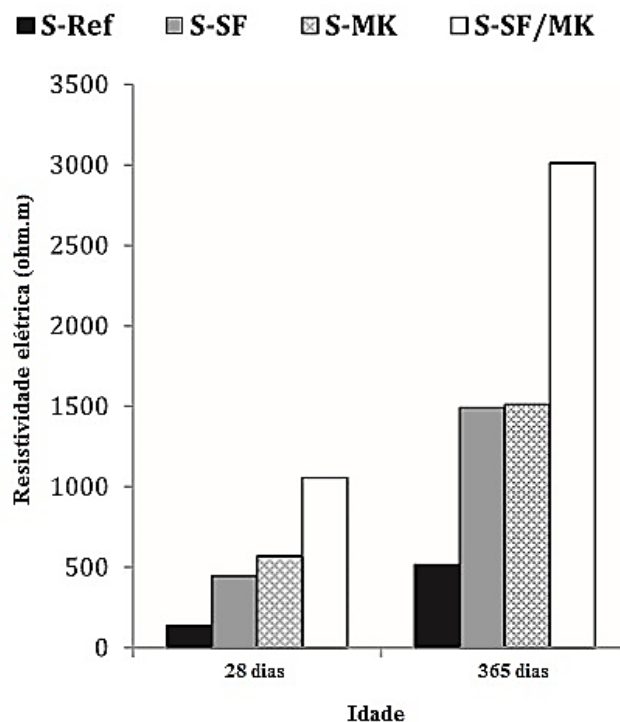


Figura 7 Relação entre resistividade elétrica e adições minerais (sílica e metacaulinita) no avanço de idade do concreto (Fonte: GHODDOUSI; ADELZADE, 2017)

Assim sendo, o comportamento observado por esses e demais autores confirmam que acréscimos de adições minerais resultam em concretos propensos a terem uma maior durabilidade, que pode ser promovida por uma redução da conectividade dos poros do concreto e influencia diretamente ao ganho de resistividade elétrica.

2.1.5 Cura e grau de hidratação do cimento

É necessário considerar os efeitos da idade do concreto em sua resistividade elétrica. O processo de cura tem uma importância significativa nessa propriedade, devido, principalmente, ao processo de hidratação do cimento.

Medeiros-Junior *et al.* (2014) relataram que para um mesmo tipo de cimento e mesma relação a/c, houve acréscimos na resistividade elétrica do concreto com o avanço no tempo de ensaio para todas as misturas. Visto em torno de 58%, como observado na Figura 8.

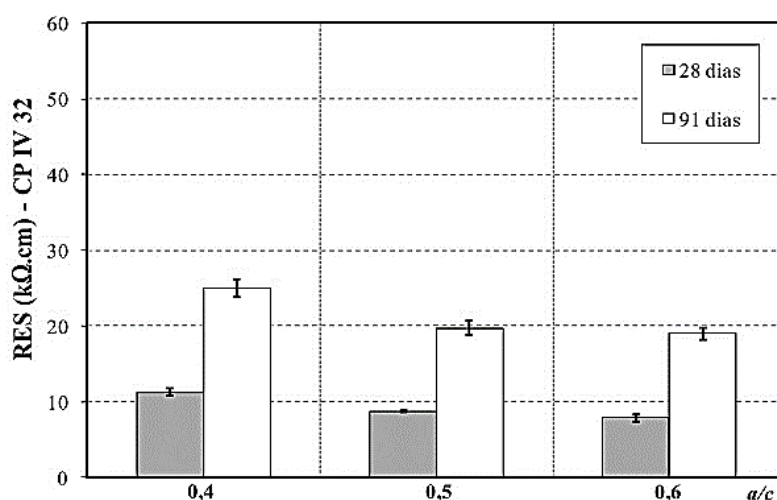


Figura 8 Relação entre resistividade elétrica e relação a/c com o avanço do tempo de cura do concreto (Fonte: MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014)

A hidratação adicional cimentícia proveniente do tempo maior de cura do concreto, normalmente reduz a sua porosidade e a forma como esses poros estão interconectados. Em síntese, tem-se que a resistividade do concreto aumenta com o tempo (cura) devido ao refinamento da estrutura do poro. Assim, o avanço na hidratação do cimento reflete tanto nos resultados de resistência mecânica quanto nos de resistividade (ANDRADE *et al.*, 2009; AZARSA; GUPTA, 2017).

Polder (2001) finalizou que os critérios básicos para aumento da resistividade incluem: menor relação a/c, a adição de minerais reativos e a maior cura (hidratação) do concreto. Fatores que também foram comprovados por Ghosh e Tran (2015) em sua pesquisa que inclui o estudo da influência de adições (cinza volante (CV), metacaulim (M), sílica ativa (SA) e escória (E)) e tempo de cura do concreto na resistividade elétrica – ver Figura 9 – (os resultados estão apresentados conforme sequência das misturas em legenda).

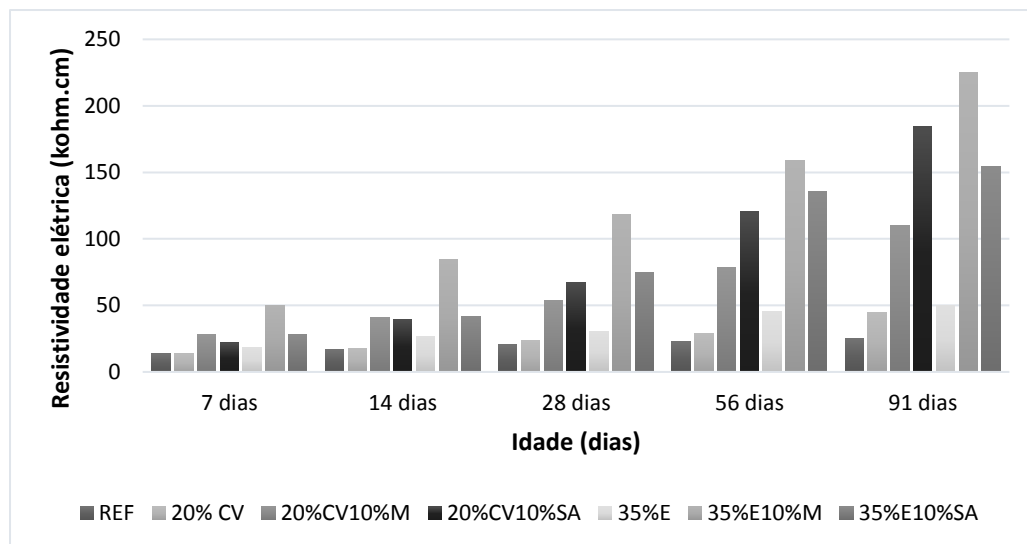


Figura 9 Resistividade elétrica sob a influência de adições minerais e tempo de cura do concreto (Fonte: Adaptado de GHOSH; TRAN, 2015)

O avanço na cura dos concretos ao longo do período de investigação (7 a 91 dias) observado na Figura 9, mostra claramente o acréscimo da resistividade elétrica do concreto. Tal fato foi notado em todas as misturas avaliadas, desde menores diferenças perceptíveis, como no caso da mistura de referência com incremento de 45,7% com o avanço de cura, até as maiores constatações, como no caso da mistura com 20% de CV e 10% de SA em substituição ao cimento, com acréscimo de 88% com o aumento na idade do concreto.

2.2 INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS E CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO

Os fatores intervenientes à resistividade elétrica vão além das características intrínsecas à microestrutura do concreto. As condições relacionadas à temperatura e ao teor de umidade são duas principais características ambientais que podem afetar significativamente a resistividade medida. Além destes, os concretos devem ser analisados quanto à sua exposição à meios que possam dispor de agentes agressivos, e quanto às fissurações que podem facilitar as rotas de transportes dessas substâncias nocivas ao seu interior.

2.2.1 Temperatura

A temperatura influencia no fluxo da corrente elétrica do concreto, principalmente quando há uma alta variação da mesma. A mobilidade dos íons presentes nos poros dos

concretos é intensificada com o aumento da temperatura, o que indica uma redução na resistividade (TOMLINSON *et al.* 2017) e, ao longo do tempo, podem resultar em uma redistribuição da sua concentração.

Conforme normatizado pela NBR 9204 (ABNT, 2012) para requisitos de determinação da resistividade pelo método volumétrico, no intervalo de $(24 \pm 4)^\circ\text{C}$ a resistividade elétrica varia cerca de 3% a 5% para cada grau de aumento ou diminuição da temperatura.

A fim de investigar o efeito da mudança de temperatura nos concretos, Tomlinson *et al.* (2017) avaliaram a resistividade durante ciclos gelo/desgelo (-24° a $+24^\circ\text{C}$). Conforme comportamento apresentado na Figura 10, foi identificado uma constante na resistividade quando as temperaturas se mantiveram em valores parecidos. No entanto, uma alta variação foi observada quando se comparou os resultados do degelo com o congelamento. Essa variação indicou um acréscimo de até 83% nas leituras de resistividades dos concretos sob temperaturas abaixo de 0°C .

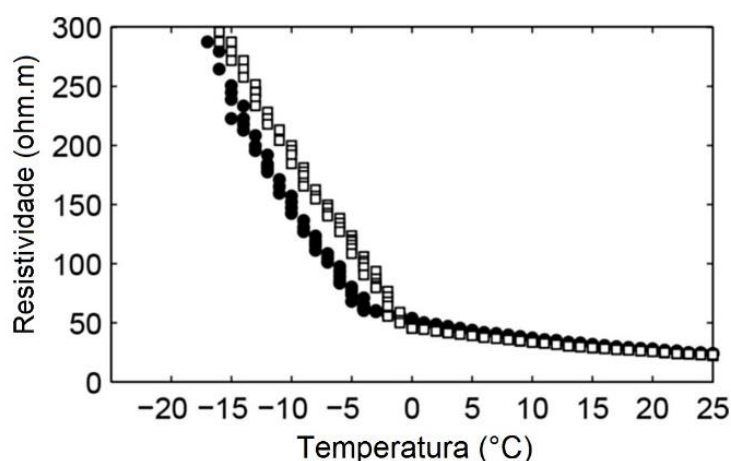


Figura 10 Relação entre resistividade elétrica e temperatura (Fonte: TOMLINSON *et al.*, 2017)

Dessa forma, pôde-se observar que mudanças de temperatura têm efeitos importantes na resistividade do concreto. As variações da mobilidade de elétrons em diferentes temperaturas refletem nas variações da resistividade, pois quando a temperatura aumenta, os elétrons se movem mais rápido, causando maior condutividade elétrica e diminuindo a resistividade elétrica do concreto (POLDER, 2001; SENGUL, 2014).

2.2.2 Teor de umidade

A resistividade elétrica do concreto é especialmente dependente do grau de saturação dos poros da estrutura (LOPEZ; GONZALEZ, 1993). A corrente elétrica é transportada por íons que fluem através dos poros no concreto. Portanto, com o teor de umidade mais alto, há uma maior facilidade na mobilidade iônica, alta possibilidade de iniciação da corrosão das armaduras na estrutura e, assim, consequente redução da resistividade elétrica (SENGUL, 2014).

Autores como, Charmchi (2015), Elkey e Sellevold (1995), Sengul (2014), Banea (2015) e Gans (2017) estudaram a influência da umidade na resistividade elétrica do concreto e cada um destes a avaliaram de diferentes formas.

Charmchi (2015) analisou os efeitos de diferentes teores de saturação na resistividade elétrica do concreto. A investigação experimental feita pelo autor seguiu da seguinte forma: As amostras foram colocadas em dois ambientes distintos, laboratório com temperatura média de 23 °C e em estufa mantida a 110 °C, ambos por 24 horas. Posteriormente, a porcentagem de saturação da amostra em relação a medição da resistividade foi calculada em 60 minutos, 90 minutos e 24 horas. A análise feita pelo referido autor mostrou que as amostras secas a 110 °C apresentou o maior aumento na leitura de resistividade, comportamento atribuído ao fato que provavelmente as amostras acondicionadas em temperatura ambiente por 24 horas não estavam totalmente secas, possibilitando que quantidades mais altas de cargas ultrapassassem a rede de poros.

Elkey e Sellevold (1995) também seguiu procedimento parecido como Charmch (2015), no entanto, o método proposto pelos autores seguiu dois parâmetros diferentes: os espécimes foram acondicionados secando por etapas (secagem ao ar complementada por 50 °C em estufa) a partir de um estado saturado e umidificados novamente (em 0%, 3% ou 6% de NaCl) a partir de um estado seco a 50°C para tentar definir as bordas externas das curvas. A Figura 11 representa a tendência do comportamento evidenciado nos dois estudos, onde verifica-se um decréscimo na resistividade com o aumento do percentual de saturação das amostras.

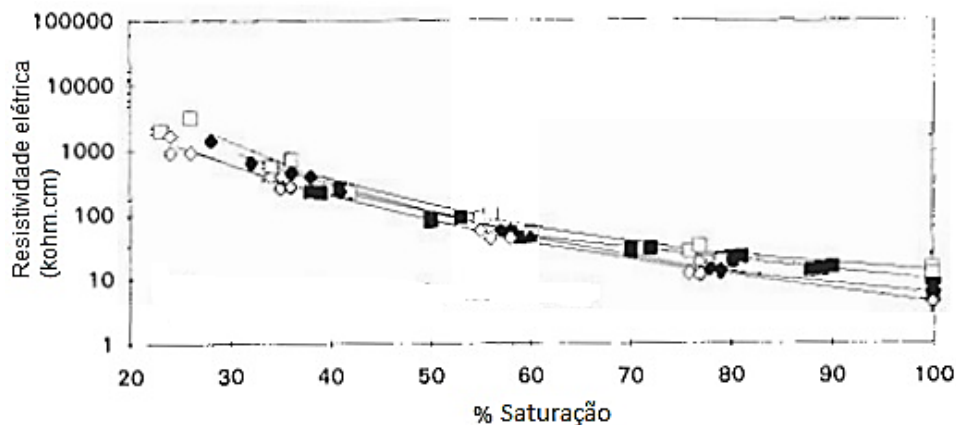


Figura 11 Variação da resistividade elétrica em relação ao grau de saturação (Fonte: ELKEY; SELLEVOLD, 1995)

Já Sengul (2014) avaliou a resistividade elétrica do concreto em três diferentes condições de umidade: Saturada superfície seca, seco ao ar e seco em estufa. As condições foram conseguidas limpando superficialmente o concreto; colocando os espécimes em ambiente de laboratório por dois dias, a uma temperatura de 20 °C e 65% de umidade relativa (seco ao ar) e colocando em estufa até constância de massa (seco em estufa – o autor não informa a temperatura). Os resultados apresentados indicaram o aumento de 50% e 75% nas resistividades do concreto seco ao ar e em estufa, respectivamente, em relação ao saturado. A Figura 12 mostra o alcance registrado.

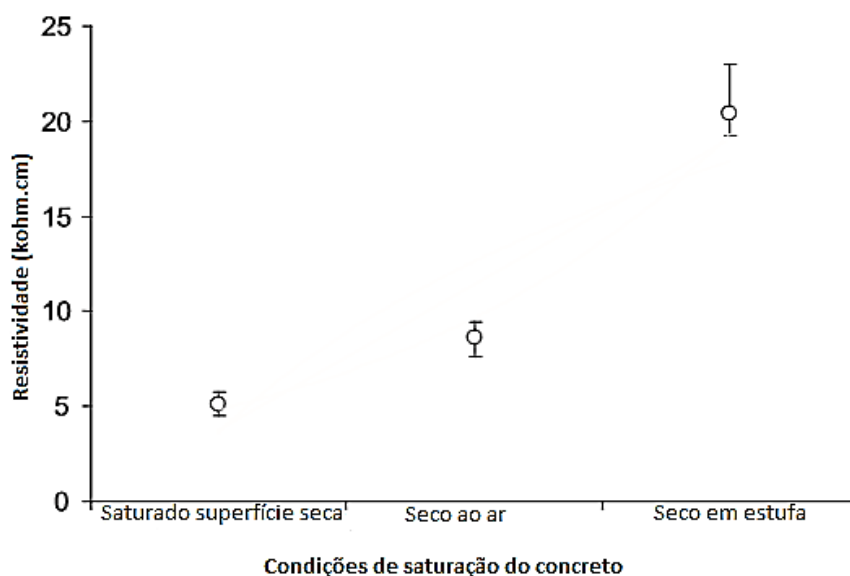


Figura 12 Relação entre condições de umidade e resistividade elétrica do concreto (Fonte: SENGUL, 2014)

Por fim, Banea (2015) e Gans (2017) avaliaram o efeito da umidade na resistividade elétrica por meio de ciclos molhagem e secagem. Banea (2015) dividiu a etapa experimental do ciclo de molhagem-secagem do seu estudo da seguinte forma (Tabela 4):

Tabela 4 Ciclo de molhagem-secagem estabelecido por Banea (2015)

Etapa	Ciclo	Procedimento
I)	Molhagem	Foi realizada a imersão total dos espécimes em água durante 8 dias, sendo que foram realizadas medições desde $t=0$, que representa o tempo de submersão anterior, até o 8º dia, durante os quais resistências elétricas e consumo de massa foram medidos ao longo desse tempo;
II)	Saturação à vácuo	Do 8º ao 13º dia os espécimes foram submetidos a uma saturação a vácuo, seguindo as recomendações do RILEM CPC 11.3, com medições efetuadas no 13º dia;
III)	Molhagem	Os espécimes foram submetidos a uma semana extra de umedecimento normal, com outra sequência de medição, que correspondeu ao 22º dia;
IV)	Secagem	Os espécimes foram retirados da água e armazenados em câmara climatizada em 20 °C e 80% U.R. (umidade relativa) para fase de secagem. Durante esta exposição, os seus parâmetros foram medidos 4 vezes durante um período de 2 meses.

Neste estudo, a resistividade elétrica do concreto em ciclos de molhagem e secagem foi afetada principalmente pela maior absorção de água devido à influência dos concretos que já estavam carbonatados, pela composição do cimento utilizado e, evidentemente, pela relação água/cimento. Os espécimes que possuíam maior relação a/c geraram uma maior absorção de água pois obtinham poros de diâmetros maiores (BANEIA, 2015).

Já Gans (2017) avaliou a resistividade dos concretos perante cinco condições de agressividade, e adotou ciclos molhagem e secagem de 7 dias, que foram divididos em 4 dias de secagem ao ar e 3 dias de imersão em solução (água, cloreto, sulfatos ou ambos). Os resultados apresentados indicaram maiores resistividades em concretos expostos aos ciclos de molhagem e secagem em água. A autora atribui esse fator a uma provável lixiviação das amostras expostas nestes ciclos, aos 189 dias os resultados chegaram a ser 4 vezes maiores que aos 28 dias.

A avaliação do teor de umidade como forma de simulação da exposição do concreto quanto à ocorrência de chuvas e alta umidade relativa do ar que umidificam seus poros, e períodos de secagem que ocasionam a penetração de oxigênio ao seu interior, estimulam

o processo corrosivo e constituem situações que ocorrem ocasionalmente no ambiente, sendo fundamentalmente importante na investigação da resistividade elétrica. Conforme Sengul (2014), para fins de controle de qualidade, é muito importante garantir a mesma condição de umidade, além da mesma temperatura, em diferentes tipos de misturas.

2.2.3 Exposição à agentes agressivos

A exposição do concreto à agentes agressivos como íons cloretos, sulfatos ou a combinação desses, entram na lista de fatores que podem influenciar nos resultados de resistividade elétrica. Para avaliação desses efeitos, pesquisadores propuseram estudos sobre o tema.

Polder (2001) relatou que o efeito da penetração de cloretos na resistividade não é significativo, no entanto, para Sbartai *et al.* (2007), o aumento na concentração de cloreto em sua investigação experimental proporcionou uma redução na resistividade elétrica. Por exemplo, para uma das misturas, a resistividade elétrica diminuiu de 77 para 21 $\Omega.m$, à medida que o teor de cloreto aumentou de 0 para 30 g/L, ou seja, um decréscimo de 72%.

A redução da resistividade elétrica devido a umidade em meio a íons cloretos também se confirmou por Saleem *et al.* (1996). Conforme o referido autor, o aumento no teor de umidade atribuída a contaminação por cloretos, pode estar relacionada ao aumento da mobilidade iônica e condutividade da corrente elétrica que passa pelo interior do concreto.

Quanto às estruturas carbonatadas, Medeiros-Junior e Lima (2016) analisaram que concretos com maior relação *a/c* indicam redução na resistividade, porém, após longo período de análise (500 dias), as mesmas misturas favoreceram ao processo de carbonatação e resultaram numa maior resistividade elétrica. Isso também foi explicado por Santos (2006), em que a autora mostrou que quando o concreto carbonata ocorre a redução da concentração de substâncias nos poros, sem eletrólito, não há meios de fluxo elétrico, o que pode gerar aumento na resistividade.

Em síntese, os íons cloreto diminuem a resistividade, enquanto a carbonatação provoca um aumento da resistência elétrica do concreto. A penetração de agentes agressivos devido às mudanças de umidade, além da carbonatação, ocorre principalmente na cobertura do concreto. E por consequência, a resistividade do concreto é suscetível a

mudanças pelo seu interior, ao longo da profundidade de cobertura, o que pode ser consideravelmente diferente da resistividade na profundidade da armadura (HORNBOSTEL *et al.*, 2013).

2.2.4 Presença de fissuras

A resistividade elétrica dos concretos também pode ser influenciada pela presença de fissuras na microestrutura do concreto. Conforme Layssi *et al.* (2015), a estrutura dos poros no interior do concreto pode ser alterada com o surgimento de trincas e fissuras nos mesmos, ocasionando uma possível alteração em suas propriedades. Dessa forma, foi verificado que o ensaio de resistividade elétrica, além de identificar a possibilidade de corrosão nas estruturas, pode ser utilizado para detectar e monitorar a propagação de fissuras no interior do concreto.

Ranade *et al.* (2014), por exemplo, investigaram o desenvolvimento de microfissuras em materiais compósitos sob ensaio de resistência à tração e sua influência na resistividade elétrica, em termos de relação resistividade x deformação. E observou que, quanto ao padrão das fissuras, devido à largura e número de fissuras, há um efeito significativo no comportamento elétrico. Com este estudo concluiu-se que as resistividades mais baixas ficaram por conta do compósito que apresentou fissuras com largura média maior, embora houvesse uma quantidade menor de fissuras em uma determinada tensão.

Para Vesely *et al.* (2015), as larguras das fissuras também afetaram bastante os valores de resistividade. Em seu estudo, analisou-se que as fissuras mais abertas presentes no concreto aumentavam a carga elétrica passada por elas. Outro fator observado foi que houveram altas variações de resistividade ao longo da mesma amostra (utilizando-se a sonda Wenner) em diferentes ciclos de carregamento, essas variações podem ser atribuídas à heterogeneidade do concreto investigado e às alterações no teor de umidade em locais específicos. Esta observação é importante quando se avalia que o processo de fissuração está relacionado diretamente com a entrada de agentes agressivos.

Visto que a profundidade de fissuras é um dado importante para avaliação da condição de estruturas já existentes. Lataste *et al.* (2003) realizaram uma modelagem da condução elétrica do concreto, que relaciona a resistividade elétrica (em corrente perpendicular e paralela) e a profundidade de fissuras presentes. Esta relação pode ser observada na Figura 13. A seta dupla indica a direção de aplicação da corrente elétrica pelos eletrodos.

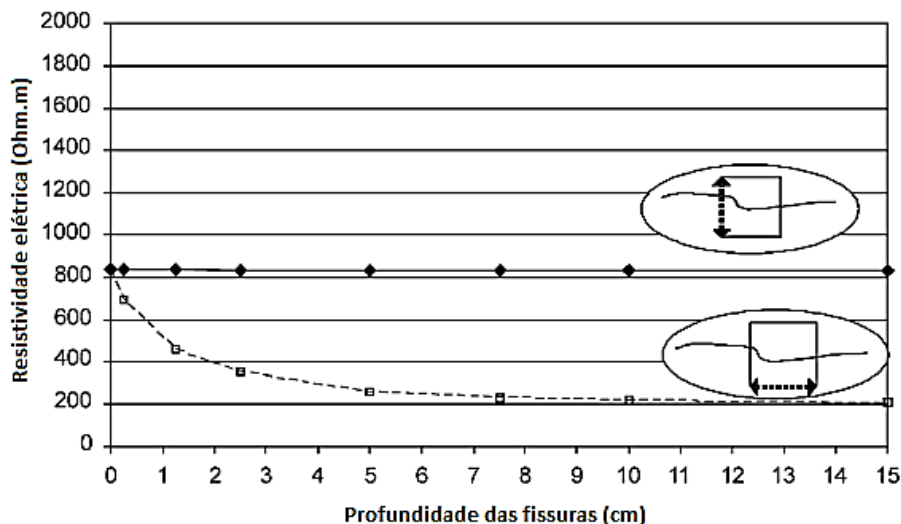


Figura 13 Resistividade elétrica em função da profundidade da fissura (Fonte: LATASTE *et al.*, 2003)

Lataste *et al.* (2003) explicam através do esboço apresentado (Figura 13) que em concretos condutores (saturados em água), o sentido da aplicação da corrente modifica a resistividade obtida em função da profundidade de fissuras. A modelagem apresentada pelos autores mostrou que quando há aplicação perpendicular da sonda à superfície fissurada, a resistividade elétrica obtida é constante. Quando aplicada paralelamente à fissura, a resistividade elétrica diminui consideravelmente com o aumento da sua profundidade. O resultado apresentado recomenda a utilização de ambas configurações do equipamento (no caso da sonda Wenner) para um diagnóstico mais preciso. Importante ressaltar que as medições foram realizadas em uma viga de concreto ($3 \times 0,23 \times 0,15 \text{ m}^3$).

