

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS E CONSTRUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

AVALIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO EM
FUNÇÃO DO USO DE DIFERENTES ADITIVOS QUÍMICOS

Autor: Leandro Cupertino Correia
Orientador: Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco

Belo Horizonte
Setembro de 2019

Leandro Cupertino Correia

AVALIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO EM FUNÇÃO DO USO DE DIFERENTES ADITIVOS QUÍMICOS

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil.
Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
Setembro de 2019

C824a	<p>Correia, Leandro Cupertino.</p> <p>Avaliação da resistividade elétrica do concreto em função do uso de diferentes aditivos químicos [recurso eletrônico] / Leandro Cupertino Correia. – 2019.</p> <p>1 recurso online (99 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Adriano de Paula e Silva. Coorientador: Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 89-99. Bibliografia: f.84-88.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Construção civil - Teses. 2. Concreto - Teses. 3. Correntes elétricas –aterramento – Teses. 4. Concreto – Aditivos – Teses. 5. Ultrassom – Teses. I. Silva, Adriano de Paula e. II. Branco, Luiz Antônio Melgaço. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p>CDU: 691(043)</p>
-------	---

LEANDRO CUPERTINO CORREIA

"AVALIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO EM FUNÇÃO DO USO DE DIFERENTES ADITIVOS QUÍMICOS"

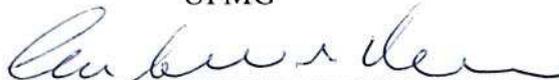
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Mestrado em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 10 de setembro de 2019

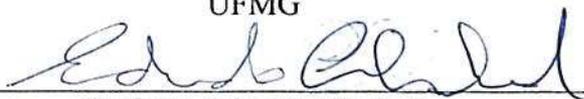
BANCA EXAMINADORA



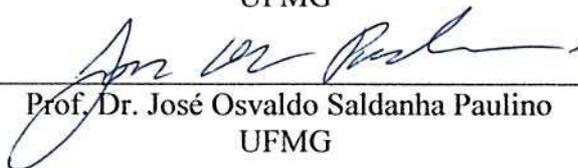
Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva
Orientador
UFMG



Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço n. Branco
Coorientador
UFMG



Prof. Dr. Eduardo Chahud
UFMG



Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino
UFMG

Dedico este trabalho a todos que irão consultá-lo, que eles possam sempre se lembrar de que a vida é um eterno aprendizado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que estiveram presentes em minha vida e que, de alguma forma, me incentivaram para alcançar mais essa conquista.

A Deus, minha fonte de força nos desafios que surgiram pelo caminho.

Aos meus pais, minha irmã e minha namorada, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado quando precisei.

Aos amigos da GAL, que mesmo nem sempre presentes se mostram os melhores companheiros que alguém pode desejar ter.

Aos amigos da Sudecap, UFMG, UFV, PUC Minas, mineiros, paulistas, capixabas, goianos e todos que participaram de alguma forma da minha vida, que são minha família em BH, sou grato pelo aprendizado e convivência.

Aos meus familiares, pelas orações, boas energias e palavras de sabedoria.

Ao meu orientador, Professor Adriano de Paula e Silva, pelo apoio, competência e confiança durante a realização deste trabalho.

Ao meu coorientador, Professor Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco, pelo auxílio, sugestões e pela valiosa contribuição dada.

Aos técnicos, pesquisadores e colaboradores do Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica e Laboratório de Análise Experimental de Estruturas, pelo apoio e presteza durante a realização dos ensaios.

À Via Engenharia S.A. e MC-Bauchemie do Brasil pela disponibilidade e colaboração durante várias etapas da pesquisa.

À PBH, pelo interesse e incentivo ao aperfeiçoamento e aprimoramento de sua equipe técnica.

Sou o resultado da confiança e da força de cada um de vocês.

A todos que participaram, me incentivaram a trilhar novos caminhos e me ajudaram a chegar até aqui, muitíssimo obrigado!

“A melhor coisa que um ser humano pode fazer
é ajudar outro ser humano a saber mais.”