Diante dos estudos apresentados verifica-se que a resistividade elétrica pode ser uma importante ferramenta de verificação dos danos que às fissuras podem causar aos concretos.

2.3 MÉTODOS PARA MEDIDA DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A resistividade elétrica é geralmente medida através da diferença de potencial gerada pela corrente elétrica e aplicada por intermédio de eletrodos que são posicionados sobre a superfície do concreto.

Porém, com ensaios realizados de forma não destrutiva, a propriedade pode ser mensurada por diferentes métodos, que englobam: o método volumétrico (preconizado

pela NBR 9204:2012), do disco, dos dois eletrodos, direto e dos quatro pontos, esses dois últimos possuem normas internacionais e são os mais utilizados. Nesta seção serão feitas abordagens sobre os mesmos.

2.3.1 Método da resistividade volumétrica (NBR 9204)

A NBR 9204 (ABNT, 2012) descreve o procedimento de medida da resistividade elétrica volumétrica do concreto. O método é chamado como volumétrico pois representa a resistividade das camadas mais internas das amostras de concreto analisada, de fato onde a umidade pode ser mais estável. É a única norma brasileira para medidas de resistividade.

O método se aplica apenas em laboratórios e faz uso de dois eletrodos de mercúrio que são posicionados nas extremidades do corpo de prova. Tais amostras deverão ser cilíndricas, em dimensões de aproximadamente 150 mm de diâmetro e 150 mm de altura. Aplica-se então uma tensão de $50 \pm 0,5$ V entre os dois eletrodos. Haverá um terceiro eletrodo, também de mercúrio, na face superior da amostra para evitar erros devido à superfície (NBR 9204, 2012; SILVA, 2006).

Para que a resistividade seja mensurada deve ser utilizada a Equação 2. Antes é necessário fazer leitura da corrente elétrica gerada após a aplicação da tensão.

$$\rho = \frac{V \cdot A}{I \cdot h} \quad (2)$$

Onde: ρ é a resistividade elétrica volumétrica; ($\Omega \cdot \text{cm}$); V é a tensão aplicada (V); A é a área do eletrodo principal (m^2); I é a corrente elétrica (A); H é a altura do corpo de prova (m).

No entanto, a montagem do eletrodo com mercúrio é o aspecto negativo e a dificuldade desse tipo de ensaio, além do mais, a utilização do mercúrio não é indicada devido aos riscos ambientais e à saúde humana que o elemento proporciona.

Em acordo firmado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), em 2013, foi determinado a extinção do uso de Mercúrio (Hg). A previsão é que ele deixe de ser utilizado nos setores de saúde, energia e construção civil até o final desta década. A Convenção de Minatama sobre redução do mercúrio entrou em vigor em agosto de 2017 e no Brasil promulgada em 2018 (ALMEIDA, 2013; WWWF-BRASIL, 2018).

2.3.2 Método do disco

Este método envolve apenas um eletrodo externo, ou seja, um pequeno disco colocado na superfície de concreto acima de uma armadura. A resistência do concreto é medida entre o disco e a armadura, que serve como um segundo eletrodo (Figura 14). Essa resistência pode ser convertida em resistividade usando uma constante de célula que depende da profundidade da cobertura (que varia ao longo da superfície) e do diâmetro da armadura (AZARSA; GUPTA, 2017; POLDER, 2001).

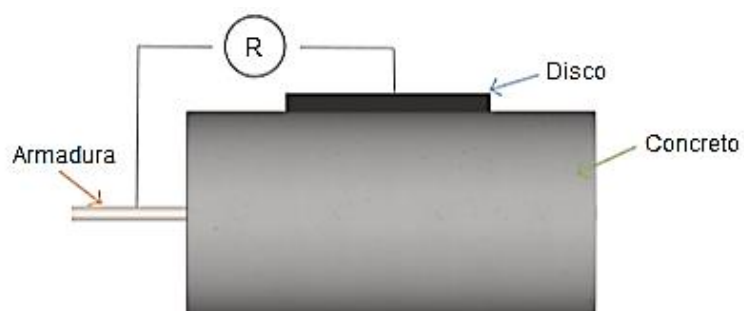


Figura 14 Representação gráfica do método do disco (Fonte: AZARSA; GUPTA, 2017)

Devido a uma certa inexatidão da previsão do fluxo de corrente, a constante de célula pode ser determinada empiricamente ou ser estimada. Polder (2001) estima que para profundidades de cobertura, diâmetros de disco e barra de 10 a 50 mm, a constante de célula é de aproximadamente 0,1 m. Assim, a resistividade medida usando um eletrodo de disco (pequeno) pode ser dada pela Equação 3:

$$\rho(\text{disc}) = 0.1 * R(\text{disc} - \text{bar}) \quad (3)$$

Onde: $\rho_{(\text{disc})}$ é a resistividade elétrica ($\Omega \cdot \text{m}$); $R_{(\text{disc-bar})}$ é a tensão aplicada entre o disco e a barra de aço (V).

2.3.3 Método dos dois eletrodos

Este método mostra ser aparentemente um processo simples, pois a resistividade é medida com a utilização de dois eletrodos sobre a superfície do concreto e com a aplicação da corrente elétrica, a diferença de potencial é gerada.

No entanto, na prática, é um método menos preciso e mal reproduzível. Polder (2001) analisou que neste ensaio o tamanho dos eletrodos tem um efeito importante no valor

medido. Para Millard (1991), quando a área de contato entre os eletrodos e o concreto diminui, a resistividade elétrica medida aumenta rapidamente. Fazendo com que esse método não seja muito recomendado.

2.3.4 Método direto ou resistividade volumétrica

Este método consiste na aplicação de um campo elétrico uniforme por meio de dois eletrodos (duas folhas de metal) e duas esponjas úmidas, de mesma dimensão dos eletrodos, em contato com as bases do corpo de prova (Figura 15). O contato com as esponjas serve para garantia da conexão elétrica. Os corpos de prova utilizados podem ser prismáticos ou cilíndricos, com bases planas. E, um resistivímetro será utilizado para aplicação da corrente (AZARSA; GUPTA, 2017; LAYSSI *et al.*, 2015; PÉREZ, 2014; UNE 83988-1, 2008).

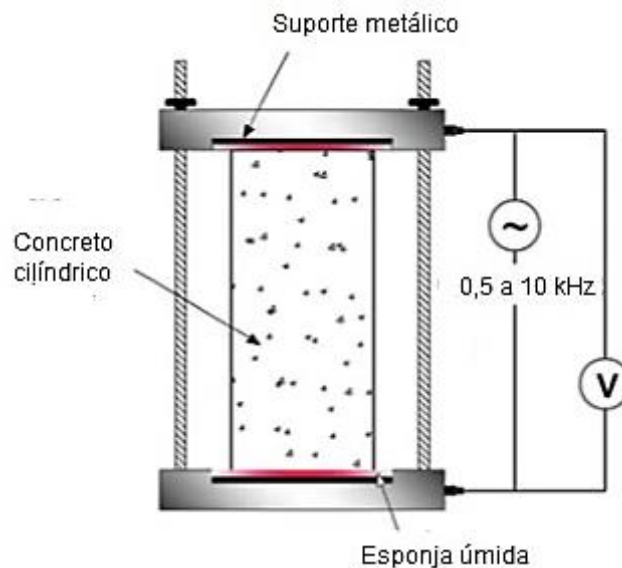


Figura 15 Representação gráfica do método direto (Fonte: LAYSSI *et al.*, 2015)

Conforme Pérez (2014), para obtenção da resistividade elétrica por este método, primeiramente, através da Lei de Ohm, calcula-se a resistência elétrica do concreto por meio da Equação 4:

$$R_e = R_{e+sp} - R_{sp} \quad (4)$$

Onde: R_e é a resistência elétrica do concreto (Ω); R_{e+sp} é a resistência elétrica do concreto em conjunto com a esponja (Ω); R_{sp} é a resistência elétrica da esponja (Ω).

Posteriormente, calcula-se a constante de célula “k” pela Equação 5:

$$k = \frac{S}{L} \quad (5)$$

Onde: S é a área da seção transversal perpendicular à corrente (m^2); L é a altura do corpo de prova (m).

E por fim, a resistividade elétrica é obtida pelo método direto através da Equação 6:

$$\rho_e = k \cdot R_e \quad (6)$$

Onde: ρ_e é a resistividade elétrica do concreto ($\Omega \cdot m$); k é a constante de célula obtida (m); e, R_e é a resistência elétrica calculada (Ω).

2.3.5 Método dos quatro pontos ou método de Wenner

Entre as técnicas para determinação da resistividade elétrica superficial do concreto, o método dos quatro pontos é comumente utilizado. Esse método foi desenvolvido por Wenner em 1916 para mensurar resistividades de solo e atualmente encontra-se difundido no meio da avaliação de resistividade de concretos.

O método de Wenner, como chamado, pode ser aplicado tanto em laboratório quanto em campo. Dispõe de um equipamento que é comercialmente disponível e simples de utilizar (a sonda Wenner). As medidas são obtidas pelo contato dos quatro eletrodos equidistantes linearmente na superfície do concreto, como pode ser observado na Figura 16 (MEDEIROS-JUNIOR; LIMA, 2016; SBARTAĬ *et al.*, 2007).

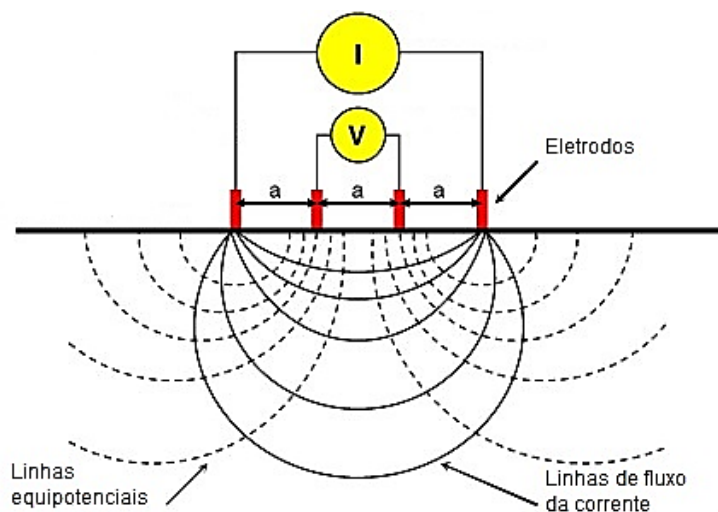


Figura 16 Representação gráfica do método dos quatro pontos (Fonte: SBARTAĬ *et al.*, 2007)

O ensaio é realizado aplicando-se uma corrente elétrica de baixa frequência (I) através dos eletrodos externos, os quais induzem a corrente. A diferença de potencial (V) é medida entre os eletrodos internos, a relação entre diferença de potencial e a corrente permite que se calcule a resistividade elétrica (ρ) de acordo com a teoria de Ohm em meio finito (considera-se a distância entre os eletrodos) representada pela Equação 7 (POLDER, 2001; SBARTAÏ *et al.*, 2007; UNE 83988-2, 2014).

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (7)$$

Onde: ρ é a resistividade elétrica ($\Omega \cdot \text{cm}$); V é a diferença de potencial elétrico (V); I é a corrente elétrica (A); a é o espaçamento entre os eletrodos (m).

As medições efetuadas pelo equipamento de sonda Wenner mostraram boas correlações com outros ensaios de resistividade elétrica e mostraram ser efetivos ao serem correlacionados com os ensaios de exposição à cloretos pela ASTM C 1556, feitos em concretos produzidos em amostras cilíndricas (AASHTO TP 95, 2015).

No entanto, é preciso tomar alguns cuidados durante o ensaio de resistividade elétrica pela sonda Wenner, pois caso contrário, erros significativos podem ser vistos nas leituras obtidas. Segundo Gowers e Millard (1999), os principais erros comumente identificados podem ser devido a: influência da geometria da amostra de concreto, não homogeneidade do concreto, configuração e espaçamento entre eletrodos, contato superficial deficiente, camadas superficiais de diferentes resistividades, presença da armadura e mudanças nas condições ambientais. Alguns desses pontos foram analisados detalhadamente neste trabalho.

As medições feitas pelo método Wenner são sensíveis às condições da superfície. Por isso, para melhor confiabilidade nos resultados, deverão ser realizadas várias medidas ao redor da amostra (LAYSSI *et al.*, 2015). De acordo com a UNE 83988-2 (2014), pelo menos três leituras em eixos espaçados a 120° entre si.

2.3.6 Geometria da amostra e espaçamento entre os eletrodos

A geometria da amostra pode influenciar diretamente nos resultados de resistividade dos concretos. É necessário compreender que diferenças significativas nos dados de

resistividade elétrica podem ser obtidas devido às diferenças existentes no formato geométrico e pelo espaçamento dos eletrodos posicionados na superfície (GHOSH; TRAN, 2015; GOWERS; MILLARD, 1999; SENGUL, 2014). Dessa forma, ao utilizar o Método dos Quatro Pontos, a configuração dos eletrodos, bem como a distância ‘a’ correspondente ao seu espaçamento é um importante dado a ser considerado na verificação dos resultados.

A abordagem feita por Morris *et al.* (1996) determinaram uma correção geométrica que estabelece relação entre configuração e espaçamento entre as sondas e o formato da amostra (largura e diâmetro). Ao correlacionar essas medidas há um direcionamento ao Fator de Célula (K) – ver Figura 17.

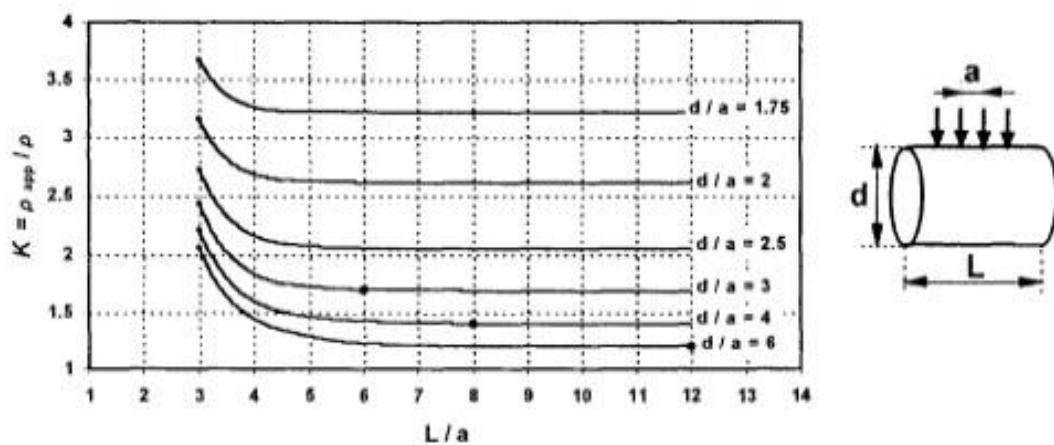


Figura 17 Correlação entre configuração, distância entre sondas e geometria (Fonte: MORRIS *et al.*, 1996)

E então por este parâmetro a resistividade elétrica é corrigida de acordo com a Equação 8:

$$\rho_{\text{real}} = \frac{\rho_{\text{app}}}{K} \quad (8)$$

Onde: ρ_{real} é a resistividade real da amostra ($\Omega \cdot \text{m}$); ρ_{app} é a resistividade aparente medida no corpo de prova ($\Omega \cdot \text{m}$); K é a constante de célula aplicada conforme geometria.

As simulações desenvolvidas por Morris *et al.* (1996) mostraram uma variabilidade moderada dos efeitos dos parâmetros analisados. Portanto, múltiplas leituras devem ser conduzidas para obter uma estimativa de resistividade mais confiável.

Chen, Chang e Yeih (2014) estabeleceram comparativo entre a resistividade medida e a resistividade calculada com os diferentes espaçamentos de sondas e seus respectivos “Fator K”, conforme dimensões exibidas na Figura 18. Os resultados são mostrados na Figura 18 – (considerar: ρ_{app} – resistividade elétrica aparente; ρ_{real} – resistividade elétrica real).

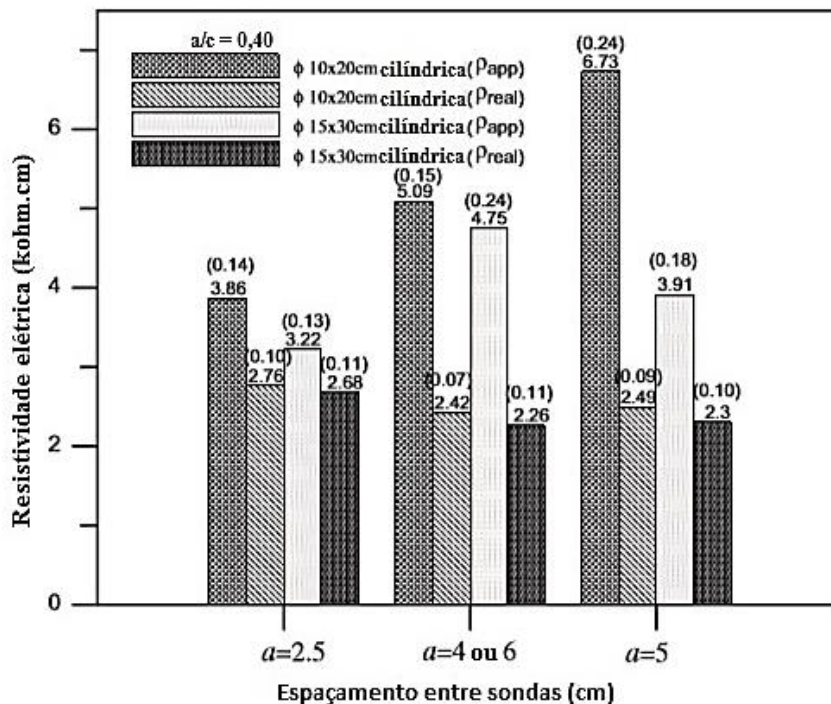


Figura 18 Resistividade elétrica dos concretos antes e depois da correção geométrica (Fonte: CHEN; CHANG; YEIH, 2014)

Ao comparar todas as amostras acima percebe-se a influência do tamanho do espécime nos resultados. Há uma variabilidade (aproximadamente 17% a 63%) na resistividade medida em relação ao tamanho, mesmo que em iguais condições (mistura e espaçamento entre sondas). No entanto, pode ser observado que ao calcular a resistividade real da amostra obteve-se uma maior semelhança entre os resultados, mesmo em espécimes com diferentes tamanhos e distância ‘a’. As resistividades reais obtiveram uma média de 2,5 k Ω .cm, com diferenças inferiores a 0,5 k Ω .cm. Conforme Chen, Chang e Yeih (2014), estes resultados sugerem que uma resistividade confiável pode ser obtida pela introdução do fator de correção. Estudos como os de Azarsa e Gupta (2017) e Ghosh e Tran (2015) confirmaram essa relação.

Por conseguinte, a norma europeia UNE 83988-2 (AENOR, 2014) confirmou a necessidade de ser levada em conta a geometria da amostra e a configuração dos eletrodos em ensaios de resistividade para espécimes com dimensões finitas, considerando a possibilidade de minimizar possíveis erros nos resultados obtidos. Com adaptações das simulações feitas por Morris *et al.* (1996) e através de investigações experimentais, a norma indica a aplicação de um “Fator de Forma” (Tabela 5).

Tabela 5 Fator de forma para diferentes amostras e espaçamento entre pontos pela UNE 83988-2

Geometria da amostra	Tamanho	d = 0,035 m	d = 0,050 m
Cilíndrica	300 x 150 mm	0,714	0,606
	200 x 100 mm	0,571	0,377
	150 x 75 mm	0,384	
Prismática	40 x 40 x 160 mm	0,172	

Fonte: Adaptado de UNE 83988-2 (AENOR, 2014).

Assim, conforme a norma, haverá a correção do cálculo da resistividade elétrica de acordo com a Equação 9:

$$\rho_{\text{amostra}} = \rho_w \cdot F_f \quad (9)$$

Onde: ρ_{amostra} é a resistividade real da amostra, em $\Omega \cdot \text{m}$; ρ_w é a resistividade do concreto, em $\Omega \cdot \text{m}$, através da resistência elétrica medida; F_f é o fator de forma aplicado conforme geometria da amostra.

A atualização do fator geométrico proposto pela norma tem sido seguida por diversos autores (GANS, 2017; GODINHO *et al.*, 2018; MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2018; MENDES *et al.*, 2018; REAL, 2015) que demonstram viabilidade no seu emprego. De todo modo, os valores se igualam quando se verifica que o “Fator de Forma” (Tabela 5) corresponde ao inverso da constante K (Figura 17) entre os espécimes que estão em comum com os dois métodos.

2.3.7 Comparação entre os métodos de ensaio

Os diferentes métodos de medida de resistividade elétrica existentes podem proporcionar algumas alterações nos resultados obtidos, portanto, é viável que se avalie a resistividade por mais de um destes parâmetros. Na literatura, as aplicações mais observadas são pelo método dos quatro pontos, também chamado de resistividade superficial, e método direto, também designado como resistividade volumétrica.

Ao estabelecer a comparação entre resistividade elétrica pelo método volumétrico (direto) e pelo método superficial (quatro pontos), Costa e Azzi (2017) mostraram que as resistividades nos dois métodos cresceram na mesma proporção (Figura 19), sendo que os valores encontrados pela resistividade superficial foram em torno de 50% maior que os obtidos pelo volumétrico. Notou-se, também, durante os 3 primeiros dias de idade, que o valor de resistividade elétrica correspondeu a aproximadamente 20% do valor final em ambos os casos.

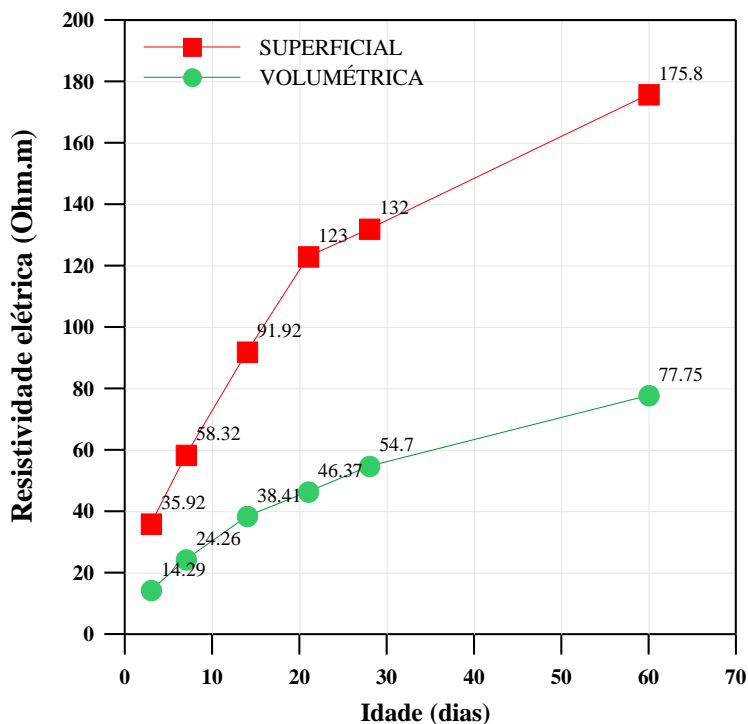


Figura 19 Comparação entre os métodos de medida (Fonte: Adaptado de COSTA; AZZI, 2017)

Os resultados experimentais apresentados por Gudimettla e Crawford (2014) mostraram uma relação ainda melhor. Os valores obtidos pela resistividade superficial foram apenas 1,9 vezes maiores que os resultados de resistividade volumétrica. A correlação entre os dois métodos indica não haver muitas diferenças entre um método e o outro. O comparativo entre as medidas, efetuadas aos 28 dias, é exibido na Figura 20.

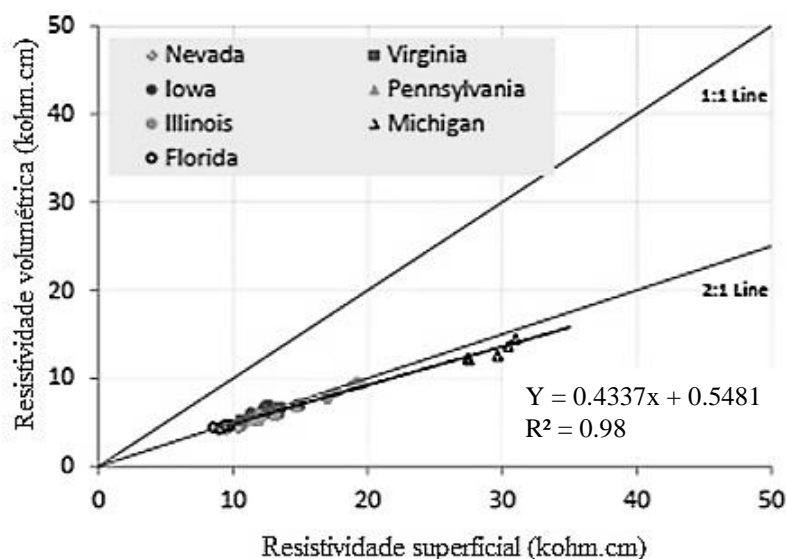


Figura 20 Comparação entre métodos de medida (Fonte: Adaptado de GUDIMETTLA; CRAWFORD, 2014)

Em síntese, a tendência linear entre resistividade superficial e volumétrica apontados por diferentes autores pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 Coeficiente de determinação (R^2) do comparativo entre métodos de resistividade direta e quatro pontos

Referências	Coeficiente de determinação (R^2)
Sengul e Gjorv (2008)	0,99
Sengul e Gjorv (2009)	0,99
Spratt <i>et al.</i> (2011)	0,9986
Ghosh e Tran (2015)	0,82-0,95
Gudimettla e Crawford (2016)	0,98
Azarsa e Gupta (2016)	0,979

Fonte: AZARSA; GUPTA (2017).

É possível perceber a existência de uma forte relação entre a resistividade medida pelos ensaios realizados através desses dois métodos nos diversos estudos encontrados na literatura. A explicação se dá através do modo que a corrente elétrica flui de maneira diferente nessas duas técnicas e para os tipos de propriedades elétricas que podem ocorrer devido a umidade, alterações químicas e gradientes iônicos (AZARSA; GUPTA, 2017).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desenvolvido teve por objetivo avaliar a resistividade do concreto em relação ao teor de brita, tipo de cimento e relação água/cimento. Além disso, verificou-se, também, a resistividade elétrica em função do teor de umidade, dimensão da amostra e níveis de fissuração do concreto. Visando correlacionar resistividade elétrica com propriedades mecânicas e físicas do concreto, foram realizados, também, ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade.

3.1 VARIÁVEIS DO ESTUDO

Em vista dos fatores avaliados, primeiramente foram delimitadas as variáveis do estudo:

- **Variáveis independentes:** Responsáveis pelas modificações nas propriedades.

Fator água/cimento (0,50; 0,55; 0,60);

Tipos de cimento (CPII-F32, CPII-Z32 e CPV-ARI);

Teores de agregados graúdos (40%, 43% e 46%);

Dimensão da amostra (100 mm x 200 mm; 100 mm x 100 mm e 100 mm x 50 mm);

Teor de umidade (de seco em estufa à imersão em água por 72 horas);

Idades conforme especificada para cada ensaio.

- **Variáveis dependentes:** Responsáveis pela resposta – ensaios que serão realizados.

Resistência à compressão axial (28 dias);

Absorção de água por capilaridade (28 dias);

Módulo de elasticidade (28 dias);

Resistividade elétrica pelo Método Direto (28 e 56 dias);

Ensaio de fissuração dos concretos (28 dias).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1 Cimento

Para produção dos concretos foram utilizados três tipos de cimento: CPII-F32, CPV-ARI e CPII-Z32. O cimento CPV-ARI e CPII-F32 foram selecionados pela possibilidade de

menor influência de adições minerais nos ensaios. Além disso, o cimento Portland CII-F32 é um dos mais facilmente encontrados na região onde a pesquisa está sendo desenvolvida. E por fim, optou-se pelo cimento CII-Z32 para análise de um cimento com presença de material pozzolânico em sua composição, mesmo que em pequeno teor, na resistividade dos concretos. A Tabela 7 apresenta a caracterização dos três tipos de cimento de acordo com os limites da normativa vigente.

Tabela 7 Ensaios de caracterização do cimento

Propriedades avaliadas	CII-F32	CII-Z32	Limites NBR 11578 (ABNT, 1997)	CPV-ARI	Limites NBR 11578 (ABNT, 1997)
Resistência à compressão - 1 dia*	-	-	-	26,1	≥10
Resistência à compressão - 3 dias*	27,9	22,6	≥10	37,2	≥24
Resistência à compressão - 7 dias*	31,1	26,2	≥20	41,8	≥34
Resistência à compressão - 28 dias*	35,7	35,5	≥32	-	-
Massa específica (g/cm ³)	3,02	2,94	-	3,09	-
Índice de finura	1,9	2,7	<12	0,7	<6
Início de pega*	3h10min	3h00min	≥1h	3h00min	≥1h
Fim de pega*	4h10min	3h55min	≤10h	4h10min	≤10h

* Resultados fornecidos pelo fabricante

3.2.2 Agregado miúdo

Para a produção dos concretos foi utilizado como agregado miúdo uma areia média de origem quartzosa, extraída do rico e seca ao ar proveniente do município de Feira de Santana. Sua caracterização encontra-se na Tabela 8, conforme cada propriedade específica, e avaliada conforme requisitos propostos pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 8 Caracterização da areia utilizada

Propriedade avaliada	Resultado	Normas	
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	
Módulo de finura	2,59	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	
Massa específica (g/cm ³)	Aparente	2,57	
	SSS	2,59	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
	Seco	2,61	
Absorção de água (%)	0,50%	NBR NM 30 (ABNT, 2001)	
Material pulverulento (%)	3	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	
Impurezas orgânicas	Mais clara que a solução padrão	NBR NM 49 (ABNT, 2001)	

A composição granulométrica do agregado miúdo foi determinada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003a). E conforme distribuição granulométrica recomendada pela NBR 7211 (ABNT, 2009) e os limites de zona ótima e utilizável, a areia empregada está enquadrada na zona utilizável indicada pela norma e inteiramente dentro da zona ótima.

3.2.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo natural utilizado foi de origem granítica proveniente das jazidas do município de Conceição do Jacuípe-BA. A caracterização do agregado graúdo é apresentada na Tabela 9:

Tabela 9 Caracterização do agregado graúdo utilizado

Propriedade avaliada	Resultado	Normas	
Dimensão máxima característica (mm)	19	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	
Módulo de finura	6,68	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	
Massa específica (g/cm ³)	Aparente	2,79	
	SSS	2,77	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
	Seco	2,76	
Absorção de água (%)	0,40%	NBR NM 30 (ABNT, 2001)	
Material pulverulento (%)	0,2	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	
Massa unitária (kg/dm ³)	1,5	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	
Índice de forma	2,6	NBR 7809 (ABNT, 2008)	
Abrasão Los Angeles (%)	39,4	NBR NM 51 (ABNT, 2001)	

A composição granulométrica do agregado graúdo natural determinada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003a) obteve uma dimensão máxima característica de 19 mm.

3.2.4 Água

A água utilizada para produção dos concretos foi proveniente da rede de abastecimento da Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS.

3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Para produzir os concretos utilizou-se um traço 1:2,18:2,84:0,55 (cimento: areia: brita: água), obtido através do método de dosagem ACI/ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, com slump de 100 ± 20 mm e resistência à compressão, aos 28 dias de 25 MPa.

A partir desta mistura, que tem a nomenclatura de CPIIF55_43%, em que CPIIF significa o tipo de cimento, 55 a relação água/cimento e 43% o percentual de brita, foram produzidas mais seis, totalizando sete concretos. Dois para avaliar a influência do tipo de cimento (CPII-Z e CPV-ARI), dois para avaliar a influência da relação água/cimento (0,50 e 0,60) e dois para avaliar a influência do teor de brita (40% e 46%), na resistividade elétrica. Na Tabela 10 estão especificadas as nomenclaturas utilizadas neste trabalho, para os sete concretos produzidos.

Tabela 10 Nomenclatura das misturas e divisão por análise

Tipo de cimento	Relação água/cimento	Teor de agregado
CPIIF55_43%	CPIIF50_43%	CPIIF55_43%
CPV55_43%	CPIIF55_43%	CPIIF55_46%*
CPIIZ55_43%	CPIIF60_43%	CPIIF55_40%*

*Volume final de agregado graúdo referente às alterações de brita no traço unitário

E a Tabela 11 apresenta os traços unitários utilizados, o consumo de cimento para 1m^3 de concreto e o abatimento (mm) das misturas estudadas.

Tabela 11 Traço unitário, consumo de cimento e abatimento dos concretos produzidos

Mistura	Traço unitário (cimento:areia:brita:água)	Consumo de cimento (m^3)	Abatimento (mm)
CPIIF55_43%	1: 2,18: 2,84: 0,55	364	120
CPV55_43%	1: 2,18: 2,84: 0,55	365	120
CPIIZ55_43%	1: 2,18: 2,84: 0,55	362	110
CPIIF50_43%	1: 2,18: 2,84: 0,50	371	60
CPIIF60_43%	1: 2,18: 2,84: 0,60	358	200
CPIIF55_46%	1: 2,18: 3,24: 0,55	351	80
CPIIF55_40%	1: 2,18: 2,46: 0,55	378	150

Os concretos foram produzidos conforme metodologia utilizada por Silva (2014) baseado no método de Filho Figueirêdo (2011), onde com a utilização de uma betoneira com capacidade de 245l, foi seguida a seguinte ordem de mistura:

1^a) imprimação da betoneira com uma dosagem de concreto de 1:2:3:0,65 (cimento: areia: brita: água). Após imprimação, o material excedente caiu livremente com o misturador em movimento;

2^a) lançamento de 100% do agregado graúdo;

3^a) adição de 50% da água ao agregado graúdo, seguido de 20 segundos de mistura;

4^a) lançamento de 100% do cimento, adição de 20% da água, seguido de 2 minutos de mistura;

5^a) lançamento de 100% do agregado miúdo, seguido de toda a água restante (30% que faltavam);

6^a) após lançamento de todos os componentes de mistura, o misturador ficou em movimento durante 5 minutos.

Após a mistura, a consistência do concreto no estado fresco foi determinada pelo ensaio do abatimento do tronco de cone conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998). As moldagens dos concretos seguiram as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2015) para moldagem dos corpos de prova e cura. Foram moldados 100 corpos de prova cilíndricos (100 mm de diâmetro x 200 mm de altura) e os mesmos foram adensados com vibrador de imersão. Salienta-se que algumas amostras puderam ser reaproveitadas devido ao ensaio não destrutivo de resistividade elétrica.

Após 24 horas de moldagem, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e armazenados em câmara úmida até as idades estabelecidas de ensaio. A Figura 21 mostra a sequência feita nessa etapa experimental.



Figura 21 Produção dos concretos. a) Mistura dos componentes do concreto em betoneira, b) Ensaio de abatimento pelo tronco de cone, c) Corpos de prova moldados em forma cilíndrica 100 mm x 200 mm e d) Corpos de prova desmoldados após 24 horas

Os concretos foram caracterizados mecanicamente através dos ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade, aos 28 dias. Ensaio de absorção de água por imersão e por capilaridade, aos 28 dias, foram realizados para as misturas referentes a relação água/cimento e teor de agregado graúdo. E o ensaio de resistividade elétrica (R.E.) foi medido em quatro condições: (1) após 28 e 56 dias de cura dos concretos para todas as misturas; (2) variando o teor de umidade do concreto, aos 28 dias, para todas as misturas; (3) após estágios de fissuração do concreto, aos 28 dias. Esse ensaio foi feito, apenas, na mistura CPFII60_43%, em virtude da capacidade de carga da prensa de ensaios; (4) dimensão da amostra, aos 56 dias. Este ensaio foi feito, apenas, com as misturas CPIIF55_43%, CPIIF55_40% e CPIIF55_46%, em que há a variação do teor de agregados, visto que este parâmetro influencia diretamente na resistividade elétrica dos concretos. A Tabela 12 apresenta um resumo dos ensaios realizados em cada mistura.

Tabela 12 Ensaios realizados por mistura de concreto

Misturas	28 dias							56 dias	
	Resistência à compressão	Módulo de elasticidade	Abs. água por capilaridade	Abs. água por imersão	R.E. (após cura)	R.E. (teor de umidade)	R.E. (após fissuração)	R.E. (após cura)	R.E. (dimensão da amostra)
CPIIF50_43%	X	X	X	X	X	X		X	
CPIIF55_43%	X	X	X	X	X	X		X	X
CPIIF60_43%	X	X	X	X	X	X	X	X	
CPIIZ55_43%	X	X			X	X		X	
CPV55_43%	X	X			X	X		X	
CPIIF55_40%	X	X	X	X	X	X		X	X
CPIIF55_46%	X	X	X	X	X	X		X	X

3.4 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIO

3.4.1 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica do concreto foi mensurada pelo Método Direto. Além da medida da resistividade elétrica, partindo deste método foram efetuadas mais três análises correlatas: teor de umidade, dimensão da amostra e níveis de fissuração.

3.4.1.1 Ensaio de resistividade elétrica pelo método direto

O ensaio de resistividade elétrica foi realizado pelo Método Direto para todas as misturas produzidas no estudo. O mesmo seguiu as recomendações da norma espanhola UNE 83988-1 (AENOR, 2008). O aparato necessário para realização das medições da resistividade por este método, apresentado na Figura 22, foi elaborado pelos autores e por meio de parcerias com os laboratórios de Engenharia Civil e Engenharia da Computação da Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS.

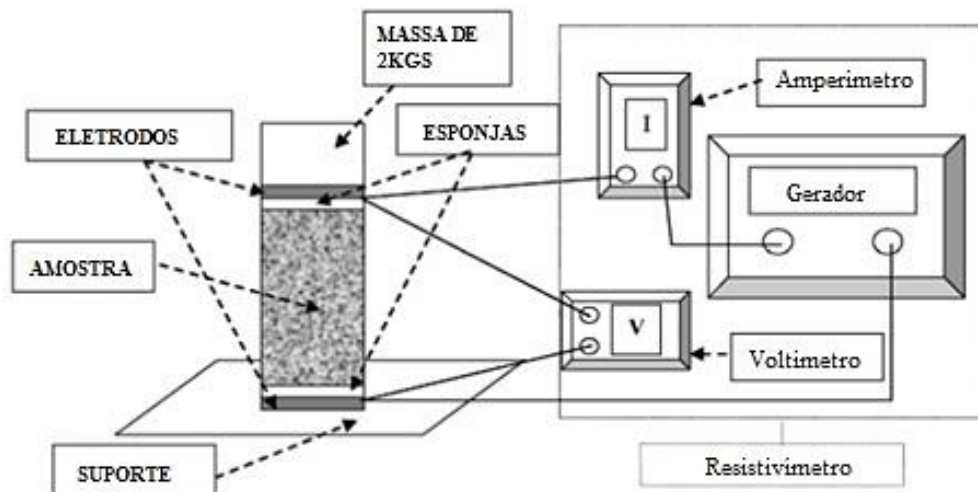


Figura 22 Equipamento utilizado para medição da resistividade pelo método direto (Fonte: Adaptado de UNE 83988-1, 2008)

Para montagem do equipamento, foi utilizada uma fonte de corrente alternada (AC) com uma frequência estabelecida entre 82 – 85 Hz. Utilizou-se também dois multímetros digitais, um para medição da corrente, outro para tensão. Os eletrodos foram compostos por duas chapas de cobre e por duas esponjas úmidas, que foram acoplados paralelamente ao corpo de prova. Ainda, para melhoria no contato com a superfície do concreto e passagem da corrente pelo mesmo, internamente, foi utilizado um peso de balança de 2 kg. Os detalhes do equipamento produzido neste estudo são mostrados na Figura 23.



Figura 23 Medida da resistividade elétrica. a) Equipamento confeccionado para medições da resistividade b) Corpo de prova no momento da medição da resistência

Para calibração do equipamento confeccionado utilizou-se o método superficial (Método de Wenner), exposto no item 2.3.5. Os ensaios foram realizados no laboratório de durabilidade da UFBA (LEDMa/UFBA). O equipamento utilizado foi a sonda Wenner (ver Figura 24) com espaçamento entre eletrodos de 50 mm.



Figura 24 Resistímetro - Método de Wenner (Fonte: PROCEQ SA, 2017)

Com a sonda Wenner, foram realizadas três leituras de resistividade elétrica para cada corpo de prova, em eixos espaçados a 120° entre si. Com os mesmos corpos de prova, foram feitas as leituras com o equipamento produzido pelo método direto.

Realizadas todas as leituras foi possível estabelecer uma correlação entre os dois métodos para validação do estudo. O valor da resistência elétrica das esponjas encontrado foi de $8,17 \Omega$ e foi medida no início do ensaio ajustando o equipamento utilizado, para que fossem descontadas quando medida a resistência do conjunto (concreto + esponjas). A constante de célula “k” (Equação 5) foi estabelecida entre 0,0395 a 0,0402 m, o que dependeu da largura (m) e área (m^2) de cada corpo de prova utilizado. A Figura 25 mostra a correlação encontrada.

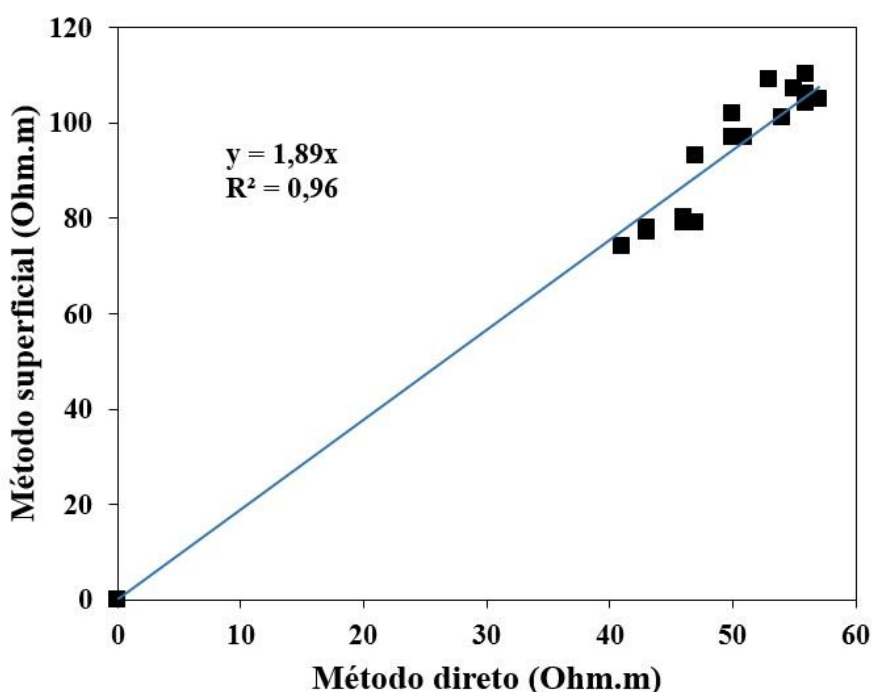


Figura 25 Relação entre método direto e superficial obtida pela calibração do equipamento

A relação linear exibida na Figura 25 condiz com a literatura exposta no item 2.3.7 deste trabalho, e se aproxima dos resultados experimentais encontrados por Gudimettla e Crawford (2014), Azarsa e Gupta (2017), entre outros autores. O coeficiente de determinação (R^2) se aproxima do encontrado por Ghosh e Tran (2015), conforme pode ser visto na Tabela 6 (página 34). Os valores obtidos pela resistividade superficial foram 1,89 vezes maiores que os resultados obtidos pelo método direto do equipamento

produzido, o que indica uma grande proximidade com o valor encontrado por Gudimettla e Crawford (2014), que foi 1,9 vezes mais alto.

Com o equipamento calibrado, os ensaios de resistividade elétrica pelo método direto foram iniciados. Os corpos de prova foram retirados da cura e secados cuidadosamente com pano úmido para remoção do excesso de água, antes da submissão da passagem de corrente elétrica. A resistividade elétrica das esponjas, mesmo que muito pequenas, também foram medidas. No cálculo (Equação 4), as mesmas foram descontadas, para que houvesse a obtenção apenas da resistência da amostra de concreto. A temperatura da sala de ensaio foi mantida em 23 ± 2 °C durante todo período de medição de resistividade.

3.4.1.2 Teor de umidade

A resistividade elétrica dos concretos também foi investigada quanto ao seu teor de umidade. O ensaio foi realizado na idade de 28 dias em 3 corpos de prova cilíndricos (100 x 200 mm) para cada mistura produzida. Para confecção da curva do teor de umidade x resistividade elétrica, as medições de resistividade elétrica e massa dos corpos de prova foram realizadas da condição seco em estufa até saturado.

- 1) Primeiramente, os concretos foram curados em água até a idade estabelecida de ensaio;
- 2) Em seguida, os concretos foram colocados em estufa à temperatura de 100 °C por 24 horas;
- 3) Foram então retirados para resfriamento durante aproximadamente 3 horas, em ambiente de laboratório com temperatura 23°C;
- 4) Após esse tempo as amostras foram imersas em água para monitoramento da umidade. E então, as medidas, de massa e resistividade, foram registradas em intervalos de 60 minutos durante as primeiras 6 horas em água. Após 6h as medições foram realizadas ao completar 24 horas, 48 horas e 72 horas de imersão.

A Figura 26 exhibe parte dessa etapa experimental.



Figura 26 Ensaio de teor de umidade. a) Leitura corpo de prova seco em estufa, b) Corpos de prova imersos em água potável, c) Momento da pesagem da massa do corpo de prova.

Após o resfriamento (passo 3), foi realizada a medição da resistividade elétrica, no entanto, o multímetro não exibiu nenhum valor, como pode ser observado na Figura 26a, provavelmente devido à ausência de umidade nas amostras, além das condições do ajuste inicial que foi feito no equipamento para realização dos ensaios.

3.4.1.3 Dimensão da amostra

Para análise da influência da dimensão da amostra na resistividade elétrica, foram utilizados os corpos de prova das misturas com alteração no teor de brita (misturas CPIIF55_40% e CPIIF55_46% relativa à mistura referência CPIIF55_43%), devido a possibilidade de avaliação dos concretos quanto à homogeneidade da mistura e dispersão dos agregados graúdos pela amostra. O ensaio foi realizado na idade dos 56 dias por ser destrutível.

Foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm (largura x altura) por mistura, que foram cortados em duas etapas, através da serra circular, como mostrado na Figura 27a e 27b. E as medições de resistividade elétrica efetuadas conforme Figura 27c.



Figura 27 Ensaio dimensão da amostra. a) Momento do corte do corpo de prova, b) Corpo de prova seccionado ao meio (100x100 mm), c) Medição do corpo de prova (100x50 mm).

O procedimento utilizado nesse ensaio seguiu da seguinte forma:

- 1) Primeiramente foram efetuadas medidas do corpo de prova cilíndrico com dimensões 100 x 200 mm;
- 2) Com o mesmo corpo de prova, efetuou-se o corte em seu centro para que fossem realizadas medidas com as dimensões 100 x 100 mm;
- 3) Dos dois discos cortados, foram feitos mais dois cortes em cada, transformando-os assim em corpos de prova cilíndricos com dimensões 100 x 50 mm.

A Figura 28 mostra o esquema utilizado.

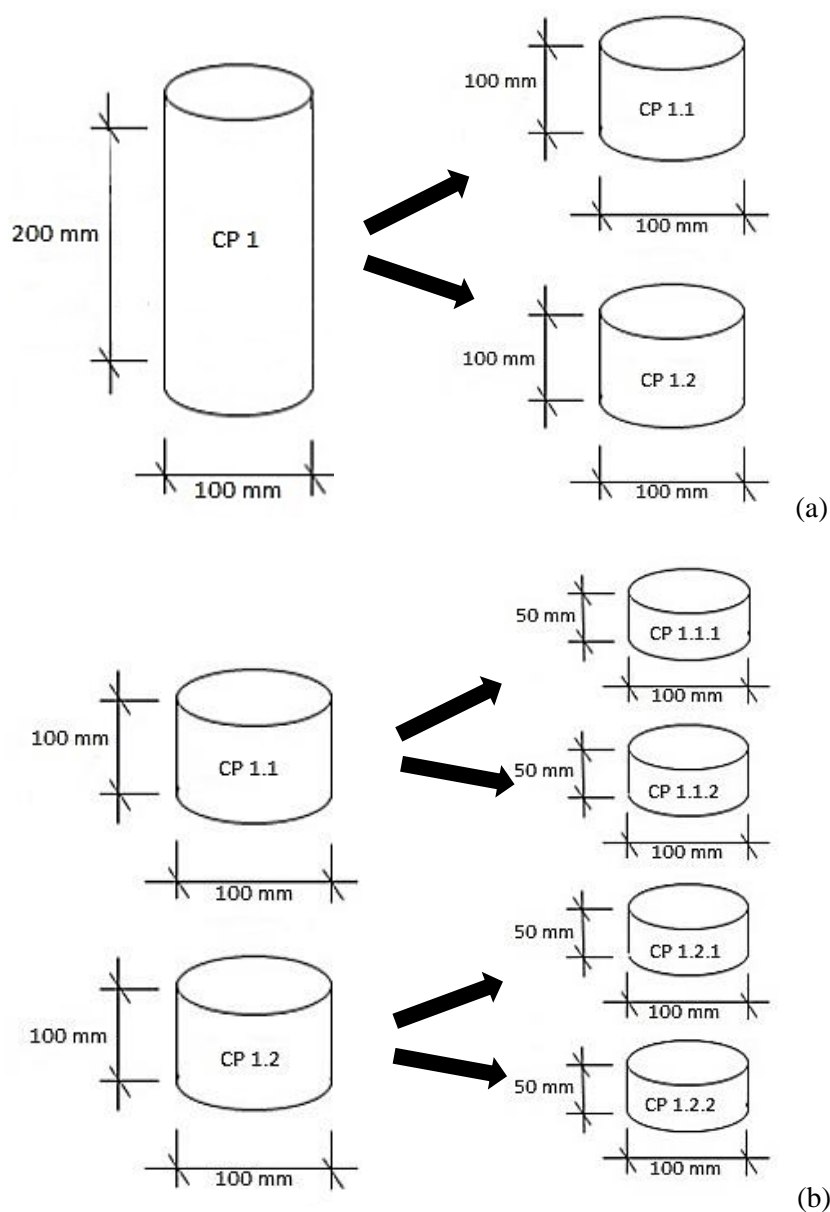


Figura 28 Esquema utilizado para ensaio de resistência à compressão da amostra. a) Corte da seção ao meio (100x100 mm), b) Corte da seção em quatro partes (100x50 mm)

3.4.1.4 Efeito do nível de fissuração na resistividade

Conforme Mehta e Monteiro (2008), o comportamento não-linear dos concretos evidencia que após um carregamento ser aplicado, o material não é mais totalmente recuperado. Dessa forma, o micro-fissuramento progressivo do concreto sob a influência de um nível de tensão (expresso como percentual da carga final) pode atingir quatro estágios distintos, como pode ser observado na Figura 29.