(Charlie Munger)

RESUMO

Quando o assunto é durabilidade de estruturas de concreto, nota-se que diversos fatores influenciam a vida útil do material, sendo grande parte das manifestações patológicas que surgem nos empreendimentos, relacionadas ao processo corrosivo das armaduras. Diversas pesquisas com foco em deterioração de estruturas têm apresentado a resistividade elétrica do concreto como um parâmetro indicativo da durabilidade das estruturas que deve ser verificado. Isso porque o ensaio de resistividade elétrica é uma ferramenta capaz de fornecer importantes informações sobre a qualidade do concreto, sendo um método prático para obtenção dos valores em laboratório ou *in situ*. Assim, o objetivo do presente trabalho é analisar as variações de resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto, ocasionadas pela inclusão de aditivos químicos durante o preparo do material. Para a realização da etapa experimental, foram moldados grupos de corpos de prova, produzidos com cinco tipos de aditivos, mantidas as demais características do traço, consumo de cimento, dosagem de agregados, relação água/cimento e procedimento de cura. Como existem vários fatores que influenciam a resistividade elétrica do concreto, tanto intrínsecos quanto extrínsecos ao material, buscou-se manter as amostras sob as mesmas condições, dada a complexidade de interpretar a combinação de tantas variáveis. Foram realizados ensaios de resistividade elétrica superficial e volumétrica, ensaio de ultrassom e índice de vazios, para que fosse possível correlacionar algumas características microestruturais do concreto ao seu comportamento elétrico. Os resultados obtidos mostram que o aditivo incorporador de ar, embora aumente o número de poros no concreto, não contribui para redução da resistividade elétrica do material. Além disso, percebe-se que os aditivos podem influenciar a resistividade do concreto nas primeiras idades, principalmente quando se trata de aditivos retardadores de pega e controladores de hidratação do cimento.

Palavras-chave: concreto; resistividade elétrica; método de Wenner; aditivos químicos; ultrassom.

ABSTRACT

About durability of reinforced concrete structures, in particular, many factors influence the material, being large part of pathological manifestations that arise in civil construction related to the corrosive process of reinforcement. Several researches focusing on structural deterioration have showed the electrical resistivity of concrete as an indicative parameter for structural durability that to verify. These studies show that the electrical resistivity test is an important tool to provide information on the quality of the concrete and is a practical method for obtaining in laboratory or in situ values. Thus, the objective of the present work is to analyze the variations of the surface and volumetric electrical resistivity of the concrete, caused by the inclusion of admixtures during the material preparation. In the experimental phase, groups of samples were prepared, produced with five types of admixtures, maintaining fixed the other characteristics of the trace, cement consumption, aggregate dosage, water / cement ratio and curing procedure. As exist of several factors that influence the electrical resistivity of concrete, both intrinsic factors and extrinsic to the material, the samples stayed under the same conditions during tests, given the complexity of interpreting the combination of so many variables. Surface and volumetric electrical resistivity tests, ultrasonic wave test and voids index tests were executed, so that it was possible to correlate some microstructural characteristics of the concrete to its electrical performance. The results show that the air-entraining additive, although increasing the number of pores in the concrete, does not contribute to reducing the electrical resistivity of the material. In addition, it is observed admixtures may influence the resistivity of concrete at an early age, especially when it comes to handle retarding additives and cement hydration controllers.