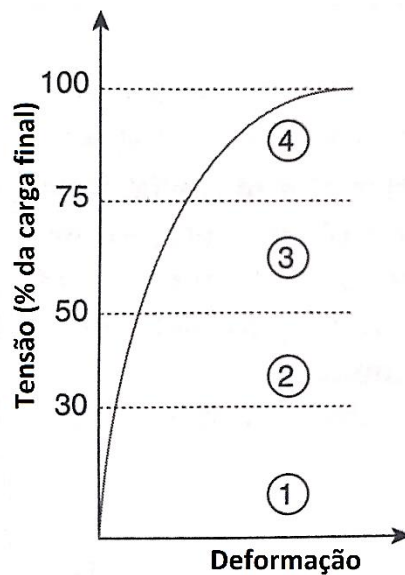


Figura 29 Diagrama de representação do comportamento de tensão do concreto sob compressão uniaxial (Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro, 2006)

No caso do diagrama apresentado na Figura 29 foi possível considerar quatro estágios diferentes obtidos em correspondência com as aplicações de percentuais de carregamentos (30%, 50%, 75% e 100% - até a falha). Mehta e Monteiro (2008) explicam sobre estes estágios da seguinte maneira:

- Estágio 1: Até cerca de 30% da carga final, as fissuras na zona de transição interfacial permanecem estáveis, portanto, a tensão de deformação permanece linear;
- Estágio 2: Acima de 30% até 50% da carga final, com o aumento da aplicação de carregamento, as microfissuras da zona de transição interfacial começam a aumentar. Dessa forma, a curva tensão-deformação começa a se desviar de uma linha reta. Ainda assim, parece apresentar um sistema estável de microfissuras;
- Estágio 3: Acima de 50% da carga final, as fissuras começam a se formar na matriz. Há um aumento na propagação de trincas, fazendo com que a curva tensão-deformação seja dobrada significativamente em direção à horizontal. Entre 75 a 80% da carga final, há um crescimento de trincas sob tensão constante e as deformações do material até a falha;
- Estágio 4: Acima de 75% da carga final, com aplicação de carregamentos crescentes, são desenvolvidas altas tensões, indicando que o sistema de trincas

está se tornando contínuo devido à sua rápida propagação na matriz e na zona de transição interfacial.

Com base na análise apresentada, neste estudo foi feita a investigação da resistividade elétrica aliando à influência da incidência de tensões no concreto (a partir de um percentual da carga máxima suportada). Para o ensaio foi utilizado a prensa universal Shimadzu (Figura 30). Uma taxa de deslocamento de 0,5 mm/min foi aplicada utilizando um sistema de teste em circuito fechado com uma capacidade de carga máxima de 100 kN.



Figura 30 Ensaio de fissuração

Para realização dos ensaios utilizou-se a mistura CPIIF60_43%, pois esta mistura obteve a menor resistência à compressão, f_{ck} de 20MPa. O ensaio foi feito aos 28 dias com 3 corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200 mm).

As medições de resistividade foram realizadas antes do carregamento e em quatro ciclos de descarga. Com alterações no percentual da carga última em relação à exibida na Figura 29. Os quatro ciclos foram divididos da seguinte forma:

- 1) Primeiramente, aplicou-se um carregamento de 30 kN nos corpos de prova, que representou um total de 19% em relação à resistência total. Após a aplicação da força, mediu-se a resistividade elétrica dos espécimes;
- 2) Foi aplicada uma força de 50 kN, que representou um percentual de 31% da resistência a compressão. Novamente, os corpos de prova foram medidos pela resistividade;

- 3) Continuando o ensaio, com os mesmos corpos de prova, houve a aplicação de 70 kN de força, obtendo assim, 44% de percentual da resistência à compressão. Mediu-se a resistividade;
- 4) Por último, foi aplicada uma carga de 90 kN, esta representou um percentual de 57% da resistência à compressão dos corpos de prova da mistura utilizada. E então, foi efetuada a última medida de resistividade.

3.4.2 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial é um dos parâmetros estruturais mais importantes na classificação dos concretos. Nesse estudo, o ensaio foi realizado para estabelecer uma correlação entre tal propriedade mecânica e a resistividade elétrica. Foram separados 3 corpos de prova cilíndricos (100 x 200 mm) por mistura de concreto e os ensaios se realizaram segundo a norma NBR 5739 (ABNT, 2018), na idade de 28 dias. As rupturas foram realizadas na prensa hidráulica EMIC, com capacidade de 100t (Figura 31).



Figura 31 Ensaio de resistência à compressão axial

3.4.3 Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado segundo os procedimentos da norma NBR 8522 (ABNT, 2017) com a utilização de 3 corpos de prova cilíndricos (100 x 200 mm) por mistura de concreto. Para o ensaio foi utilizada a prensa universal Shimadzu

Autograph, e uma taxa de deslocamento de 0,5 mm/min foi aplicada utilizando um sistema de teste em circuito fechado com uma capacidade de carga máxima de 100 kN. A Figura 32 abaixo ilustra o esquema do ensaio.



Figura 32 Ensaio de módulo de elasticidade

3.4.4 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão seguiu os procedimentos da NBR 9778 (ABNT, 2005) com a utilização de 3 corpos de prova cilíndricos (100 x 200 mm) para cada mistura relacionadas ao teor de agregado e relação água/cimento, na idade de 28 dias. Foram estabelecidos os percentuais de absorção por imersão (I) pela seguinte Equação 10:

$$I = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (10)$$

Onde: m_{sat} é a massa da amostra após atingir a saturação; m_s é a massa seca em estufa, após resfriamento.

3.4.5 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção capilar foi realizado segundo os procedimentos da NBR 9779 (ABNT, 2012). Foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos (100 x 200 mm) para cada mistura relacionadas ao teor de agregado graúdo e a relação água/cimento, aos 28 dias de idade. A absorção capilar (C) dos espécimes foi dada pela seguinte Equação 11:

$$C = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{S} \quad (11)$$

Onde: m_{sat} é a massa da amostra saturada em cada idade estabelecida; m_s é a massa seca em estufa após resfriamento; e, S é a área da seção transversal da amostra (cm^2).

Algumas medidas foram adotadas além da normativa de ensaio. Foram realizadas leituras diárias além do tempo indicado na mesma. Outra medida adotada, foi o selamento dos corpos de prova com plástico filme, deixando apenas 5 mm de altura livre para ter contato com a água, esta medida foi adotada com o intuito de garantir uma ascensão capilar de fluxo vertical. Dessa forma, foram confeccionados gráficos com a absorção de água por área transversal (g/cm^2) em função do tempo ($\text{h}^{1/2}$). A Figura 33 ilustra parte do procedimento.

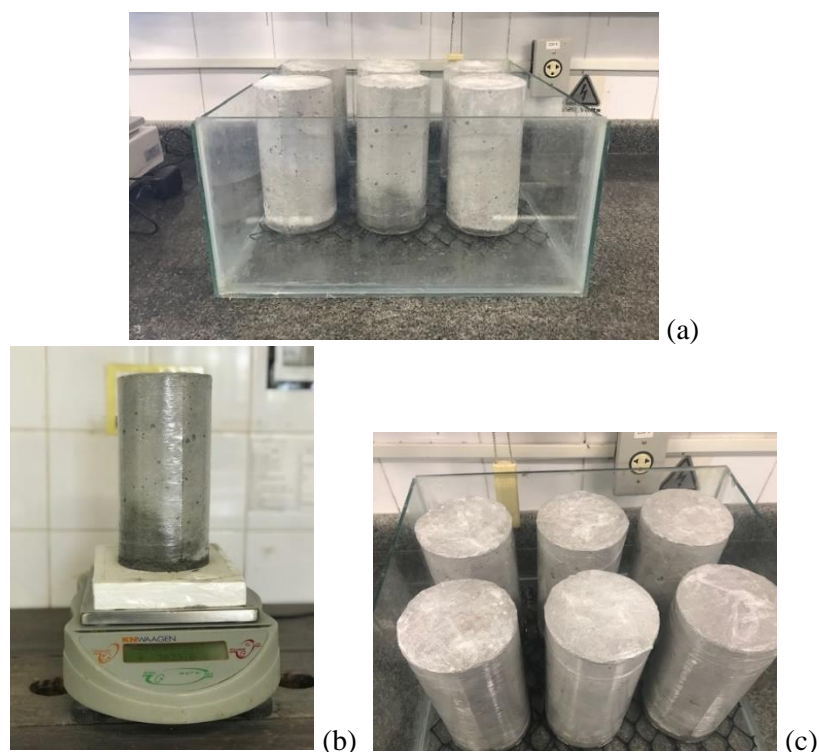


Figura 33 Ensaio de absorção de água por capilaridade. a) Vista frontal do momento do ensaio, b) Pesagem do corpo de prova, c) Vista superior dos corpos de prova selados com plástico filme

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O tratamento estatístico foi realizado com a utilização do software STATISTICA®, por meio da comparação entre as médias dos resultados pelo Teste-t. Sendo o nível de significância de 5% (quando $p < 0,05$), para avaliação das diferenças entre os grupos.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir, os resultados serão apresentados e discutidos. Primeiramente, serão apresentados os resultados referentes aos ensaios de caracterização mecânica do concreto, resistência à compressão e módulo de elasticidade, seguido dos ensaios referentes à caracterização física, absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão. Posteriormente, serão apresentados os resultados de resistividade elétrica dos concretos obtidos pelo método direto, e todos parâmetros de observação que o incluem, realizados nesta dissertação.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E MÓDULO DE ELASTICIDADE

A Tabela 13 apresenta as médias dos resultados de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dos concretos, com seus respectivos coeficientes de variação, aos 28 dias.

Tabela 13 Resultados médios das propriedades mecânicas das misturas

Mistura	F _{c28} (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)	
	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)
CPV55_43%	30,0	2,8	26,4	1,7
CPIIZ55_43%	22,5	4,1	23,1	1,8
CPIIF55_43%	26,7	1,0	26,2	8,8
CPIIF50_43%	28,9	8,2	29,8	1,5
CPIIF60_43%	20,0	0,7	23,3	4,6
CPIIF55_40%	23,9	3,5	23,4	5,0
CPIIF55_46%	24,7	0,3	26,9	6,1

a) Influência do tipo de cimento

A Figura 34 ilustra o comportamento do tipo de cimento com relação a resistência à compressão axial e módulo de elasticidade.

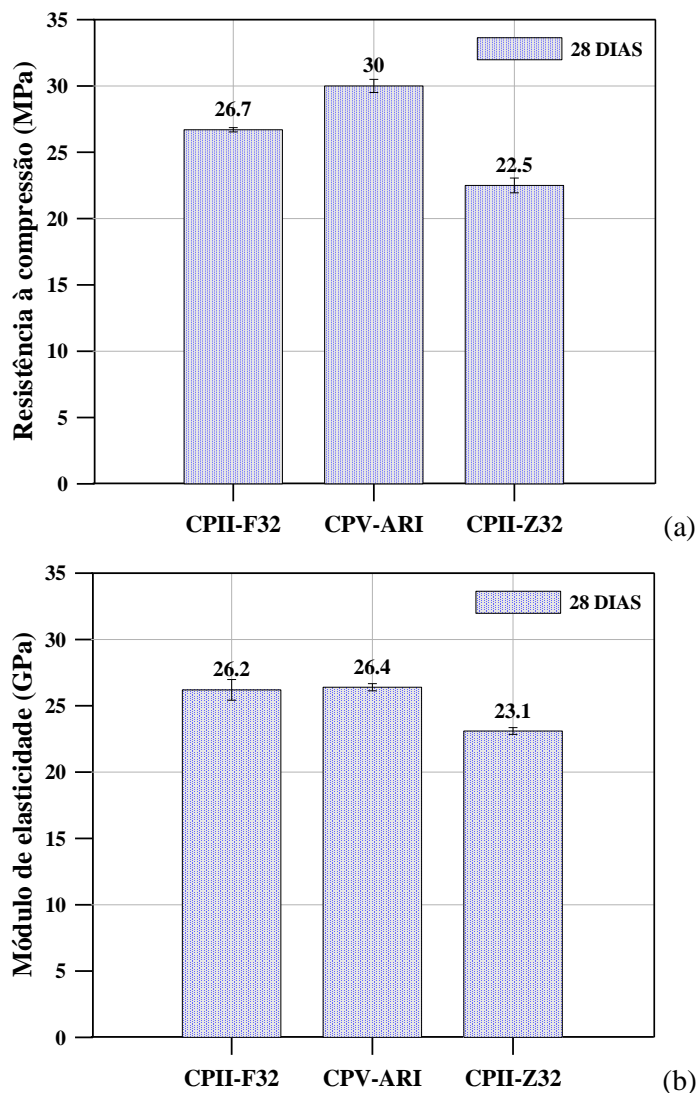


Figura 34 Influência do tipo de cimento nas propriedades mecânicas. a) Resistência à compressão, b) Módulo de elasticidade

O CPV-ARI apresentou maior resistência à compressão por ser um cimento mais fino, conforme índice de finura apresentado na Tabela 7, além do que, sua composição apresenta uma quantidade menor de fíller, comparado ao CII-F. A velocidade no processo de hidratação do cimento CPV-ARI proporciona um ganho de resistência inicial maior que em relação aos demais tipos de cimento analisados. Benachour *et al.* (2008) explicaram que as micropartículas do fíller, material presente em maior quantidade no cimento CII-F32, atuam como enchimento nos poros do concreto (efeito físico), ocasionando uma pequena redução na resistência à compressão dos concretos.

Quanto à mistura CII-Z32_43%, o resultado observado foi um pouco inferior aos outros dois tipos de cimento. Isso se deve a presença de material pozzolânico no cimento que

reage de forma mais lenta. Provavelmente, o ganho de resistência será melhor em idades mais avançadas.

Quanto ao módulo de elasticidade, foi percebida a mesma tendência que a identificada nos resultados de compressão. A mistura CPIIZ55_43% apresentou o menor módulo de elasticidade, havendo uma redução de 13% em relação à mistura CPV55_43% e 12% em relação à mistura CPIIF55_43%. No entanto, as misturas contendo CPV-ARI e CPII-F, apresentaram a mesma deformação. É importante perceber que a composição do cimento também altera o módulo de elasticidade dos concretos e isso pode ser explicado a partir da relação entre consumo de cimento e módulo de elasticidade. Conforme os consumos de cimento por m³ apresentados na Tabela 11, verifica-se uma relação proporcional entre estes resultados. Melo Neto e Helene (2002) explicaram que ao manter o abatimento constante e aumentar o consumo de cimento, ocorre aumento do módulo de elasticidade em razão do aumento do módulo da pasta de cimento.

b) Influência da relação água/cimento

A Figura 35 apresenta a influência da relação água/cimento na resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos.

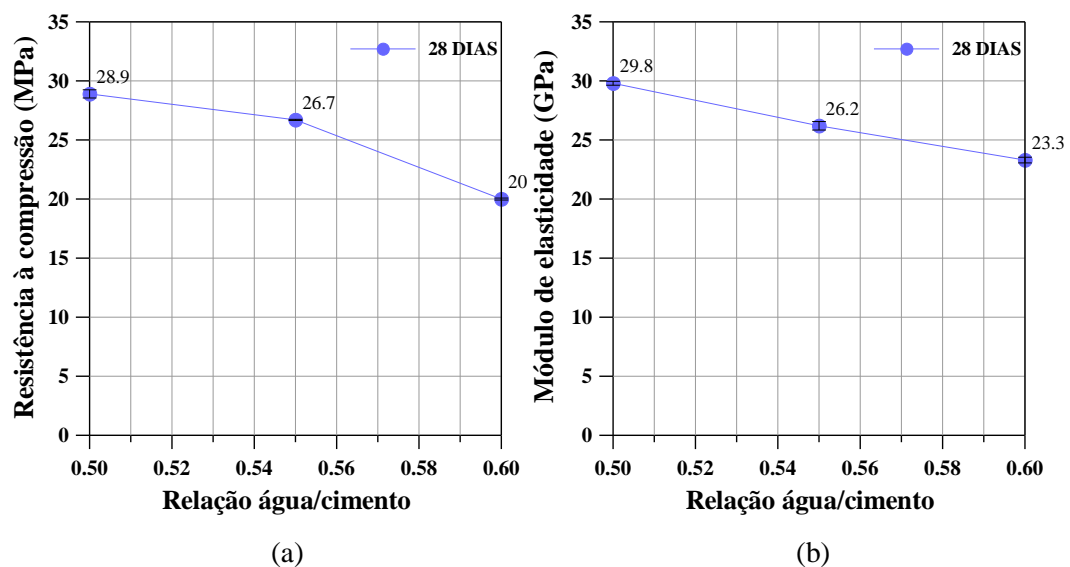


Figura 35 Influência da relação água/cimento nas propriedades mecânicas

Como pode ser observado na Figura 35a, a mistura com relação água/cimento 0,50 apresentou a maior resistência à compressão. Tal fato já era esperado, visto que a mesma possui menor relação água/cimento. A mistura CPIIF55_43% apresentou uma redução de 8%; e a mistura CPIIF60_43%, uma redução de 31%. Uma tendência confirmada pela

literatura, visto que, conforme Mehta e Monteiro (2008) e Neville (1997), a resistência à compressão é influenciada diretamente pela matriz da pasta de cimento e esta pela relação água/cimento.

A Figura 35b mostra que, assim como a resistência à compressão, a evolução do módulo de elasticidade se deu de forma inversa à relação água/cimento das misturas. O maior módulo de elasticidade foi obtido para a relação água/cimento 0,50 (CPIIF50_43%). Um aumento de 12% foi obtido em relação à mistura CPIIF55_43%, e 22% em relação à mistura CPIIF60_43%. Esse comportamento confirma o que já se encontra consagrado em literatura, conforme autores como Mehta e Monteiro (2008), Vasconcellos (2018), Neville (1997) e Arruda (2013).

c) Influência do teor de agregado

Quanto ao efeito dos diferentes teores de agregado nas misturas (CPIIF55_40%, CPIIF55_43%, CPIIF55_46%), não houve uma tendência na resistência à compressão axial, como pode ser observado na Figura 36.

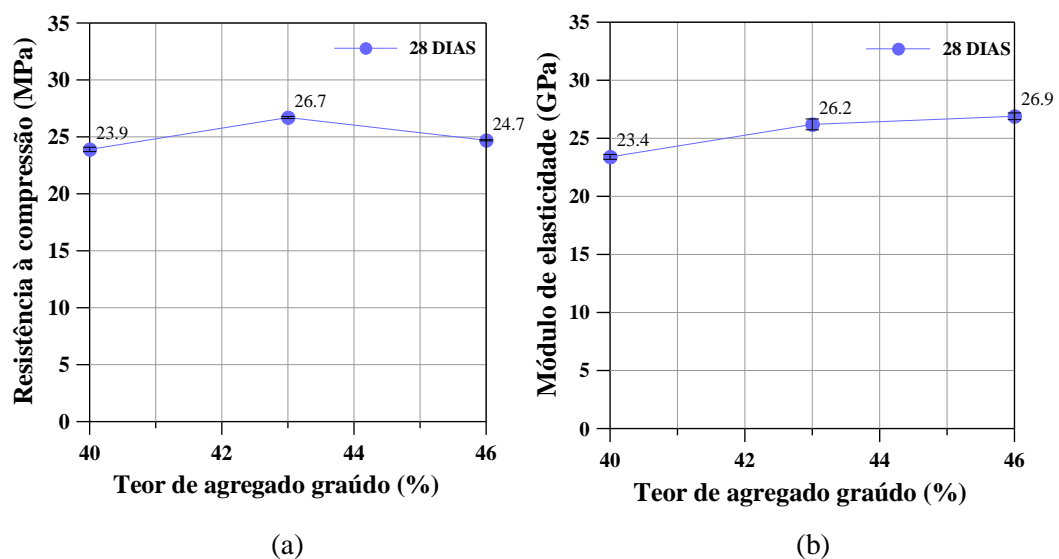


Figura 36 Influência do teor de agregado graúdo nas propriedades mecânicas

Em relação a este parâmetro de observação, a mistura CPIIF55_43% apresentou o maior resultado de resistência à compressão axial. Os concretos CPIIF55_40% e CPIIF55_46% apresentaram uma redução de 11% e 8%, respectivamente. Verificou-se que os concretos com 40% e 46% em volume de brita não apresentaram praticamente nenhuma diferença na resistência à compressão axial, sendo esta de apenas 3%.

Como pode ser observado na Figura 36b, de um modo geral, os módulos de elasticidade foram semelhantes quanto à influência do teor de agregado graúdo. A mistura CPIIF55_46%, por possuir o maior volume de material (brita), obteve, mesmo que por pouca diferença, um módulo superior aos demais. Considerando apenas um aumento de 5,4% em relação ao concreto CPIIF55_40%. Nesse caso, o comportamento distinto observado nesse grupo entre as duas propriedades mecânicas estudadas (resistência à compressão e módulo de elasticidade), mostra que o teor de agregado não foi significativo para alteração nos resultados de resistência, mas quanto ao módulo de elasticidade houve uma tendência de aumento, como mostrado na Figura 36b. A mistura CPIIF55_46% seria propensa a obter o maior módulo, pois o agregado graúdo granítico possui um módulo de elasticidade maior do que a pasta de cimento (MELO NETO; HELENE, 2002). O seu maior conteúdo na pasta, conforme Mehta e Monteiro (2008), afetam o módulo de deformação do concreto.

4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE E IMERSÃO

Os resultados médios de absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão das misturas que foram analisadas são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 Resultados médios das propriedades físicas das misturas

Mistura	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)		Absorção de água por imersão (%)	
	Média	C.V. (%)	Média	C.V.%
CPIIF55_43%	0,47	3,1	5,71	2,1
CPIIF50_43%	0,44	0,9	5,06	0,1
CPIIF60_43%	0,58	11,5	6,21	0,3
CPIIF55_46%	0,66	8,4	6,17	2,9
CPIIF55_40%	0,48	4,3	5,81	0,5

De acordo com a Tabela 14 foi verificado que tanto para as absorções de água por capilaridade, quanto para as absorções de água por imersão, as misturas apresentaram valores próximos.

Em relação às misturas que fazem referência a relação água/cimento dos concretos, a mistura CPIIF60_43% apresentou a maior média de absorção capilar e absorção por imersão. Isso já era esperado, devido a maior relação água/cimento. Quanto à relação a/c 0,50, apresentou um aumento de 24% para capilaridade e 18% para imersão. Quanto à

relação a/c 0,55, apresentou um aumento de 19% e 8%, para capilaridade e imersão, respectivamente. Uma tendência esperada pelos resultados, devido à alteração na configuração dos poros com as diferentes relações água/cimento. Quanto maior a relação a/c maior o diâmetro dos poros no interior do material. Isto também corrobora com os resultados apresentados de resistência à compressão.

Em relação ao grupo de misturas (CPIIF55_40%, CPIIF55_43% e CPIIF55_46%) referentes à alteração no teor de agregado, nota-se que o valor médio tanto de absorção por imersão quanto de absorção capilar foi maior para a mistura com 46% de brita, o que pode estar atrelado à que uma maior substituição em relação a argamassa nos concretos, proporciona um volume de porosidade interna do material, devido uma maior quantidade de zonas de transição. No entanto, os concretos com 40% e 43% de brita pode-se dizer que não apresentam diferenças aparentes nestas propriedades.

A Figura 37 apresenta as configurações das curvas de absorção de água por capilaridade por área transversal (g/cm^2) em função do tempo ($\text{h}^{1/2}$) das misturas estudadas.

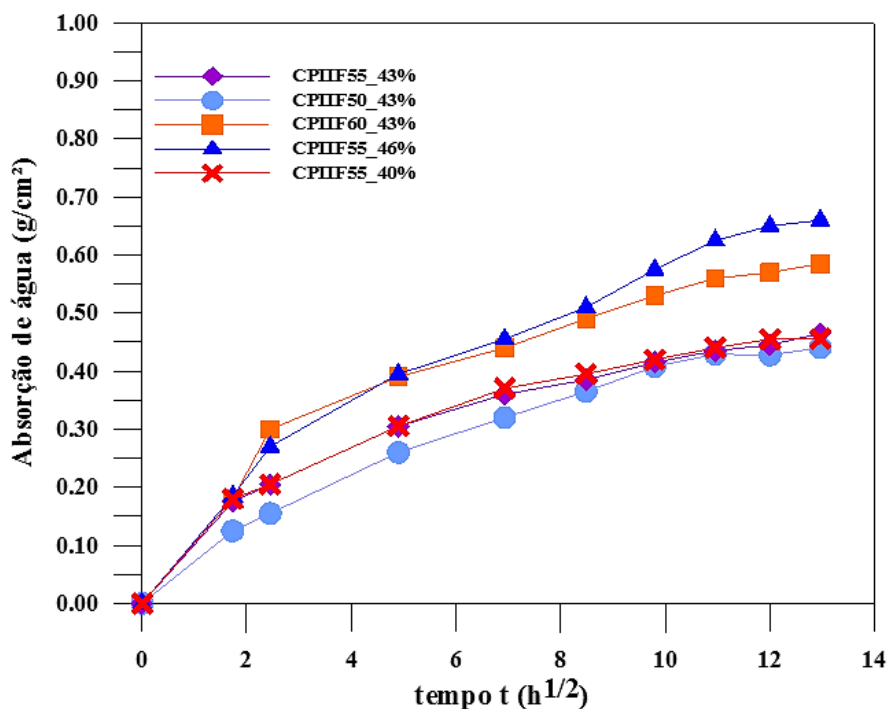


Figura 37 Absorção de água por capilaridade das misturas

De forma geral, os concretos produzidos não atingiram altos valores de absorção de água por capilaridade, ou seja, as pastas de cimento tiveram uma qualidade semelhante em

quase todas as misturas. A tendência à menor absorção de água pode ser consequência do preenchimento de vazios com o refinamento do sistema de poros, seguido também de uma diminuição da interligação entre eles, o que diminui a ascensão de água nos concretos. Em outros casos, conforme Ho e Lewis (1987) apud Pereira (2001), a existência de capilares de pequenos diâmetros podem ocasionar uma absorção de forma mais lenta, em contrapartida, uma tendência mais rápida de absorção de água pode estar diretamente associada quanto à existência de capilares maiores, o que conseqüentemente indica uma maior quantidade de água adsorvida.

4.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA PELO MÉTODO DIRETO

4.3.1 Influência da idade

Os resultados médios de resistividade elétrica obtidos experimentalmente pelo método direto aos 28 e 56 dias de idade são exibidos na Tabela 15.

Tabela 15 Resultados médios de resistividade elétrica obtidos pelo método direto

Mistura	R.E. 28 DIAS ($\Omega.m$)		R.E. 56 DIAS ($\Omega.m$)	
	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)
CPV55_43%	57	1,8	67	3,3
CPIIZ55_43%	44	2,1	55	1,8
CPIIF55_43%	46	3,0	50	2,5
CPIIF50_43%	53	9,1	62	4,2
CPIIF60_43%	44	1,3	48	1,1
CPIIF55_40%	43	2,3	49	1,9
CPIIF55_46%	51	6,2	55	3,5

Como pôde ser visto na Tabela 15, de modo geral, a resistividade elétrica da mistura CPV55_43% foi superior às demais misturas analisadas, tanto na idade dos 28 dias assim como aos 56 dias. Isso será melhor explicado *à posteriori* no item sobre o efeito do tipo de cimento na resistividade elétrica.

Os resultados apresentados na Tabela 15 estão em concordância com os apresentados por autores que utilizaram o mesmo procedimento para medidas de resistividade elétrica, como Silva e Brito (2013), Santos (2006), Costa e Azzi (2017) e Spragg *et al.* (2011).

Quanto à análise da resistividade elétrica referente ao tempo de cura do concreto, como já esperado, após os 56 dias de idade, todos os concretos aumentaram a sua resistividade elétrica. Essa evolução pode ser melhor visualizada na Figura 38.

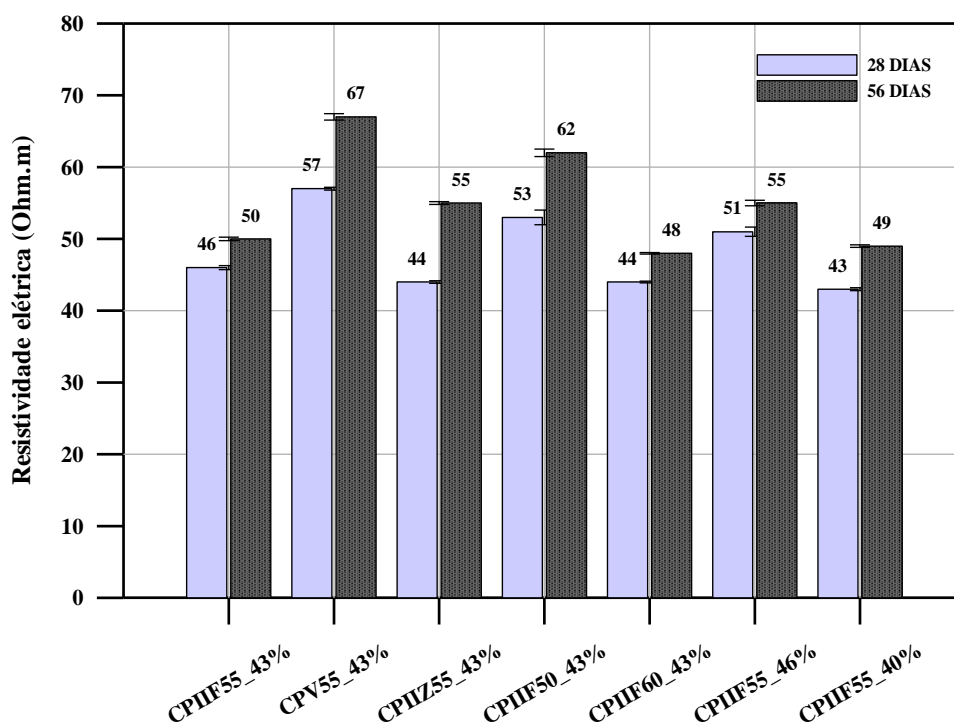


Figura 38 Resistividade elétrica dos concretos – 28 e 56 dias de idade

Na Figura 38 pode ser observada a variação da resistividade de cada concreto com base na evolução da hidratação do cimento, ou seja, é perceptível o acréscimo da resistividade elétrica de todas as misturas ao longo da idade dos concretos. Este resultado é confirmado por outros autores (Andrade e D'Andrea, 2011; Medeiros-Junior, 2014; Santos, 2006; Hoppe, 2005) e justifica-se pelo progresso na hidratação cimentícia.

Whittington *et al.* (1981) ressaltaram que a quantidade de água que evapora numa mistura de concreto varia de 60%, durante momento da mistura, e chega a 20%, após hidratação completa. Diminuindo dessa forma a condutividade elétrica proveniente dos poros da pasta de cimento. Assim, a resistividade elétrica está diretamente relacionada com o

progresso de hidratação da pasta de cimento, e deve ser função do tempo de cura do concreto.

4.3.2 Efeito do tipo de cimento na resistividade elétrica

A partir deste item serão mostrados os resultados de resistividade elétrica com relação às influências estudadas. A Figura 39 estabelece um comparativo entre os resultados apenas quanto ao efeito do tipo de cimento na resistividade elétrica obtida pelo método direto, aos 28 e 56 dias de idade.

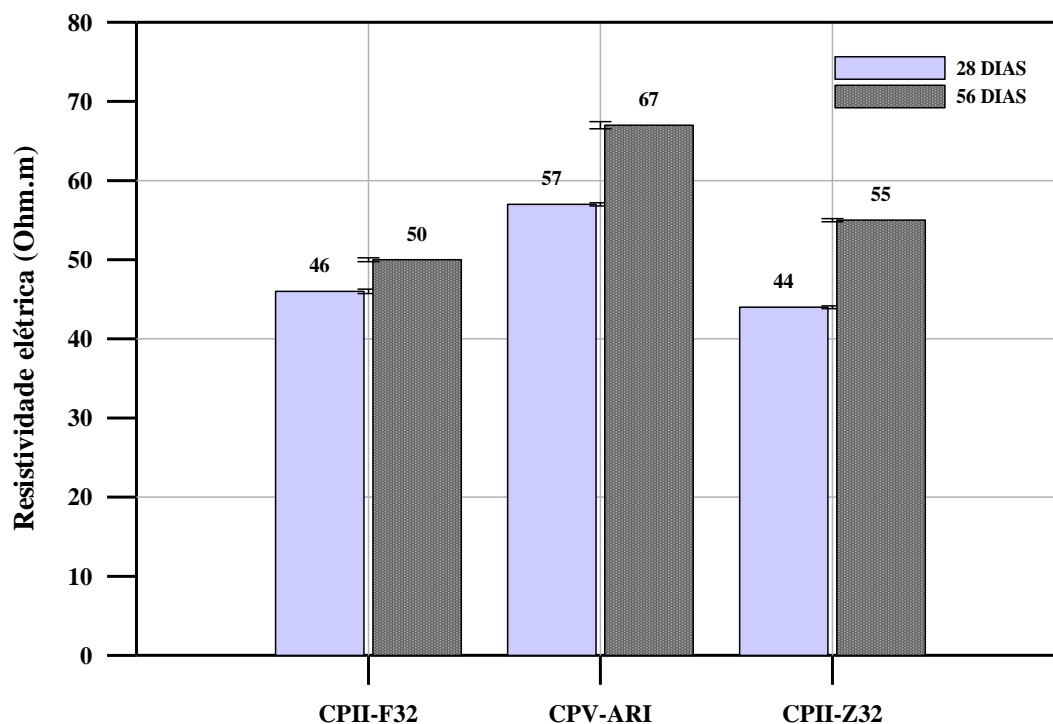


Figura 39 Tipo de cimento x resistividade elétrica

Conforme apresentado na Figura 39, pode-se notar que a resistividade elétrica do cimento CPV-ARI foi superior aos demais cimentos analisados, como já havia sido mencionado. Há um acréscimo de 19% em relação à mistura CPIIF55_43%, com utilização do cimento Portland CPII-F-32, aos 28 dias e de 25% aos 56 dias. E um aumento de 23% em relação à mistura CPIIZ55_43%, com utilização do cimento Portland CPII-Z-32 aos 28 dias e de 18% aos 56 dias.

Em relação aos 56 dias de idade, tanto o cimento CPV-ARI quanto o CII-Z apresentaram ganho de 20% em suas resistividades, dessa forma, o CPV-ARI continuou com o maior resultado.

Quanto aos cimentos CII-F e CPV-ARI, os resultados encontrados por Santor *et al.* (2012) demonstraram que mesmo para relações água/cimento diferentes, os dois tipos de cimentos obtiveram resultados semelhantes, no entanto, os autores realizaram tratamento superficial nos espécimes que indicou um maior percentual de aumento nos concretos CPV-ARI, embora resistividades mais baixas quando relacionados ao CP-IV. Em uma análise mais extensa, com os tipos de cimento CP-IV 32, CP-III 40 RS, CP II-F 32 e CPV-ARI, Medeiros-Junior (2014) concluiu que os cimentos CPV-ARI e CII-F possuem os menores valores de resistividade devido à ausência de adições minerais em suas composições.

Entre as misturas CIIIF55_43% e CIIIZ55_43%, um comportamento diferente foi evidenciado aos 56 dias. O cimento CII-Z alcançou uma maior resistividade elétrica quando ensaiado em idade mais avançada, apresentando um acréscimo de 9% em relação ao CII-F, que deve-se provavelmente às reações pozolânicas provenientes desse tipo de cimento. Polder *et al.* (1991) relataram que a resistividade de concretos produzidos com teores de material pozolânico chegaram a ser 3 ou 4 vezes maiores do que concretos produzidos sem adições. Neste caso, as reações pozolânicas ao transformar o hidróxido de cálcio em produtos hidratados C-S-H, geram uma solução aquosa dentro do concreto com menos íons hidroxila (OH^-) reduzindo a concentração iônicas e consequente aumento da resistividade elétrica, no entanto, por essa reação ter uma velocidade um pouco mais lenta, justifica-se o fato do aumento da resistividade apenas aos 56 dias. Hoppe (2005) também atribuíram este comportamento característico da presença de materiais pozolânicos à uma melhoria no refinamento dos poros do concreto que contribui na elevação da resistividade. Há um consumo de íons Ca^{2+} , devido à reação pozolânica e ao refinamento dos poros (REAL, 2015).

Foi realizada uma análise de estatística das resistividades aos 28 e 56 dias, com o intuito de avaliar se a substituição de cimento nas misturas foi realmente significativa, como também a interação entre as idades. Na Tabela 16 é apresentado o resultado do Teste-t.

Tabela 16 Teste-t para comparativo de médias do tipo de cimento na resistividade elétrica das misturas

Variação	Pares	F	P	Análise
Tipo de cimento	CPV e CII-F	1,71	0,000315	Diferentes
	CPV e CII-Z	1,24	0,000091	Diferentes
	CII-F e CII-Z	2,12	0,226102	Iguais
Idade	CPV_28 e CPV_56	4,51	0,002765	Diferentes
	CII-F_28 e CII-F_56	1,05	0,031030	Diferentes
	CII-Z_28 e CII-Z_56	1,03	0,000189	Diferentes
Interação (tipo de cimento x idade)	CPV_28 e CII-F_56	1,8	0,001484	Diferentes
	CPV_28 e CII-Z_56	1,28	0,023865	Diferentes
	CII-F_28 e CPV_56	2,64	0,000158	Diferentes
	CII-F_28 e CII-Z_56	2,19	0,000805	Diferentes
	CII-Z_28 e CPV_56	5,6	0,000090	Diferentes
	CII-Z_28 e CII-Z_56	2,24	0,000189	Diferentes

Conforme visto na Tabela 16 os pares comparados são diferentes entre si (quando p-valor < 0,05) para as misturas com alteração dos tipos de cimento, exceto com relação aos cimentos CII-F e CII-Z, estes foram estatisticamente iguais, isso se deve ao tipo de cimento (CP-II), seu mecanismo de hidratação e propriedades semelhantes. A análise estatística também confirma que o maior valor encontrado na resistividade elétrica dos concretos com o cimento CPV-ARI se distancia dos demais resultados, isto é verificado ao observar as diferenças existentes quando o mesmo está presente na combinação entre os pares.

Em relação ao fator idade, a análise estatística comprova que houveram avanços significativos de 28 para os 56 dias em todos pares de misturas, bem como na interação entre o tipo de cimento e idade.

4.3.3 Efeito da relação água/cimento na resistividade elétrica

A Figura 40 mostra os resultados médios de resistividade elétrica dos concretos em relação ao efeito da relação água/cimento, aos 28 e 56 dias de idade.

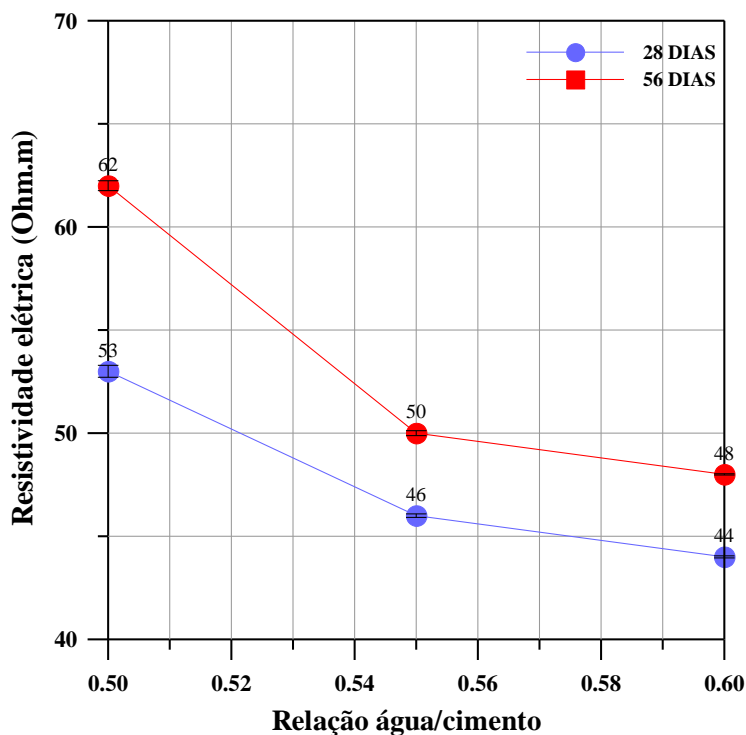


Figura 40 Relação água/cimento x resistividade elétrica

Como pode ser observado na Figura 40, quando fixado um mesmo tipo de cimento (CPII-F32) para diferentes relações água/cimento (0,50; 0,55 e 0,60), verifica-se o decréscimo da resistividade elétrica com o aumento da quantidade de água. Como previsto em literatura, há uma notável influência da relação água/cimento na resistividade elétrica. Isto foi percebido de forma clara entre as misturas com relação a/c 0,60 (CPIIF60_43%) e relação a/c 0,50 (CPIIF50_43%). O crescimento observado influenciou os resultados tanto aos 28 dias quanto aos 56 dias. A diferença entre as duas misturas indicou uma resistividade elétrica 17% maior para mistura com relação a/c 0,50, aos 28 dias, e 23% aos 56 dias de idade.

Os resultados apresentados estão condizentes com os estudos de autores como Polder (2001), Santos (2006), Hoppe (2005) e Lübeck (2008). A menor resistividade com aumento da relação água/cimento está condicionada à porosidade que a maior quantidade de água presente na mistura pode proporcionar. Enquanto, o aumento na resistividade, devido a provável redução da quantidade de poros com maior diâmetro é ocasionado pela redução da relação água/cimento. Além do que, uma menor saturação dos poros contribui com uma menor quantidade de eletrólitos disponíveis para transporte de corrente elétrica, ou seja, a água funciona como um condutor no interior do concreto, a sua diminuição

combinada com uma menor relação água/cimento resulta numa menor resistividade elétrica do concreto (POLDER, 2001; HOPPE, 2005; LÜBECK, 2008; OLSSON, 2013; MEDEIROS-JUNIOR, 2014).

A análise estatística da resistividade elétrica com relação à influência da relação água/cimento é apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 Teste-t para comparativo de médias da influência da relação a/c na resistividade elétrica das misturas

Variação	Pares	F	P	Análise
Relação água/cimento	0,55 - 0,50	1,82	0,0084	Diferentes
	0,60 - 0,50	19,82	0,0023	Diferentes
	0,55 - 0,60	2,32	0,4189	Iguais
Idade	0,50_28 - 0,50_56	22,58	0,001463	Diferentes
	0,55_28 - 0,55_56	1,56	0,018197	Diferentes
	0,60_28 - 0,60_56	3,74	0,089035	Iguais
Interação (relação a/c x idade)	0,50_28 - 0,55_56	41,34	0,204015	Iguais
	0,50_28 - 0,60_56	55,49	0,127152	Iguais
	0,55_28 - 0,50_56	2,85	0,000154	Diferentes
	0,55_28 - 0,60_56	1,16	0,116877	Iguais
	0,60_28 - 0,50_56	1,52	0,000381	Diferentes
	0,60_28 - 0,55_56	2,78	0,025066	Diferentes

Os resultados mostram que entre as médias, a maior similaridade entre os mesmos encontra-se apenas quanto às relações a/c 0,55 e 0,60, ao analisar o efeito da relação água/cimento na resistividade elétrica.

A ocorrência de mudanças estatisticamente significativas se deu em comparação com a relação água/cimento 0,50, que apresentou uma maior diferença entre às demais. Isto confirma que uma maior relação água/cimento reduz a porosidade interna do concreto, além de que, a quantidade de água interna diminui, dificultando a passagem de corrente elétrica.

Em relação à inferência da idade nas resistividades elétricas desta seção, a única similaridade foi encontrada pela relação a/c 0,60, a menor utilizada. Os concretos não obtiveram a mesma tendência de aumento na propriedade em relação às outras duas misturas. Por fim, com relação à interação entre idade e tipo de cimento, constatou-se que a relação água/cimento altera a resistividade elétrica dos concretos, porém, as similaridades encontradas indicam uma provável dependência da resistividade

provenientes da rede de poros, como o seu diâmetro e tortuosidade, que indicam o fluxo percorrido pelos íons para cada tipo de concreto produzido.

4.3.4 Efeito do teor de agregado graúdo na resistividade elétrica

A Figura 41 mostra os resultados médios de resistividade elétrica dos concretos das misturas CPIIF55_40%, CPIIF55_43% e CPIIF55_46%, apresentando o efeito dos diferentes teores de agregado graúdo na composição dos concretos, aos 28 e 56 dias de idade.

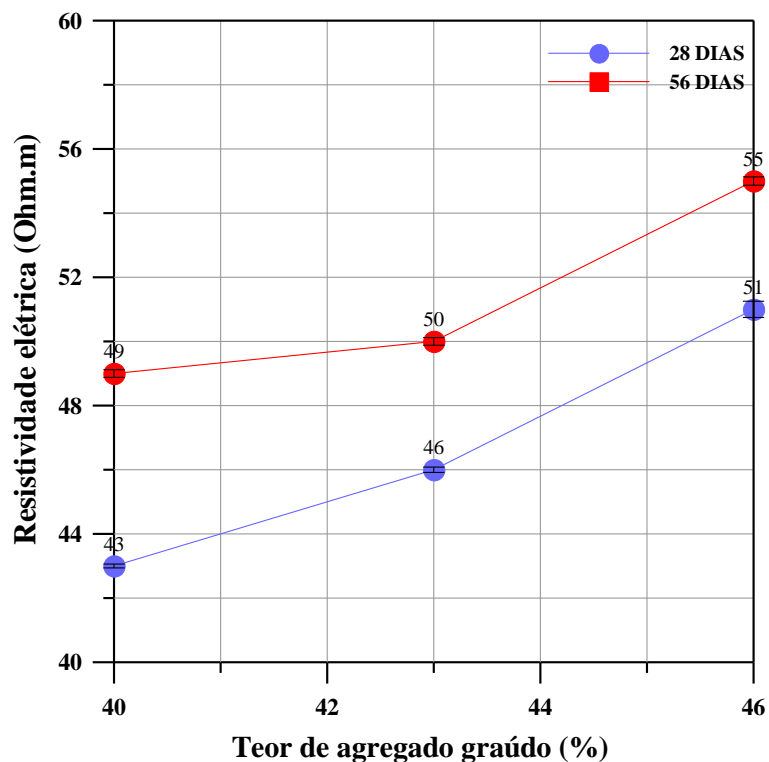


Figura 41 Teor de agregado graúdo x resistividade elétrica

Os resultados apresentados na Figura 41 sugerem que a resistividade elétrica aumenta com a inclusão de agregado graúdo na mistura, tanto aos 28, quanto aos 56 dias. A utilização de 40% de agregado graúdo gerou uma redução de 7% em relação ao concreto referência com 43% de brita (CPIIF55_43%). E a utilização de 46% de agregado graúdo gerou um aumento de 11%. Em relação aos concretos CPIIF55_40% e CPIIF55_46%, houve um acréscimo de 19% na resistividade elétrica dos concretos com o maior volume de brita. Dessa maneira, de forma geral, foi visto que o aumento no volume de agregado graúdo ocasionou uma maior resistividade elétrica nas misturas.

Estudos anteriores também relataram que há variação na resistividade com o aumento no teor de agregado graúdo, e estes resultados condizem com o observado por Sengul (2014), Hou *et al.* (2017) e Princigallo *et al.* (2003). O aumento da resistividade elétrica acompanhado do aumento do teor de agregado induz que a condutividade elétrica é transportada mais facilmente pela rede de poros da pasta, do que pelos agregados.

Whittington *et al.* (1981) ressaltaram que as resistividades elétricas dos agregados são de várias ordens maiores que as dos concretos. Com isso, a corrente elétrica geralmente utiliza-se da pasta de cimento para condução, ou seja, o caminho de menor resistência. Os autores informaram em seu estudo que enquanto a resistividade do concreto úmido está em torno de 25-45 $\Omega.m$, a pasta de cimento varia entre 10-13 $\Omega.m$.

Lembrando que, os volumes de agregado graúdo utilizados neste trabalho foram condizentes com os volumes utilizados para concretos convencionais, diferente do analisado por autores como Hou *et al.* (2017) e Sengul (2014).

A análise estatística apresentada na Tabela 18 mostra a influência do teor de agregado graúdo na resistividade elétrica e se há diferenças entre si dos pares analisados, acrescentado à análise do fator idade, bem como a interação entre estas.

Tabela 18 Teste-t para comparativo de médias da influência do teor de agregado graúdo na resistividade elétrica das misturas

Variação	Pares	F	P	Análise
Teor de agregado graúdo	43% - 40%	1,89	0,07347	Iguais
	46% - 40%	10,02	0,015776	Diferentes
	46% - 43%	5,3	0,054884	Iguais
Idade	40%_28 - 40%_56	1,11	0,00175	Diferentes
	43%_28 - 40%_56	1,05	0,03103	Diferentes
	46%_28 - 46%_56	1,21	0,00064	Diferentes
Interação (teor de agregado graúdo x idade)	40%_28 - 43%_56	1,99	0,003687	Diferentes
	40%_28 - 46%_56	8,24	0,004424	Diferentes
	43%_28 - 40%_56	2,09	0,021146	Diferentes
	43%_28 - 46%_56	4,36	0,013242	Diferentes
	46%_28 - 40%_56	11,09	0,399353	Iguais
	46%_28 - 43%_56	5,03	0,457816	Iguais

A tendência notada pela Tabela 18 mostra que, em relação ao fator idade, todas as médias comparadas apresentaram diferenças, ou seja, houveram avanços significativos entre 28

e 56 dias para cada mistura estudada. No entanto, em relação apenas à influência do agregado graúdo na resistividade elétrica, o par que relaciona o maior e menor teor (46% e 40%, respectivamente), é o único que apresenta média estatisticamente diferente, devido a maior diferença entre os teores relacionados. Isso confirma que quanto maior o volume do agregado graúdo presente ao concreto, mais progressiva é a sua resistividade elétrica.