Keywords: concrete; electrical resistivity; Wenner's method; chemical additives; ultrasonic wave.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resistividade elétrica em função da relação água/cimento e consumo de cimento Portland comum, ensaiado aos 28 dias (adaptado de NEVILLE, 1997).	8
Figura 2 – Variação da resistividade elétrica em função da temperatura para (a) um condutor (metal) e (b) um semicondutor (Adaptado de YOUNG, 2009).	11
Figura 3 – Efeito do teor do agregado na resistividade elétrica do concreto (HUGHES <i>et al.</i> , 1985 apud HOPPE, 2005).	13
Figura 4 – Evolução resistividade elétrica do concreto com o avanço da carbonatação (Adaptado de CHI <i>et al.</i> , 2002).	15
Figura 5 – Influência da concentração de íons em solução na resistividade elétrica do concreto (Adaptado de CHI <i>et al.</i> , 2002).	15
Figura 6 - Método de Wenner para as medidas de resistividade elétrica superficial do concreto (Adaptado de GOWERS e MILLARD, 1999).	20
Figura 7 – Parâmetros geométricos recomendados para ensaio de resistividade elétrica superficial do concreto (Adaptado de GOWERS e MILLARD, 1999).	22
Figura 8 – Esboço do sistema montado com a amostra de concreto e as chapas de cobre para obtenção da resistividade volumétrica pelo método dos dois eletrodos (LAMOUNIER, 2014).	24
Figura 9 – Detalhe do conjunto utilizado para ensaio de análise da resistividade volumétrica do concreto (GJØRV, 2015).	24
Figura 10 – Esquema elétrico do ensaio para obtenção da resistividade volumétrica pelo método dos três eletrodos (NBR 9402:2012).	25
Figura 11 – Relação porosidade-resistência em argamassas de cimento Portland com diferentes dosagens (Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2008).	26
Figura 12 – Métodos de propagação e recepção de pulsos ultrassônicos: a) transmissão direta; b) transmissão semidireta e c) transmissão indireta ou superficial. (Adaptado de NEVILLE & BROOKS, 2013).	30
Figura 13 – Esquema da microestrutura de concretos com aditivo incorporador de ar (Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2008).	34
Figura 14 – Representação esquemática do procedimento experimental.	38
Figura 15 – Amostras dos aditivos utilizados na pesquisa.	43
Figura 16 – Formas já preparadas para produção dos corpos de prova.	48
Figura 17 – Detalhe da betoneira elétrica utilizada durante a produção do concreto	49
Figura 18 – Detalhe da cura submersa dos corpos de prova	49

Figura 19 – Equipamento tipo sonda Wenner (quatro pontos) e acessórios (AGUIAR, 2018).	50
Figura 20 – Realização do ensaio de resistividade elétrica superficial	50
Figura 21 – Equipamento utilizado para realização do ensaio de resistividade elétrica volumétrica	51
Figura 22 – Realização do ensaio de resistividade elétrica volumétrica	52
Figura 23 – Equipamento de ultrassom.....	53
Figura 24 – Calibração do equipamento antes do início dos ensaios.....	54
Figura 25 – Representação do posicionamento dos transdutores.....	55
Figura 26 – Realização do ensaio e apresentação de resultado no equipamento.....	55
Figura 27 – Secagem dos corpos de prova em estufa	56
Figura 28 – Balança hidrostática para determinação da massa submersa em água	57
Figura 29 – Determinação da massa saturada dos corpos de prova.....	57
Figura 30 – Valores médios de resistividade elétrica superficial do concreto	63
Figura 31 – Aumento da resistividade elétrica superficial em função da idade do concreto .	64
Figura 32 – Valores médios de resistividade elétrica volumétrica do concreto	69
Figura 33 – Aumento da resistividade elétrica volumétrica em função da idade do concreto	70
Figura 34 – Comparação dos resultados obtidos de resistividade elétrica volumétrica e superficial	71
Figura 35 – Análise estatística da velocidade da onda ultrassônica.....	73
Figura 36 – Relação da resistividade elétrica em função da velocidade da onda ultrassônica	74
Figura 37 – Percentual de absorção e índice de vazios em função do tipo de aditivo	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Qualidade do concreto em função da velocidade do pulso ultrassônico (QASRAWI, 2000).	31
Tabela 2 – Características do cimento Portland.....	40
Tabela 3 – Análise granulométrica e caracterização do agregado miúdo.....	41
Tabela 4 – Análise granulométrica e caracterização do agregado graúdo	42
Tabela 5 – Características dos aditivos.....	42
Tabela 6 – Requisitos para inspeção preliminar de água destinada ao amassamento de concreto.....	43
Tabela 7 – Propriedades químicas da água destinada ao amassamento de concreto	44
Tabela 8 – Pesquisa de qualidade da água de 2017	45
Tabela 9 – Proporção entre agregados graúdos (Adaptado de Rodrigues, 1998).....	46
Tabela 10 – Dosagem do traço do concreto	46
Tabela 11 – Dados da moldagem dos corpos de prova	48
Tabela 12 – Codificação dos CPs produzidos em função do tipo de aditivo.....	59
Tabela 13 – Resultados dos testes aos dias 7 dias após a moldagem	60
Tabela 14 – Resultados dos testes aos dias 14 dias após a moldagem	61
Tabela 15 – Resultados dos testes aos dias 28 dias após a moldagem	62
Tabela 16 – Resultados dos testes aos dias 7 dias após a moldagem	66
Tabela 17 – Resultados dos testes aos dias 14 dias após a moldagem	67
Tabela 18 – Resultados dos testes aos dias 28 dias após a moldagem	68
Tabela 19 – Resultados do ensaio de ultrassom.....	72
Tabela 20 – Relatório da massa dos corpos de prova ensaiados	75
Tabela 21 – Resultados de absorção e índice de vazios	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
Cl ⁻	Íons cloreto
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CP II-E-32	Cimento Portland composto com escória, classe de resistência 32
CP	Corpo de prova de concreto
f _{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
NBR	Norma brasileira
s.p.c	Sobre peso de cimento
ρ	Resistividade elétrica aparente do concreto