Hou *et al.* (2017) atribuíram este comportamento ao fato que os agregados devem atuar como um tipo de obstáculo elétrico que impede uma transmissão maior de corrente elétrica, ou seja, a inclusão cada vez maior do teor de agregado graúdo à pasta de cimento não altera a hidratação cimentícia, mas pode servir como uma espécie de bloqueio. E isso também deve-se às resistividades mais altas desses agregados. Dessa forma, os agregados submersos de forma aleatória pela pasta (e em menor quantidade) poderão ocasionar uma diminuição da resistividade elétrica do concreto, pois a condução elétrica ocorrerá essencialmente pela pasta de cimento.

O método direto, utilizado neste estudo, possibilitou que a corrente elétrica fosse transportada por todo interior do corpo de prova, e pode também justificar este comportamento. Como a corrente ultrapassa por todo interior da microestrutura, quanto mais “livre” ou porosa a pasta de cimento estiver, mais facilidade a corrente obterá para transporte pelos fluídos existentes no interior do concreto.

Quanto à análise dos resultados obtidos de resistividade elétrica referente a idade do concreto, após os 56 dias de idade, todos os concretos aumentaram a sua resistividade elétrica. Evidenciando que, com o tempo de hidratação, a resistividade da amostra se torna cada vez maior, porque a microestrutura do concreto se torna cada vez mais densa e o tamanho dos poros no interior se torna cada vez mais estreito. Como consequência a resistividade elétrica aumenta. Autores como Godinho *et al.* (2018); Ghoddousi e Adelzade (2017); e Kurda; Brito e Silvestre (2019) também evidenciaram maior resistividade elétrica do concreto, quanto maior a idade de hidratação.

A diferença da resistividade elétrica entre a mistura CPIIF55_40% e as outras duas misturas diminuiu substancialmente com o tempo. O concreto com menor volume de brita possui um maior volume de argamassa, continuando dessa forma com uma maior hidratação do cimento ao longo do tempo. Devido às reações de hidratação da argamassa, as dimensões dos poros podem ter sido reduzidas, a porosidade e a tortuosidade da rede

de poros alterada, e como consequência a mobilidade iônica diminuiu ou foi dificultada, o que pode ser considerado como a principal razão para que esta mistura obtivesse o maior avanço da resistividade elétrica aos 56 dias.

4.3.5 Efeito do teor de umidade na resistividade elétrica

As Figuras 42 a 48 apresenta a variação da resistividade elétrica em relação ao teor de umidade aos 28 dias de idade de cada mistura estudada. Estabeleceu-se, como referência, que a absorção de água após 72 horas corresponderia ao teor de 100% de umidade.

Conforme pode ser observado nas Figuras 42 a 48, com apenas 1 hora de saturação em água, os concretos, em geral, atingiram níveis de teor de umidade acima de 36%. O que indica uma grande proximidade com o observado por Sbartai *et al.* (2007) e Bonnet e Balayssac (2018), conforme os autores, é possibilitado um teor de umidade acima de 40% a 60% para avaliação de níveis de saturação, pois abaixo desse nível as medições serão dificultadas. Justifica-se que com um teor de umidade mais baixo, a continuidade da solução intersticial desaparece e a corrente elétrica não pode circular (BONNET; BALAYSSAC, 2018).

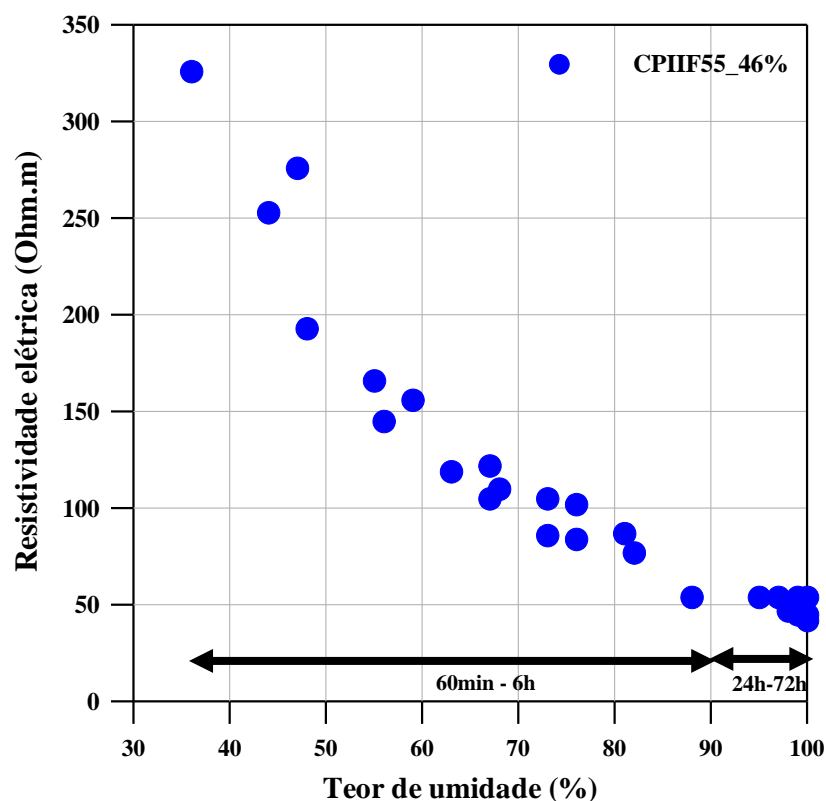


Figura 42 Teor de umidade x Resistividade elétrica da mistura CPIIF55_46%

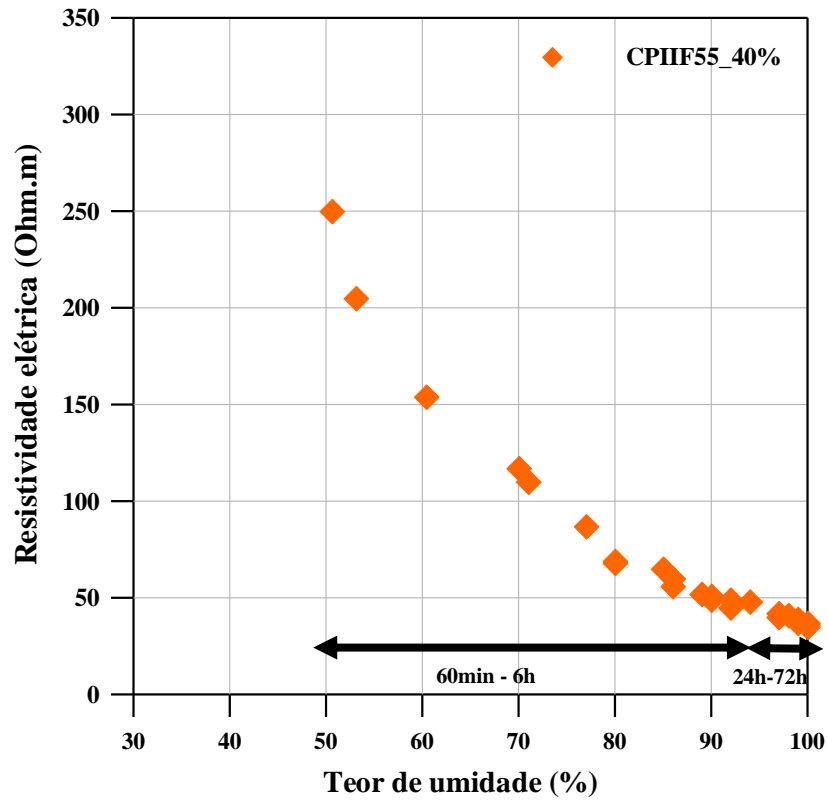


Figura 43 Teor de umidade x Resistividade elétrica da mistura CPIIF55_40%

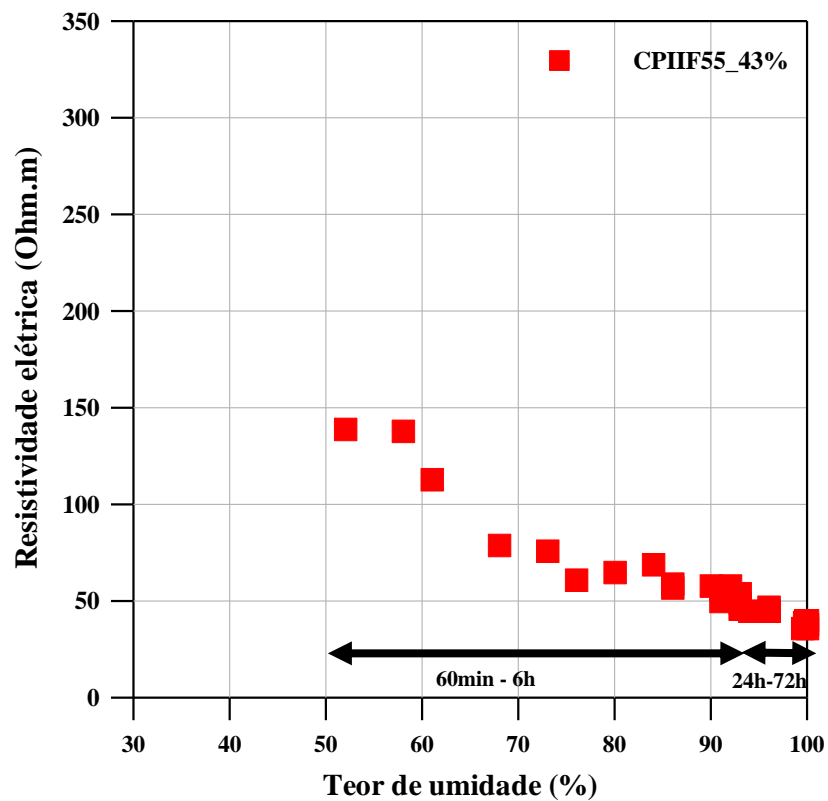


Figura 44 Teor de umidade x Resistividade elétrica da mistura CPIIF55_43%

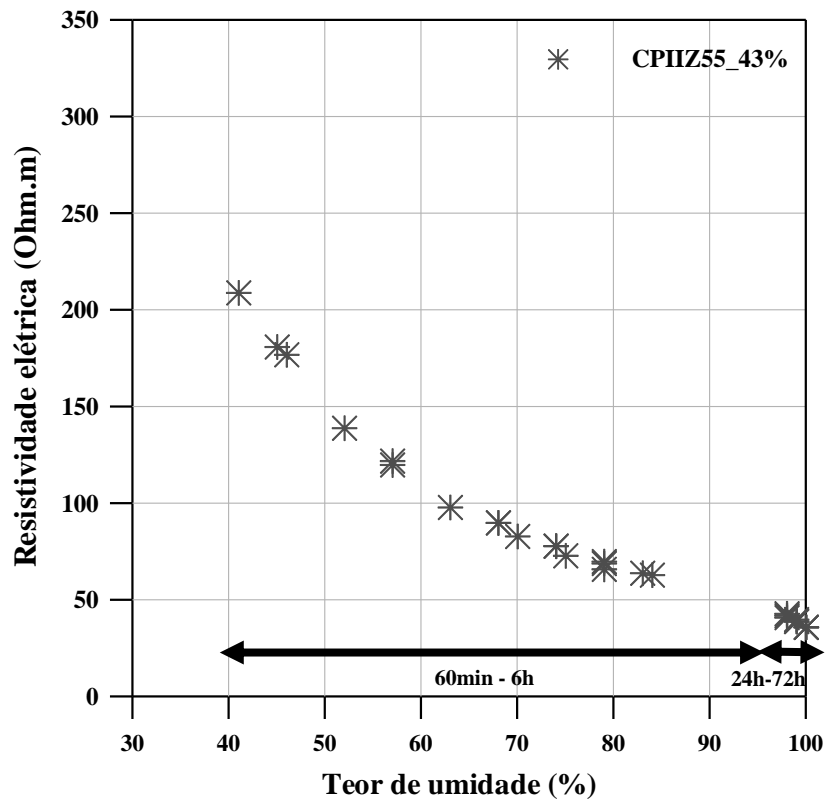


Figura 45 Teor de umidade x Resistividade elétrica da mistura CPHZ55_43%

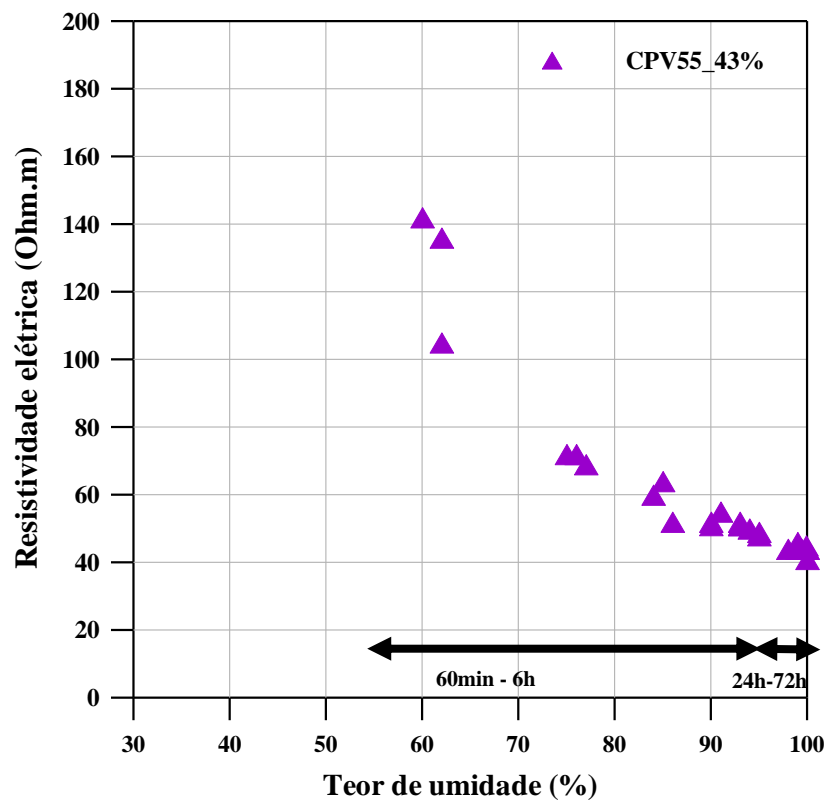


Figura 46 Teor de umidade x Resistividade elétrica da mistura CPV55_43%

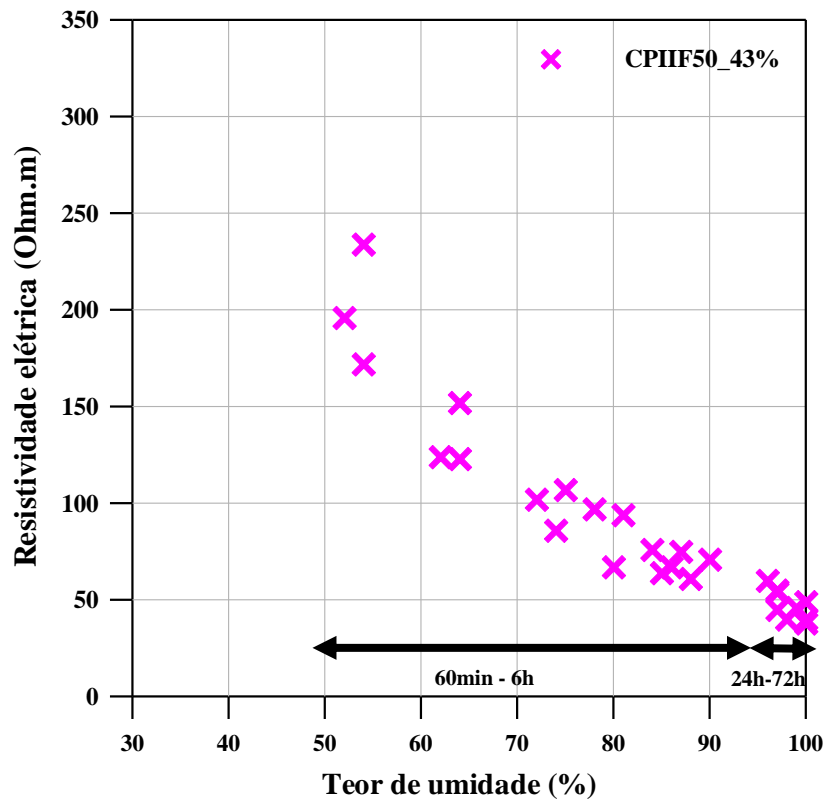


Figura 47 Teor de umidade x Resistividade elétrica da mistura CFIIF50_43%

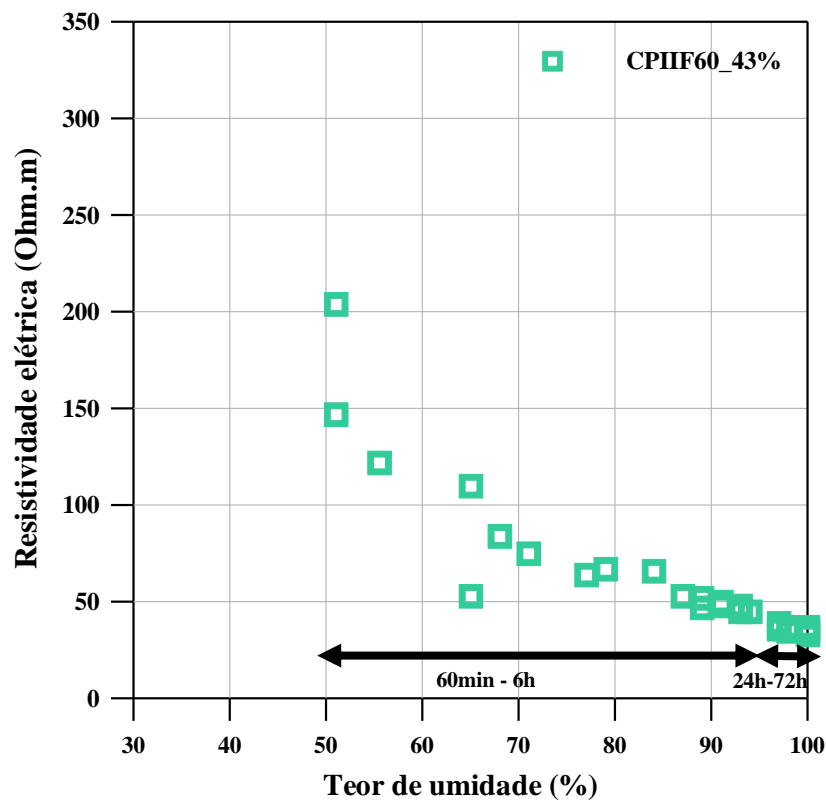


Figura 48 Teor de umidade x Resistividade elétrica da mistura CFIIF60_43%

Com uma correlação inversamente proporcional, a resistividade elétrica do concreto diminuiu quando o teor de umidade aumentou, e variou entre 35 a 326 $\Omega.m$, como pode ser visto nas Figuras 42 a 48. Em um teor de umidade de 36%, a mistura CPIIF55_46% (Figura 42) atingiu à uma resistividade elétrica de 326 $\Omega.m$, enquanto, concretos como CPIIF60_43% (Figura 48), atingiu uma resistividade elétrica de 202 $\Omega.m$ com 51% de umidade nos primeiros 60 minutos de avaliação. Provavelmente por uma absorção mais rápida nesses concretos assim que houve a imersão em água, e devido à mobilização dos íons, de forma diferente em cada tipo de concreto, após retirado da estufa. Logo, o observado foi que quando as amostras foram colocadas em saturação, o maior aumento no percentual de teor de umidade ocorreu na primeira hora de molhagem, e isto possibilitou as medidas de resistividade elétrica. Ao dar continuidade as medições, que foram feitas em cada avanço de 1 hora, houve aumento no teor de umidade e consequente redução na resistividade, até ser atingida as 72 horas completas de imersão.

O acentuado aumento no teor de umidade na primeira hora de saturação dos concretos deve-se ao fato que provavelmente as amostras estavam totalmente secas após as 24 horas em estufa a 100°C, e como a maior parte da condutividade é transportada pelo fluido presente nos poros do concreto, estes são eletricamente condutores, fato que também foi observado por Charmch (2015) e Elkey e Sellevold (1995), realizado de forma inversa.

Ainda, observando os dados das Figuras 42 a 48, é verificado que a partir do espaço de tempo entre 24 horas até 72 horas, houve uma faixa mínima de mudança nos valores de resistividade em todas misturas que foram analisadas. A acentuada evolução no grau de saturação logo nas primeiras 24 horas possibilitou um percentual maior que 90% de umidade nos concretos. Lopez e Gonzalez (1993) observaram característica semelhante em seu estudo, no entanto, os concretos analisados pelos autores seguiram do estado saturado para o estado seco, dessa forma, os valores de resistividade mudaram dentro de uma faixa estreita quando o nível de saturação dos poros variava entre 60 e 100%. Então, entre 60 e 30%, a resistividade apresentou um limite correspondente a um nível de saturação em que a medição foi impossibilitada.

A relação apresentada no estudo condiz com o que indica a literatura. Whiting e Nagi (2003) relataram que a resistividade elétrica do concreto é função da mobilidade e concentração dos íons na solução aquosa dos poros. Assim, a corrente elétrica flui através da água contida nos poros dos concretos, e o teor de umidade do concreto assume uma

grande influência na resistividade elétrica, pois o seu aumento implica na diminuição da mesma. Segundo Lopez e Gonzalez (1993), o grau de saturação dos poros do concreto determina o mecanismo da corrosão. Conclui-se que o ensaio da resistividade elétrica é fundamentalmente importante na investigação da taxa corrosiva dos concretos e altamente influenciada pelo teor de umidade.

4.3.6 Efeito da dimensão dos corpos de prova na resistividade elétrica

Esta seção apresenta os resultados do efeito da dimensão dos corpos de prova na resistividade elétrica dos concretos. No entanto, os corpos de prova analisados aqui seguem como segunda etapa das misturas – CPIIF55_46%, CPIIF55_43% e CPIIF55_40%. Após análise do teor de agregado graúdo na resistividade elétrica aos 28 dias, avaliou-se os mesmos corpos de prova seccionados em 3 níveis de dimensões para análise complementar aos 56 dias.

A Tabela 19 exibe os resultados médios de resistividade elétrica por cada seção de amostra dos concretos, bem como os coeficientes de variação de todas misturas estudadas.

Tabela 19 Resultados médios de resistividade elétrica por seção da amostra

Mistura	100 x 200 mm		100 x 100 mm		100 x 50 mm	
	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)	Média	C.V. (%)
CPIIF55_40%	49	2,2	51	3,8	69	9,8
					53	9,0
			56	2,5	52	1,6
					78	10,3
CPIIF55_43%	50	2,5	50	2,4	74	6,8
					64	15,9
			58	1,5	68	2,8
					79	11,4
CPIIF55_46%	55	3,1	56	3,8	82	4,1
					66	10,2
			55	7,5	69	5,4
					81	7,5

Em face dos resultados apresentados na Tabela 19, verificou-se a importância de estudar quanto à homogeneidade dos concretos produzidos. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a variação da resistência mecânica de um concreto em um mesmo elemento também está ligada aos fatores de lançamento, adensamento, dimensões de agregados, geometria e condições de fôrma, entre outros. Diante disso, Lopes (2014) acrescentou que uma boa

estratégia para realização de ensaios de resistência à compressão em estruturas já existentes, é fazer um mapeamento prévio para avaliação da homogeneidade do concreto com utilização de ensaios não destrutivos (ensaios de pulso ultra-sônico, de esclerometria, penetração de pinos, etc.), de forma a caracterizar as regiões que apresentam propriedades semelhantes, visando uma resposta rápida e econômica antes da realização de ensaios destrutivos. Neste caso, a utilização de ensaios como resistividade elétrica também demonstram ser uma importante ferramenta para ser utilizada em tais situações.

Foi possível observar, conforme Tabela 19, que houve uma maior alteração nos resultados de resistividade elétrica da dimensão 100 x 50mm em todas as misturas, isso deve-se provavelmente a uma perda de homogeneidade do concreto em algumas seções da amostra, além disso, também pode estar atrelado ao fato que ao subdividir a amostra (100 x 200mm) em quatro faces pode ter havido diferenças na superfície de contato com o equipamento de leitura. A Figura 49 mostra a aparência de variadas amostras de concreto seccionadas na dimensão 100 x 50 mm.

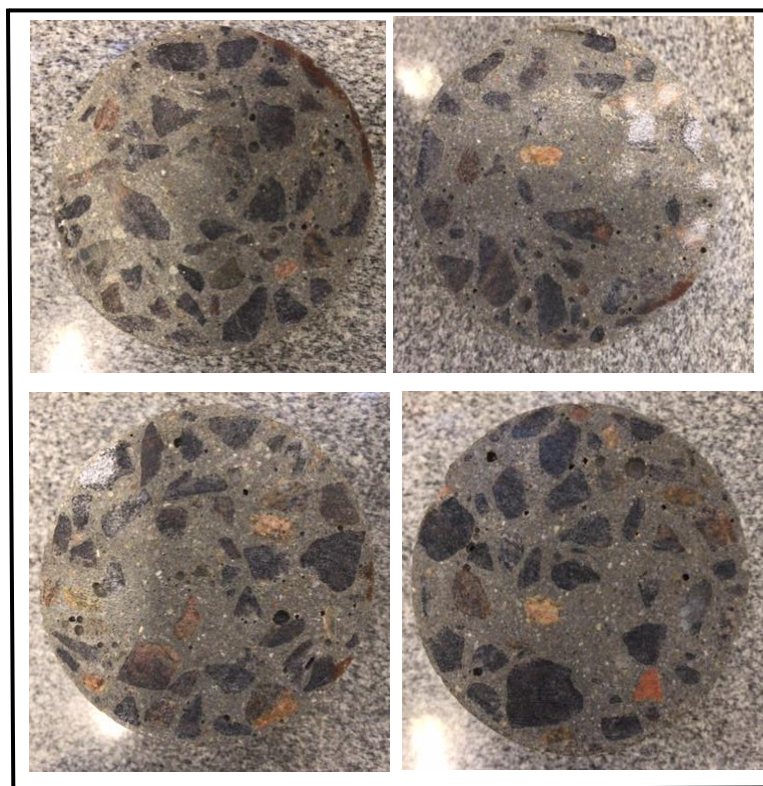


Figura 49 Corpos de prova em dimensão 100 mm x 50 mm para avaliação da resistividade elétrica quanto à homogeneidade dos concretos

Contudo, com os resultados já apresentados anteriormente neste trabalho, quanto a essas mesmas misturas aos 28 dias, há uma relação que indica que, quanto maior o teor de brita, maior a resistividade elétrica dos concretos.

Essa relação pode ser utilizada de forma experimental e empírica para explicar os resultados atrelados à homogeneidade dos concretos produzidos. Observou-se que em relação à mistura CPIIF55_40%, provavelmente houve uma maior concentração de pasta de cimento nas seções devido às resistividades mais baixas. Com relação à mistura CPIIF55_43%, pode-se observar que há uma maior proximidade nos quatro resultados apresentados (Tabela 19), ou seja, há uma indicação de melhor homogeneidade da mistura por todo elemento. O traço, qual feito como referência para os demais, pode ter apresentado quantidade regular de pasta e agregados. Quanto à mistura CPIIF55_46% foi possível inferir que há um pequeno excesso de agregado graúdo que influenciou nas resistividades elétricas das seções externas das amostras, principalmente. Apesar de todas as quatro seções apresentarem uma melhora nas resistividades dos espécimes em relação à dimensão 100 x 200 mm da mesma mistura e também quanto as demais.

Como mencionado, a continuidade do aumento na resistividade elétrica dos concretos nas misturas com maior teor de agregado já era um comportamento esperado. De forma resumida, Sengul (2014), Princigallo *et al.* (2003) e Hou *et al.* (2017) relataram que um menor volume de agregados na composição dos concretos pode ocasionar uma diminuição da resistividade elétrica do mesmo, pois a condução elétrica ocorrerá essencialmente pela pasta de cimento, já ao contrário, um maior volume pode possibilitar um aumento na resistividade, em virtude das resistividades mais altas dos agregados. Dessa forma, essa etapa experimental confirma os resultados já expostos no item 4.4.3.

Em se tratando da análise referente as dimensões das amostras ensaiadas, com estes resultados também foi possível confirmar a aparente sensibilidade que a geometria da amostra possui em relação aos resultados de resistividade elétrica. Até então, análises do formato geométrico só eram validadas em estudos com o método dos quatro pontos – sonda Wenner (GHOSH; TRAN, 2015; GOWERS; MILLARD, 1999; SENGUL, 2014).

É importante ressaltar a influência do fator de forma (ou constante de célula) utilizado nos cálculos de resistividade elétrica. Para método direto, encontra-se o fator de forma mencionado conforme Equação 12:

$$F_f = \frac{S}{L} \quad (12)$$

Onde: S é a área da seção transversal perpendicular à corrente (m^2); L é a altura do corpo de prova (m).

Nesta etapa experimental, o fator de forma (m) utilizado foi de 0,0399-0,0406 para a geometria 100 mm x 200 mm. Entre 0,0789 – 0,0833 para a geometria 100 mm x 100 mm. Entre 0,1580-0,1817 para as amostras com 100 mm x 50 mm (largura x altura). O aumento do valor com a diminuição da amostra, mostra que há uma influência direta desses valores nos resultados de resistividade elétrica pelo método direto, pois a mesma é proveniente do produto da resistência encontrada pelo fator de forma condicionado a cada amostra (Equação 13):

$$\rho_e = F_f \cdot R_e \quad (13)$$

Onde: ρ_e é a resistividade elétrica do concreto ($\Omega.m$); F_f é o fator de forma obtido (m); e , R_e é a resistência elétrica calculada (Ω).

A Figura 50 apresenta a evolução da resistividade elétrica com a diminuição do formato geométrico.

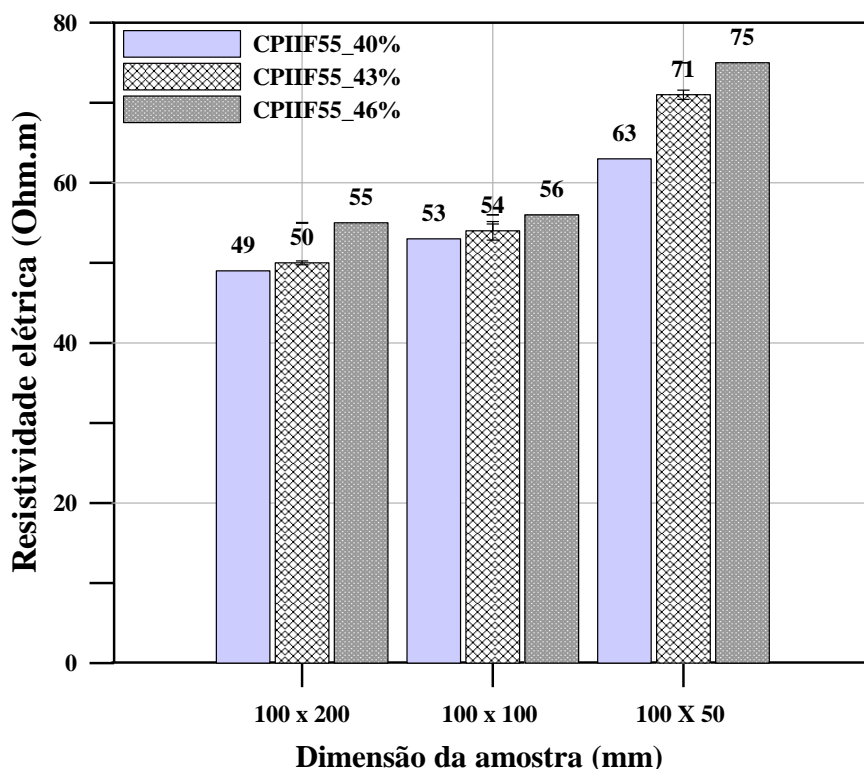


Figura 50 Efeito da dimensão da amostra

Com base na Figura 50, é verificado um aumento de até aproximadamente 30% em relação ao ganho de resistividade para as menores dimensões. Ghosh e Tran (2015) e Chen, Chang e Yeih (2014) também perceberam a mesma influência do tamanho do espécime nos resultados, com ganhos de 17% a 63%.

A Tabela 20 apresenta o parâmetro de ensaio que indica a correlação entre a razão das amostras cilíndricas de 100 mm x 50 mm e 100 mm x 200 mm, e a razão entre as amostras cilíndricas de 100 mm x 50 mm e 100 mm x 100 mm, provenientes deste estudo.

Tabela 20 Relação entre duas resistividades obtidas pelo método direto em diferentes dimensões de amostras cilíndricas

EQUAÇÃO	CPIIF55_40%	CPIIF55_43%	CPIIF55_46%	RELAÇÃO
$\frac{\rho_{(100mm \times 50mm)}}{\rho_{(100mm \times 200mm)}}$	1,29	1,42	1,36	1,36
$\frac{\rho_{(100mm \times 50mm)}}{\rho_{(100mm \times 100mm)}}$	1,19	1,31	1,34	1,28

4.3.7 Efeito do nível de fissuração da amostra na resistividade elétrica

As estruturas de concreto são projetadas para atuar sob tensão. Dessa forma, a resistividade elétrica de testemunhos de concreto podem sofrer o efeito de microfissuras que tenham surgido no concreto.

Nessa etapa experimental, o efeito da aplicação de tensões ao concreto na resistividade elétrica foi avaliado para a mistura CPIIF60_43% em quatro ciclos de carregamento, como já explicado no item 3.4.1.4 deste trabalho. Os resultados médios de resistividade elétrica pelo método direto ($\Omega.m$) e tensões (MPa) alcançadas de acordo com a força (kN) aplicada em cada ciclo são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 Resultados médios de resistividade elétrica pelo método direto sob o efeito de carregamentos de tensão

	-	1		2		3		4	
	0%fc	19%fc		31% fc		44%fc		57%fc	
	Média	Média	C.V.%	Média	C.V.%	Média	C.V.%	Média	C.V.%
Tensão (MPa)	0	3,85	1,6	6,39	1,5	8,93	1,2	11,5	1,6
R.E. ($\Omega.m$)	44,0	44,0	3,6	43,7	3,8	42,6	1,3	42	1,9

Os resultados de resistividade elétrica verificados de acordo com a Tabela 21 mostram que ao longo da aplicação do carregamento sobre as amostras de concreto há uma pequena

diminuição da resistividade, isso deve-se provavelmente aos carregamentos aplicados em baixos níveis de tensão. Logo, estabelecendo-se uma relação com o diagrama apresentado por Mehta e Monteiro (2006) – Figura 29, verifica-se que após a aplicação de todos percentuais de carregamento, o comportamento do concreto em estudo avançou, dentre os estágios apresentados, até apenas ao início do Estágio 3 (ver Figura 51).

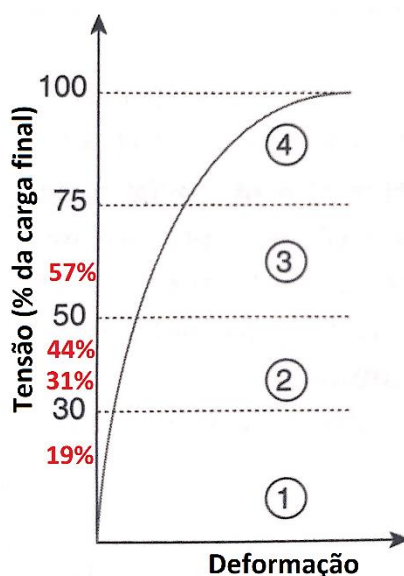


Figura 51 Relação apresentada por Mehta e Monteiro (2006) e os percentuais de carregamento do estudo (Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2006))

Acima de 50% da carga final (estágio 3), conforme Coutinho e Gonçalves (1994) e Mehta e Monteiro (2006) há formação de fissuras na matriz, que podem ocasionar mudanças na estrutura do concreto. Os resultados do estudo indicaram uma diferença menor que 5% na resistividade elétrica entre o primeiro e quarto ciclo de descarga, entre as médias da mistura CPIIF60_43% apresentadas. E não houveram fissuras visíveis nas amostras ensaiadas. Provavelmente, o carregamento aplicado pode ter ocasionado apenas a presença de pequenas fissuras na matriz da pasta de cimento e/ou afetado a zona de transição, onde as microfissuras tendem a se propagar de forma mais facilitada. Estudos mais aprofundados sobre a microestrutura desses concretos poderiam explicar melhor a relação.

Autores como Le e Kim (2017), Vesely *et al.* (2015) e Ranade *et al.* (2014) afirmaram que quanto maior for a abertura de fissuras, maior fluxo de corrente elétrica pode ser proporcionada à estrutura. Não há diferença significativa na resistividade elétrica quando

as fissuras não são visíveis, incluído ao fato que o aumento no comprimento de fissuras pode proporcionar a entrada de agentes agressivos ao concreto e isto somado a um teor de umidade relativamente alto que implica em resistividades mais baixas. Ainda em processo de desenvolvimento, conforme Lataste *et al.* (2013), entende-se que o emprego da resistividade elétrica como forma de avaliação da durabilidade de estruturas é importante, devido à possibilidade de caracterização de danos no concreto quanto à presença de trincas e fissuras.

A Figura 52 apresenta os perfis das curvas tensão-deformação de cada ciclo do ensaio realizado:

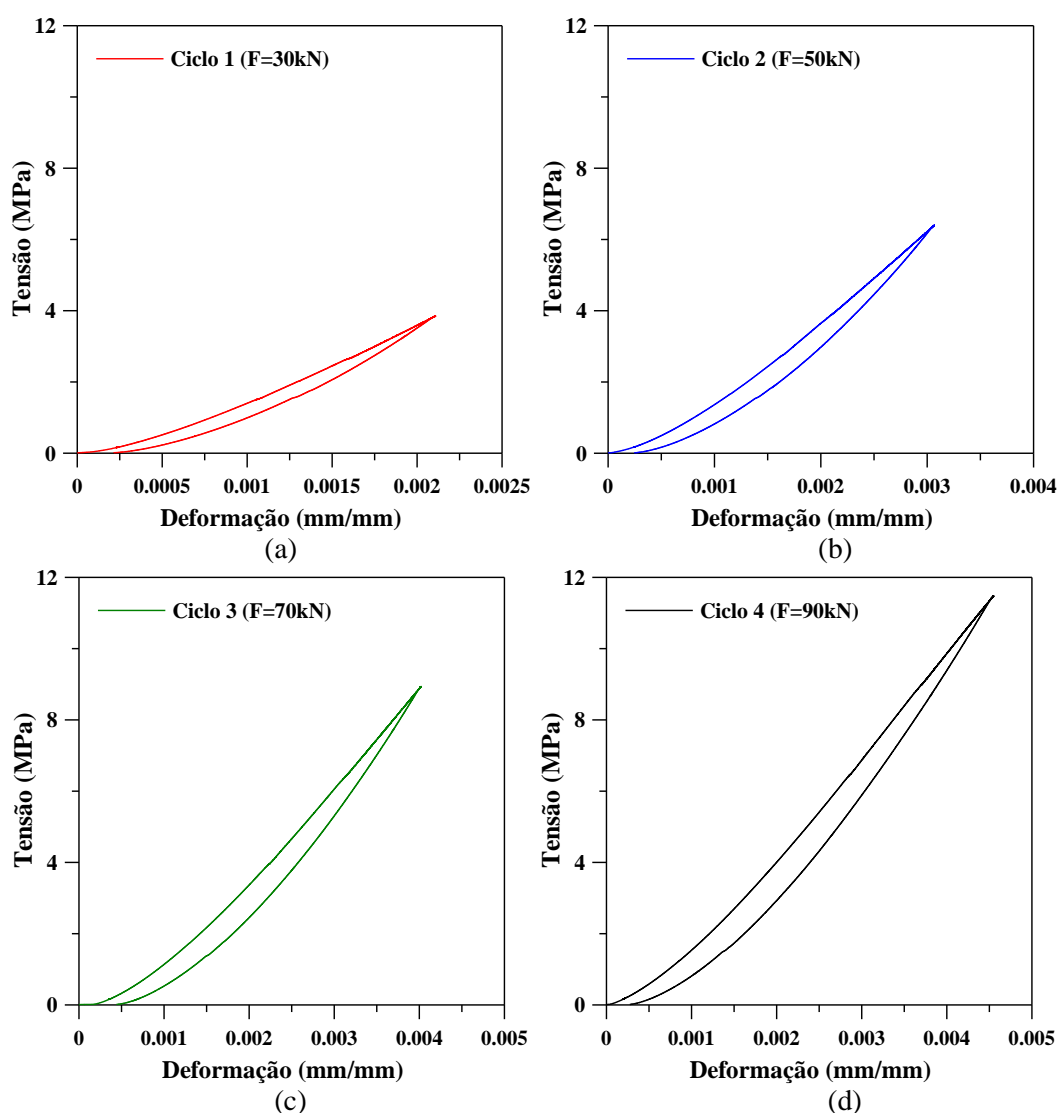


Figura 52 Perfis das curvas tensão-deformação. a) Ciclo 1, b) Ciclo 2, c) Ciclo 3 e d) Ciclo 4

Conforme observado na Figura 52, é visível o avanço na deformação do concreto ao longo da aplicação do carregamento. No entanto, a deformação do material não seguiu até a

falha, pois apresentar que estruturas pré-tensionadas podem manter a resistividade elétrica, até um certo nível, mesmo que em concretos com resistência à compressão mais baixas, foi a intenção do estudo.

Apesar do método direto utilizado não ser muito indicado para medidas em campo, conforme Layssi *et al.* (2015) relataram, há possibilidade da extração de testemunhos da estrutura que possibilitam uma continuidade maior de investigação. Como o seu procedimento envolve a ultrapassagem de corrente por toda amostra, este pode ser um método bastante viável para detecção quanto à presença de fissuras internas.

4.3.8 Correlação com a resistência à compressão axial

A Figura 53 indica a correlação entre as médias dos resultados de resistividade elétrica obtida pelo método direto e a resistência à compressão axial dos concretos, aos 28 dias de idade.

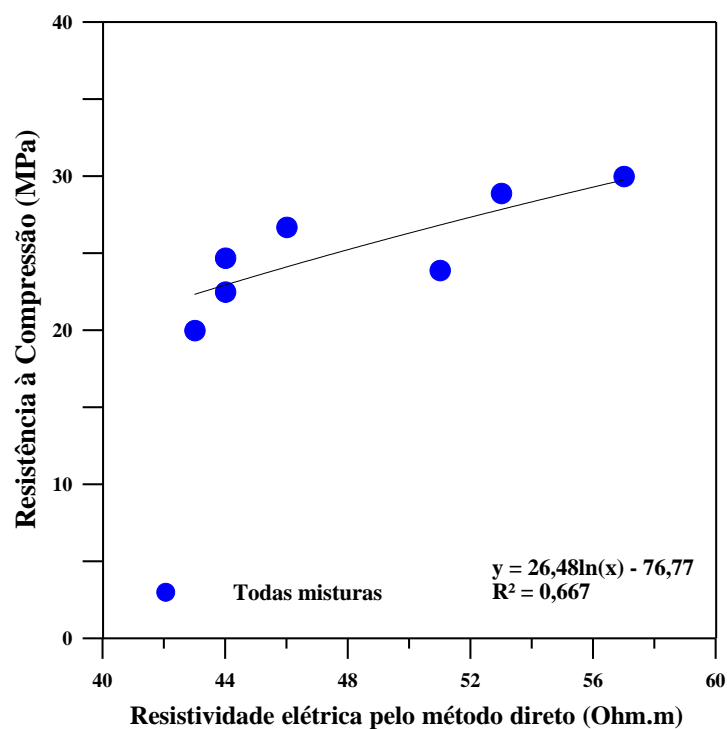


Figura 53 Relação entre a resistência à compressão e a resistividade elétrica pelo método direto de todas misturas

Conforme observado na Figura 53, há uma tendência de correlação logarítmica entre resistência mecânica e resistividade elétrica que, em geral, quanto maior a resistência dos concretos mais alta a resistividade obtida pelos mesmos. A correlação ajustada a relação

foi do tipo logarítmica, no entanto, como as diversificadas misturas (diferentes tipos de cimento, relações água/cimento e teor de agregado) encontra-se no mesmo gráfico, o ajuste apresentou um R^2 igual a 0,667.

A relação entre resistência à compressão axial e resistividade elétrica foi citada por alguns autores, como Mendes *et al.* (2018), Medeiros-Junior (2014), Andrade e D'Andrea (2011). Onde foi relatado que a resistividade elétrica aumenta conforme o aumento de resistência à compressão dos concretos, o que de forma geral também foi observado por este estudo.

Entre a correlação destas duas propriedades, alguns destes autores também demonstram as curvas logarítmicas como melhor ajuste. No entanto, estes autores analisaram a resistividade pelo o método superficial. Medeiros-Junior (2014), por exemplo, encontrou uma configuração semelhante a apresentada por este estudo. O autor correlacionou os resultados em gráficos para cada tipo de cimento utilizado em sua pesquisa. Que pode ser observada na Figura 54, quanto às curvas relacionadas ao CII-F32.

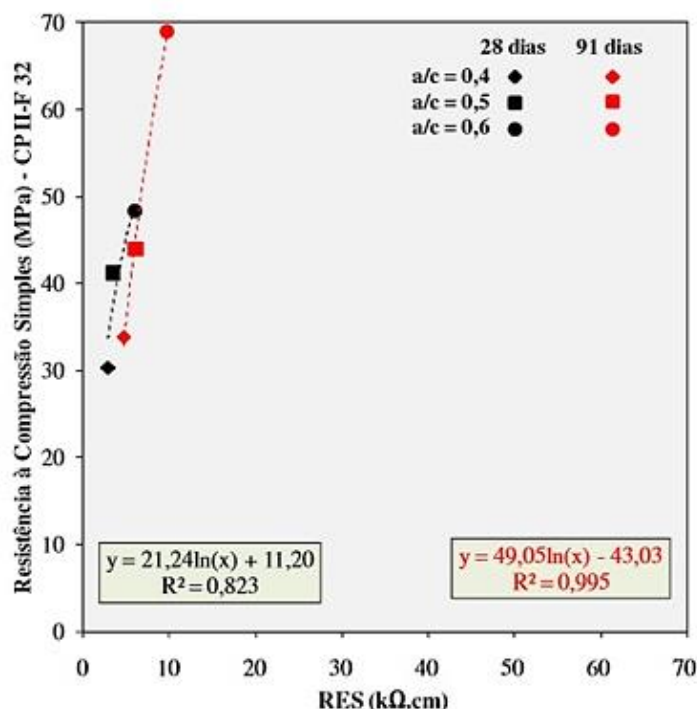


Figura 54 Relação entre resistência à compressão e resistividade elétrica superficial por Medeiros-Junior (2014)

4.3.9 Correlação com o módulo de elasticidade

A Figura 55 indica a correlação entre as médias obtidas de resistividade elétrica pelo método direto e o módulo de elasticidade, aos 28 dias de idade.

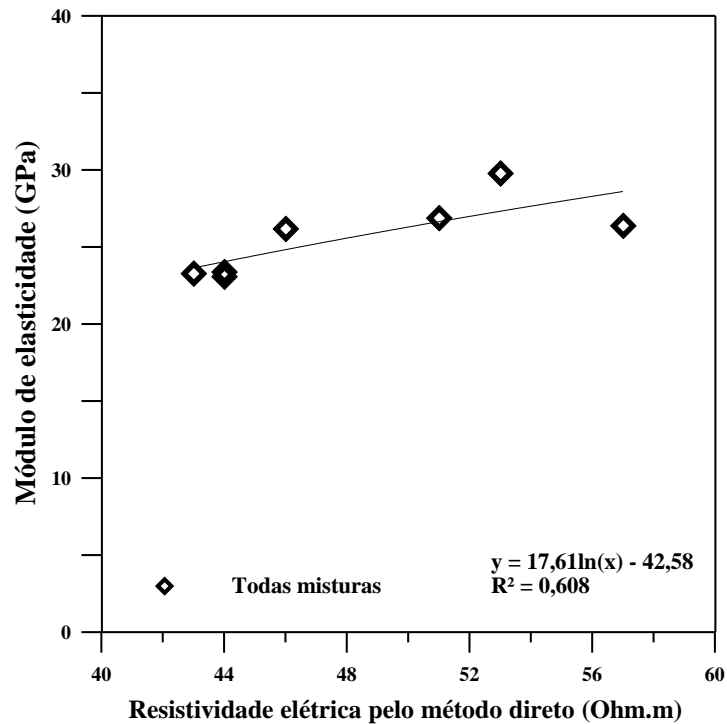


Figura 55 Relação entre o módulo de elasticidade e resistividade elétrica pelo método direto de todas as misturas

Ao observar a Figura 55 verifica-se outra tendência logarítmica, encontrada entre o módulo de elasticidade e a resistividade elétrica medida através do método direto, assim como na relação da resistência à compressão.

A curva indica, em geral, um avanço na continuidade da deformação com o avanço nos resultados de resistividade. No entanto, seria necessária uma maior quantidade de amostras para melhor observação e informações mais precisas. Pois alguns valores tiveram uma maior discrepância sobre outros.

Hongyu *et al.* (2015) haviam verificado em seu estudo a existência de uma relação não-linear entre o módulo de elasticidade e a resistividade do concreto. Os autores indicam que é possível utilizar os valores de resistividade para prever o módulo de elasticidade do concreto, especialmente em estágios iniciais, porém mais experimentos precisam ser

realizados para confirmar esta hipótese, pois dois ensaios utilizados por métodos não destrutivos (módulo e resistividade) podem ser combinados da melhor forma. Um dos gráficos obtidos pelos autores é exibido na Figura 56.