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	5
2.1. Objetivo geral	5
2.2. Objetivos específicos.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1. Fatores que alteram a medida de resistividade	7
3.1.1. Relação água/cimento (a/c).....	7
3.1.2. Hidratação do cimento.....	9
3.1.3. Teor de umidade	10
3.1.4. Temperatura.....	10
3.1.5. Agregados	12
3.1.6. Carbonatação e íons cloreto.....	14
3.1.7. Adições minerais	16
3.2. Ensaio de resistividade elétrica do concreto.....	17
3.2.1. Resistividade elétrica superficial pelo método Wenner (quatro pontos)	19
3.2.2. Método dos dois pontos para análise da resistividade volumétrica.....	23
3.2.3. Análise da resistividade elétrica pelo método dos três pontos	25
3.3. Determinação do índice de vazios do concreto	26
3.4. Ensaio de resistência à compressão	28
3.5. Ensaio de ultrassom.....	28
3.6. Aditivos químicos	31
3.6.1. Aditivos tenso-ativos (plastificantes e superplastificantes).....	32
3.6.2. Aditivos incorporadores de ar	33
3.6.3. Aditivos aceleradores de pega.....	34
3.6.4. Aditivos retardadores de pega	34
3.6.5. Aditivos impermeabilizantes	35
3.6.6. Aditivos geradores de gás ou espuma.....	35
3.6.7. Aditivos inibidores de corrosão	35
4. MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1. Materiais constituintes do concreto.....	39

4.1.1.	Cimento Portland	39
4.1.2.	Agregados	40
4.1.2.1.	Agregado miúdo.....	41
4.1.2.2.	Agregado graúdo	41
4.1.3.	Aditivos químicos.....	42
4.1.4.	Água.....	43
4.2.	Estudo da dosagem	44
4.3.	Métodos empregados.....	47
4.3.1.	Moldagem e cura dos corpos de prova.....	47
4.3.2.	Ensaio de resistividade elétrica superficial (Método Wenner)	50
4.3.3.	Ensaio de resistividade elétrica volumétrica (método dos dois pontos).....	51
4.3.4.	Ensaio de ultrassom	53
4.3.5.	Ensaio para determinação da porosidade do concreto	56
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1.	Ensaio de resistividade elétrica superficial (Método Wenner)	59
5.2.	Ensaio de resistividade elétrica volumétrica (método dos dois pontos).....	65
5.3.	Resultados do ensaio de ultrassom	71
5.4.	Resultados do ensaio de porosidade	74
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
8.	REFERÊNCIAS	83
ANEXO I	88
ANEXO II	89

1. INTRODUÇÃO

Algumas manifestações patológicas em estruturas de concreto armado, como por exemplo, trincas e fissuras ou, até mesmo, o destacamento do material, podem ser detectadas a partir de inspeção visual. Já a corrosão das armaduras nem sempre é percebida de maneira tão simples, a menos que existam armaduras deterioradas expostas.

Durante muitos anos, acreditou-se que, desde que atendido o f_{ck} (resistência característica do concreto à compressão) de projeto, as estruturas estariam adequadas para o uso e a vida útil prevista durante sua concepção seria alcançada (AGUIAR, 2018). Contudo, existem obras que demandam reparos pouco tempo depois de construídas, daí a preocupação com a redução da durabilidade das estruturas.

Como as intervenções corretivas, realizadas para recuperação de estruturas, tem um custo significativo e, geralmente, são de difícil execução, é cada vez maior a busca por materiais e métodos executivos que garantam a determinadas estruturas vida útil e durabilidade satisfatória, correspondente ao uso para o qual ela foi projetada (CORREIA *et al.*, 2018).