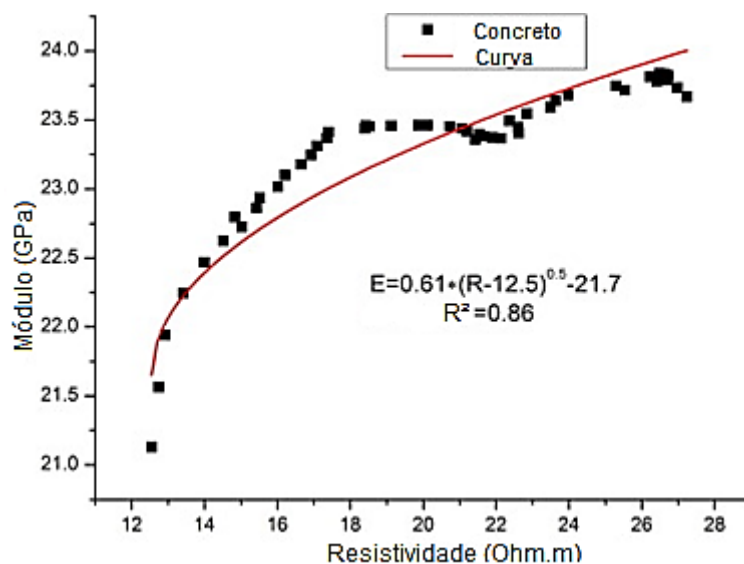
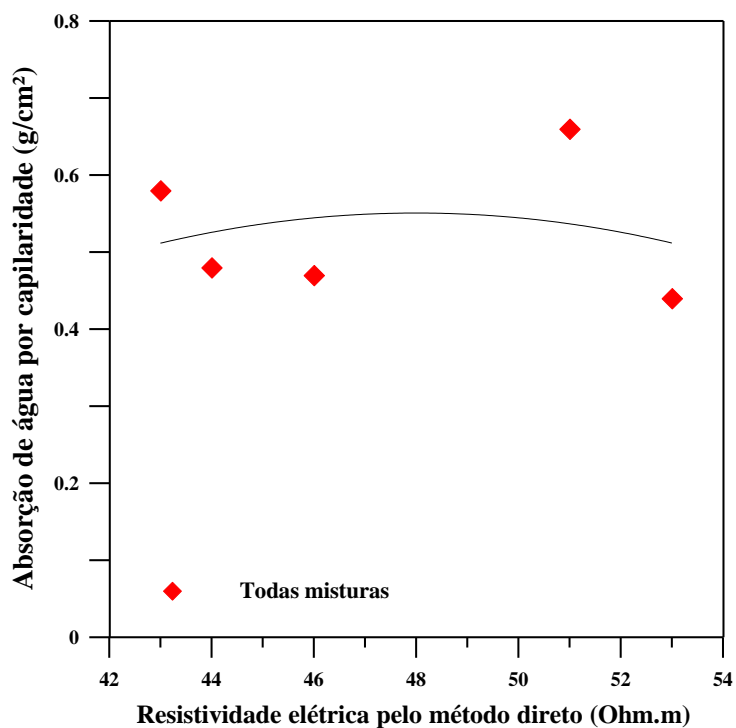


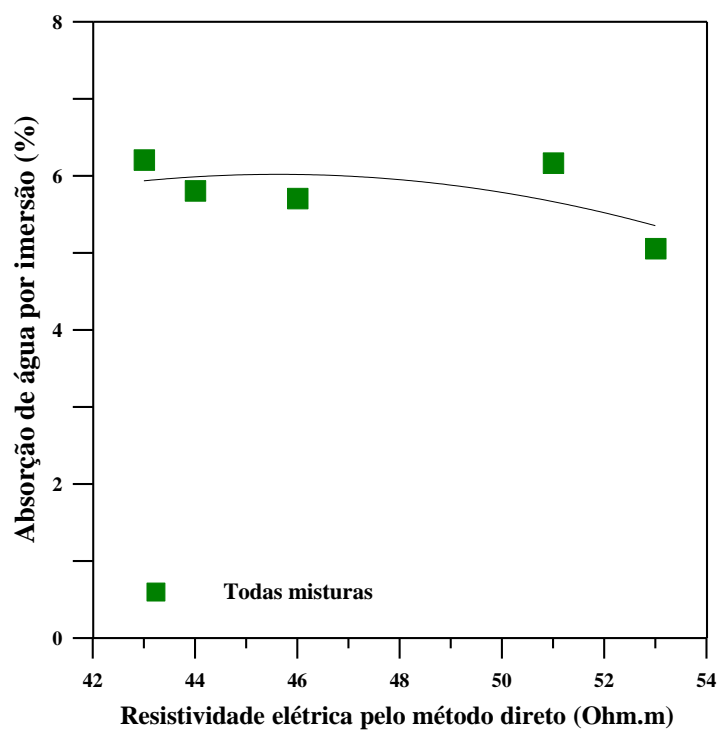
Figura 56 Relação entre módulo de elasticidade e resistividade elétrica por Hongyu *et al.* (2015)

4.3.10 Correlação com a absorção de água do concreto

A Figura 57 indica a correlação encontrada entre as médias dos resultados de resistividade elétrica do concreto obtida pelo método direto e as médias dos resultados de absorção de água por capilaridade e por imersão, propriedades físicas obtidas aos 28 dias de idade.



(a)



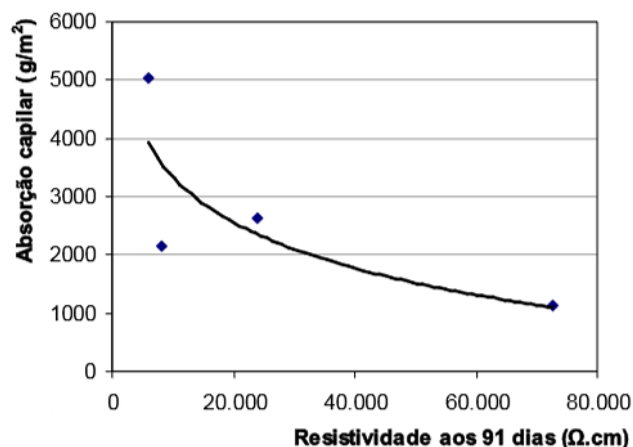
(b)

Figura 57 Relação entre a absorção de água e a resistividade elétrica pelo método direto. a) absorção por capilaridade, b) absorção por imersão

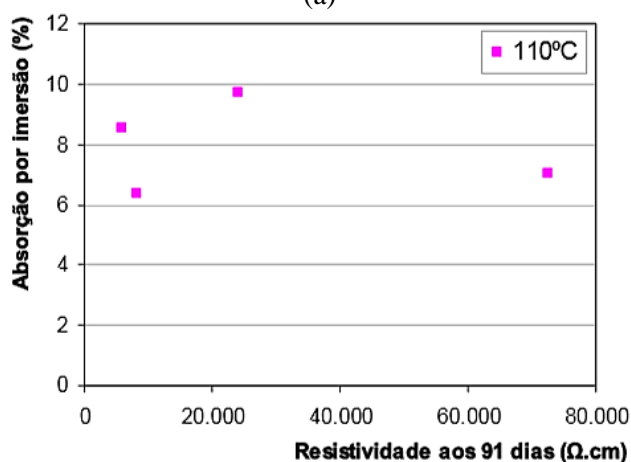
A tendência apresentada na Figura 57 exibe que a resistividade elétrica aumentou com a diminuição da absorção, tanto para capilaridade quanto para imersão. O melhor ajuste encontrado para ambos foi obtido pela curva polinomial.

A resistividade elétrica é diretamente influenciada pela configuração dos poros da microestrutura dos concretos, fato que também explica os resultados de absorção de água. No entanto, os resultados não se apresentaram de forma tão clara na correlação que se deve principalmente à absorção de água por capilaridade (Figura 57a), provavelmente como o ensaio de absorção capilar não imerge totalmente os corpos de prova em água, as amostras não atingem resultados precisos para o comparativo com a resistividade elétrica, além do que, há uma necessidade de mais amostras.

Santos (2006) também encontrou resultado semelhante, com informações não muito definidas obtidas pelo gráfico de absorção por imersão x resistividade. No entanto, com uma tendência de redução, de forma geral, apresentada pelos dois ensaios, a autora identificou uma relação proporcional entre estas duas propriedades, como pode ser vista na Figura 58. Importante ressaltar que a autora utilizou o mesmo procedimento deste estudo para medidas de resistividade elétrica dos concretos.



(a)



(b)

Figura 58 Relação entre absorção de água e resistividade elétrica pelo método volumétrico por Santos (2006). a) absorção capilar, b) absorção por imersão

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta dissertação teve como objetivo avaliar a influência de composições de misturas e parâmetros de ensaio com a utilização do método direto de resistividade elétrica dos concretos. Com base nos resultados e discussões do estudo podem ser retiradas as seguintes conclusões:

- Ao efetuar a calibração do equipamento de resistividade elétrica pelo método direto, para que fosse possível o seu uso no procedimento experimental deste trabalho, foi correlacionado dois métodos de ensaio: método dos quatro pontos (sonda Wenner) e o método direto apresentado. Tal correlação exibiu uma tendência linear entre os resultados, foi verificado um aumento da resistividade superficial de 1,89 vezes em relação aos resultados obtidos pelo método direto, e um coeficiente de determinação (R^2) de 0,96. Esse processo determinou o andamento do trabalho.
- Quanto à influência do tipo de cimento na resistividade elétrica, a utilização do cimento Portland CPV-ARI foi superior aos demais cimentos analisados. Houve um acréscimo de 19% em relação ao concreto com utilização do CPII-F-32, aos 28 dias e de 25% aos 56 dias. E um acréscimo de 23% em relação aos concretos com utilização do CPII-Z-32 aos 28 dias e de 18% aos 56 dias.
- Os resultados relativos ao efeito da relação água/cimento na resistividade elétrica dos concretos demonstraram que a resistividade aumentou quando a relação a/c do concreto diminuiu, constatação atribuída a uma diminuição da porosidade. Tendência comprovada em consenso com estudos já realizados de resistividade elétrica em qualquer que seja o método de medida utilizado.
- O teor de agregado graúdo não alterou as propriedades mecânicas e físicas dos concretos, mas atuou como uma barreira elétrica, ocasionando o aumento na resistividade devido ao maior teor utilizado. A visibilidade desse comportamento foi melhor evidenciada nas médias entre os teores de 40% e 46% de brita, em que uma diferença de 6% no volume de agregado, propiciou um aumento de 19% na resistividade elétrica. Isso demonstra que a resistividade é sensível a inclusão de agregados graúdos na mistura e sugerindo que uma maior proporção poderia elevar sua resistividade.

- Quanto à influência do teor de umidade dos concretos, foi evidenciado que a resistividade elétrica do concreto diminuiu quando o teor de umidade aumentou. Confirma-se que a resistividade é muito sensível ao teor de umidade do concreto, pois a mesma atua em função do fluxo de corrente elétrica através da água contida nos seus poros. No entanto, as medições de resistividade não puderam ser realizadas em níveis menores que 36%. Em todos os concretos estudados, houveram aumentos expressivos no teor de umidade na primeira hora de imersão em água e sucessivas reduções da resistividade elétrica com o aumento do período de leitura (horas).
- A análise da resistividade em variadas dimensões da amostra mostrou que quanto menor a geometria maior o incremento da resistividade. Concluiu-se também que, ao aumentar o teor de agregado graúdo na produção dos concretos, houve um aumento na sua resistividade elétrica que continuou aos 56 dias. Além disso, esta análise mostrou servir como uma boa estratégia para avaliação da homogeneidade do concreto com a utilização de ensaios não destrutivos como uma forma de mapeamento prévio de estruturas de concreto.
- O efeito dos níveis de fissuração contribuiu para a redução da resistividade elétrica, no entanto, foi verificado que não há diferença significativa na resistividade elétrica quando as fissuras não são visíveis.
- A resistividade elétrica obtida pelo método direto apresentou correlação com as propriedades mecânicas dos concretos – resistência à compressão e módulo de elasticidade. A análise feita aos 28 dias de cura para as duas relações mostrou uma tendência logarítmica entre os resultados.
- A correlação da absorção de água dos concretos com a resistividade elétrica obtida pelo método direto não apresentou uma definição muito clara, apesar da tendência de diminuição observada tanto na absorção de água por capilaridade, quanto por imersão, quando houve aumento na resistividade.
- Ao relacionar os métodos de ensaio, verificou-se que o método de Wenner (superficial) apresenta valores maiores de resistividade, que diferem do método direto, para um mesmo espécime, isto é explicado pela forma com que estes procedimentos são realizados. No método direto, a corrente elétrica proveniente do equipamento, ultrapassa por todo o corpo de prova e consegue penetrar toda (ou quase toda) rede de poros.

Após análises, pode-se dizer que a realização de ensaios de resistividade elétrica, através de diferentes métodos, propõe um entendimento sobre o risco de corrosão dos concretos. Com esse estudo, identifica-se a necessidade de novas pesquisas com a utilização do método exposto, além disso, sugere-se uma relação que possibilita verificar a análise do risco de corrosão de concretos com valores de resistividade elétrica obtidos pelo método direto (Tabela 22) – em consonância com o método superficial pelo CEB 192 (1989). Importante ressaltar que estes valores foram determinados em condições de laboratório.

Tabela 22 Risco de corrosão baseado na resistividade elétrica pelo método direto

Resistividade elétrica ($\Omega.m$)	Possibilidade de corrosão
> 106	Desprezível
53 – 106	Baixa
26 – 53	Alta
< 26	Muito alta

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao final desta pesquisa, foi identificada a necessidade de se avaliar alguns temas que são sugeridos a seguir, como trabalhos futuros:

- Influência da carbonatação dos concretos na resistividade elétrica obtida pelo método direto;
- Efeito da agressão por íons cloretos e sulfatos nos concretos na resistividade elétrica obtida pelo método direto;
- Influência da dimensão da amostra na avaliação da resistividade elétrica: comparativo entre concreto, argamassa e pasta de cimento;
- Caracterização de danos no concreto devido ao surgimento de fissuras com a utilização da resistividade elétrica.

REFERÊNCIAS

- AASHTO TP 95. **Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration Surface**, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, p. 1–8, 2015.
- ABREU, A. G. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. Porto Alegre. 1998. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- ALMEIDA, H. **Convenção para reduzir a utilização de mercúrio é assinada por 140 países**. 2013. Disponível em: <://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/convencao-reduzir-utilizacao-mercuro-assinada-140-paises/>. Acesso em: 09 fev. 2019.
- ANDRADE, C. Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcements by using the electrical resistivity. **International Symposium: Advances in Concrete through Science and Engineering**, v. 1, p. 1–8, 2004
- ANDRADE, C.; D'ANDREA, R.; CASTILLO, A.; CASTELLOTE, M. The Use of Electrical Resistivity as NDT Method for the Specification of the durability of Reinforced Concrete. **NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes**, France, 2009.
- ANDRADE, C.; D'ANDRÉA, R. La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. **Revista ALCONPAT**, v. 1, n. 2, p 90-98, 2011.
- ARRUDA, A. M. **Módulo de elasticidade de concretos produzidos com formações rochosas do triângulo mineiro**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (AENOR). **UNE-83988-1**: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 1: Método directo (método de referencia). Madrid, 2008.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (AENOR). **UNE-83988-2**: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner. Madrid, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211**: Agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica por. Rio de Janeiro, 2012.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11578:** Cimento Portland composto – especificações. Rio de Janeiro, 1991- versão corrigida 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9204:** Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica-volumétrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522:** Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45:** Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 46:** Agregado miúdo - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 49:** Agregado fino – Determinação de impurezas Orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 51:** Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da Massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 67:** concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 7809:** Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. **Advances in Materials Science and Engineering**, p. 0–30, 2017.

BANEA, P.I. I. **Study of Electrical Resistivity of Mature Concrete**. MSc Thesis. Faculty of Civil Engineering and Geosciences. Delft University of Technology, 2015.

BENACHOUR, Y.; SKOCZYLAS, F.; DAVY, C. A.; HOUARI, H. Effect of a highcalcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and. **Cement And Concrete Research**, v. 38, p. 727-736, 2008.

BONNET, S.; BALAYSSAC, J.P. Combination of Wenner resistivimeter and Torrent permeameter methods for assessing carbonation depth and saturation level of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 1149-1165, 2018.

BRANDÃO, A. M. S. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto**. 1998. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto, inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: PINI, 1997.

CHARMCHI, G. **The Role of Concrete Maturity in Resistivity-Based Performance Specifications**. Thesis. University of Toronto. 2015.

CHEN, C.; CHANG, J.; YEIH, W. The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 35–43. 2014.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Diagnosis and assessment of concrete structures: State-of-the-art report**. CEB Bulletin d'Information, n.192, Lausanne, Switzerland, 1989.

COSTA, J. M.; AZZI, S. S. Comparação Da Resistividade Elétrica Superficial E Volumétrica. **Revista Construindo**. Belo Horizonte, v. 8, 1º Ed., p. 36-46, Jan - Jun, 2017.

COUTINHO, M. J. A. R. S. **Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento de cofragem**. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto: Porto, 2005.

COUTINHO; A. S.; GONÇALVES, A. **Fabrico e propriedades do betão**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil: Lisboa, 1994.

ELKEY, W.; SELLEVOLD, E. **Electrical resistivity of concrete**. Norwegian Road Research Laboratory. Oslo, 1995.

FILHO FIGUEIRÊDO, L. J. G. **Avaliação da trabalhabilidade de concretos contendo agregado reciclado de argamassa**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Estadual de Feira de Santana, 2011.

GANS, P. S. **Correlação entre resistividade elétrica e a resistência à compressão de concretos expostos a ciclos de molhagem e secagem com cloretos e sulfatos**.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

GHODDOUSI, P.; ADELZADE S. L. Study on hydration products by electrical resistivity for self-compacting concrete with silica fume and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 219–228, 2017.

GHOSH, P.; TRAN, Q. Composites Influence of parameters on surface resistivity of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 62, p. 134–145, 2015.

GODINHO, J. P.; OLIVEIRA, R. L. N. de; CAPRARO, A. P. B.; RÉUS, G. C.; MEDEIROS, M. H. F. de. Influência do formato dos corpos de prova e da idade de curas nas leituras de velocidade de ultrassom, resistividade elétrica e resistência a compressão axial. **3º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções (3º SPPC)**, artigo n. 3SPPC1011, p. 116-129, 2018.

GOWERS, K.; MILLARD, S. Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion. **ACI Materials Journal**, v. 96, p. 536–541. 1999.

GUDIMETTLA, J. M.; CRAWFORD, G. L. (2014). Field experience in using Resistivity Tests for Concrete. **94th Annual Meeting of the Transportation**. Washington, 2014.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. 231 p.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: PINI, 1986.

HOPPE, T. F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

HORNBOSTEL, K.; LARSEN, C. K.; GEIKER, M. R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate - A literature review. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 60–72, 2013.

HOU, T. C.; NGUYEN, V. K.; SU, Y. M.; CHEN, Y. R.; CHEN, P. J. Effects of coarse aggregates on the electrical resistivity of Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 397–408, 2017.

HONGYU, S.; JINRUI, Z.; TIANYUAN, F.; ZONGJIN, L. Electrical method to evaluate elastic modulus of early age concrete, **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 661–666. 2015.

JESUS, L. S. A resistividade elétrica do concreto e a sua correlação com a durabilidade das estruturas. **Engenharia Estudo e Pesquisa**. ABPE, v. 1, p. 26-33. 2018.

- KURDA, R. BRITO, J.; SILVESTRE, J. Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash, **Cement and Concrete Composites**, v. 95, p. 169–182, 2019.
- LATASTE, J. F.; SIRIEIX, C.; BREYSSE, D.; FRAPPA, M. Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering. **NDT&E Interantional**, v. 36, p 383–394, 2003.
- LAYSSI, H.; GHODS, P.; ALIZADEH, A. R.; SALEHI, M. The electrical resistivity of concrete. **ACI Material Journal**, p. 41–46, 2015.
- LE, H. V.; KIM, D. J. Effect of matrix cracking on electrical resistivity of high performance fiber reinforced cementitious composites in tension, **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 750–760, 2017.
- LENCIONI, J. W. **Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. São José dos Campos, São Paulo, 2011.
- LOPES, S. W. **Avaliação da homogeneidade e da resistência à compressão do concreto por meio de ensaios não destrutivos**. 2014. 152 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- LOPEZ, W.; GONZALEZ, J. A. Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement. **Cement and Concrete Research**, v. 23, p. 368–376, 1993.
- LÜBECK A. **Resistividade elétrica de concretos de cimento portland branco e elevados teores de escória de alto forno**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- LÜBECK, A.; GASTALDINI, A. L. G.; BARIN, D. S.; SIQUEIRA, H. C. Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, p. 392–399, 2012.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A. **Estudo da resistividade do concreto para proposta de modelagem de vida útil – Corrosão das armaduras devido à penetração de cloretos**. 2014. 234 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, São José dos Campos, 2014.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; JÚNIOR, J. R. H.; MONTEIRO, A. J. A. E.; BILL, G. H.; KAWANAMI, I. Y. Accelerated carbonation effect on electrical resistivity and sorptivity of concrete. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 3(1), p.1–7. 2018.
- MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G. Electrical Resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. **Construction and Building Materials**. v. 107, p. 11 – 16, 2016.

- MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L.V. Investigação de resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista ALCONPAT**, v. 4, p. 116 – 131, 2014.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. Nova York: McGraw-Hill, 2006.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 2008.
- MELO NETO, A. A.; HELENE, P. R. L. **Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos**. 44o Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, Belo Horizonte, 2002.
- MENDES, S. E. S.; OLIVEIRA, R. L. N.; CREMONEZ, C.; PEREIRA, E.; PEREIRA, E.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. 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.
- MILLARD, S. G. Reinforced Concrete Resistivity Measurement Techniques. Institution of Civil Engineers, **Research and Theory**, Proceedings, v. 91, n. 2, 1991.
- MORRIS, W.; MORENO, E. I.; SAGÜÉS, A. A. Practical Evaluation of Resistivity of Concrete in 433 Test Cylinders Using a Wenner Array Probe, **Cement and Concrete Research**, V. 26, No. 12, pp. 1779-1787, 1996.
- MOTA, D. A. **Influência da adição de materiais pozolânicos na corrosibilidade do concreto armado, analisada por meio do potencial de corrosão e resistividade elétrica**. Dissertação (Mestrado – Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, 2016.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: PINI, 1997.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. Bookman, 2.ed, 2010.
- OLSSON, N.; BAROGHEL-BOUNY, V.; NILSSON, L. O.; THIERY, M. Non-saturated ion diffusion in concrete - A new approach to evaluate conductivity measurements. **Cement and Concrete Composites**, v. 40, p. 40–47. 2013.
- PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- PÉREZ, M. D. C. P. **Durabilidad en el hórminon armado: La resistividad eléctrica como indicador de durabilidade**. Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica. Universidade da Coruña. Coruña, 2014.
- POLDER, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC – 154. **Construction and Building Materials**. v. 15, p 125-131, 2001.

PRINCIGALLO, A.; BREUGEL, K. V.; LEVITA, G. Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes. **Cemente and Concrete Research**, v. 33, p. 1755 -1763, 2003.

PROCEQ SA. **O equipamento para medir resistividade superficial do concreto de maior acurácia em todo o mundo**. 2017. Disponível em: <https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Resipod_Sales%20Flyer_Portuguese_high.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2019.

RANADE, R.; ZHANG, J.; LYNCH, J. P.; LI, V. C. Influence of micro-cracking on the composite resistivity of Engineered Cementitious Composites. **Cement and Concrete Research**. v. 58, p 1–12, 2014.

REAL, L. V. **Efeito de adições pozolânicas na estimativa de vida útil do concreto exposto a cloretos através da resistividade elétrica superficial**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

ROSA, D. W. **Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de escória de alto forno e ativador químico**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SALEEM, M.; SHAMEEM, M.; HUSSAIN, S. E.; MASLEHUDDIN, M. Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v.10, p. 209-214, 1996.

SANTOR, M. S.; GASTALDINI, A. L. G.; CRAUSS, C.; DOS SANTOS, G. T. ROSSINI, F. C. Influência de materiais de proteção na resistividade elétrica do concreto. **Revista ALCONPAT**, v. 2, p 47-57, 2012.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 2006. 178 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Universidade de Brasília – UNB, Brasília, 2006.

SBARTAÏ, Z. M.; LAURENS, S.; RHAZI, J.; BALAYSSAC, J. P.; ARLIGUIE, G. Using radar direct wave for concrete condition assessment: Correlation with electrical resistivity. **Journal of Applied Geophysics**, v. 62(4), p. 361–374. 2007.

SENGUL, O. Use of electrical resistivity as an indicator for durability. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 434–441, 2014.

SILVA, P.; DE BRITO, J. Electrical resistivity and capillarity of self-compacting concrete with incorporation of fly ash and limestone filler. **Advances in Concrete Construction**, v. 1(1), p. 65–84, 2013.

SILVA, R. B. **Caracterização de cinza de biomassa gerada na agroindústria do cacau e seu uso como adição mineral em concretos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2014.

SPRAGG, R. P.; CASTRO, J.; NANTUNG, T.; PAREDES, M.; WEISS, W. J. Variability analysis of the bulk resistivity measured using concrete cylinders. **Joint Transportation Research Program**, Indiana Department of Transportation and Purdue University, Indiana, 2011.

TOMLINSON, D.; MORADI, F.; HAJILOO, H.; GHODS, P.; ALIZADEH, A.; GREEN, M. Early age electrical resistivity behaviour of various concrete mixtures subject to low temperature cycling. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 323–334, 2017.

VASCONCELLOS, A. T. **Estudo da variabilidade do modulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos**. (2018). Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

VESELY, V; KONECNY, P.; LEHNER, P. Influence of crack propagation on electrical resistivity and ultrasonic characteristics of normal concrete assessed by sequential TPB fracture test. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 80, p 2–13, 2015.

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. Electrical Resistivity of Concrete— A Literature Review. PCA R&D Serial No. 2457. **Portland Cement Association**, Illinois, 2003.

WHITTINGTON, H. W.; MCCARTER, J.; FORDE, M. C. **The conduction of electricity through concrete**. Department of Civil Engineering and Building Science. University of Edinburgh. 1981.

WWWF-BRASIL. Brasil promulga convenção de Minamata sobre mercúrio. **Meio ambiente no Brasil**. 2018. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?67122/Brasil-promulga-Conveno-de-Minamata-sobre-Mercrrio>>. Acesso em 9 de fev. 2019.