O conhecimento adequado do comportamento do concreto e dos diversos fatores que alteram sua durabilidade é fundamental para que sejam propostas diretrizes e orientações durante a fase de planejamento e execução da obra ou até mesmo os procedimentos e práticas convenientes para futura rotina de manutenção.

Diversos estudos já foram realizados para conhecer o comportamento do concreto a nível atômico, avaliando-se os fatores que influenciam as características do material no estado fresco ou endurecido, inclusive podem ser encontrados facilmente na literatura e normas vigentes. Exemplo disso são orientações quanto ao consumo de cimento, relação água/cimento, adições minerais, procedimentos para fabricação e metodologias de cura do concreto.

Com os avanços tecnológicos das últimas décadas, houve desenvolvimento de diversos produtos químicos, denominados aditivos, que são adicionados ao concreto em pequenas quantidades e modificam algumas propriedades do material, melhorando o comportamento desses concretos no estado fresco ou endurecido.

Pesquisas sobre os aditivos químicos também são amplamente acessíveis e mostram que estes produtos propiciam melhores condições de trabalhabilidade, redução do consumo de água, controle do tempo de pega, redução do calor de hidratação, aumento da resistência mecânica do concreto, dentre outros benefícios (ANDOLFATO, 2012).

Contudo, quando o assunto é resistividade elétrica do concreto, não existem tantos estudos e pesquisas sobre o tema. Segundo HORNBOSTEL *et al.* (2013), a resistividade elétrica do concreto tem influência direta no processo corrosivo da armadura. Sendo assim, este parâmetro torna-se um indicativo fundamental para estimar a vida útil e durabilidade da estrutura.

Assim como a condutividade elétrica, a resistividade é uma propriedade física do material que indica uma maior ou menor resistência à passagem de corrente elétrica em seu interior, normalmente originária de um processo de corrosão do aço (ZACCARDI *et al.*, 2009). Este processo é desencadeado pela ação de agentes agressivos, como CO₂ e íons cloreto, que geram uma diferença de potencial elétrico ao longo de diversos trechos da armadura.

De acordo com WHITING e NAGI (2003), a quantidade e volume dos poros contidos no material e a conectividade entre estes, afetam quantitativamente a resistividade elétrica do concreto. Isso porque, segundo estes autores, a resistividade elétrica está relacionada com a entrada de fluidos e a difusão de íons através dos poros do concreto.

Dessa forma, a existência de poros e fissuras facilita a penetração de íons cloretos na estrutura e permite o avanço da frente de carbonatação provocada pelo CO₂, que reduz o pH do concreto, iniciando o processo de despassivação da armadura, possibilitando reações químicas entre concreto e aço que culminam no processo de corrosão da deste último (AHMAD, 2014).

Estudos realizados ao longo das últimas décadas avaliaram a variação da resistividade elétrica do concreto em função de diversos fatores, como: a condição de umidade do material, a temperatura, idade do concreto e o tipo de cimento utilizado.

Em testes realizados por SANTOR (2011), por exemplo, o autor mostra que a resistividade elétrica aumenta com o avanço do tempo, uma vez que a solução presente no interior dos poros do concreto reduz com o avanço da idade.

A resistividade elétrica do concreto também pode variar de acordo com as condições ambientais à qual a estrutura está exposta, bem como com a microestrutura do concreto. Esta última podendo ser alterada substancialmente por diversos fatores, como, por exemplo, a adição de componentes químicos à mistura ou pelo processo e tempo de cura adotado.

MEDEIROS-JUNIOR *et al.* (2014) afirmam que a porosidade do concreto é um dos principais parâmetros que permitem a permeabilidade de fluidos como o CO₂ e a difusividade de íons cloreto em seu interior. Ademais, em revisão bibliográfica apresentada por HORNBOSTEL *et al.* (2013), acerca da resistividade elétrica do concreto, fica evidente que a porosidade do material, bem como a solução presente nos poros, afeta consideravelmente as características e o comportamento elétrico da estrutura.

Segundo SANTOS (2006), a relação água/cimento (*a/c*) e a hidratação da pasta são fatores que influenciam a resistividade elétrica do concreto, ainda mais por influenciar diretamente na água livre presente no interior do material. Todavia, trabalhos onde é avaliada a influência do uso de aditivos químicos para a resistividade elétrica do material são escassos.

Dado que a utilização de aditivos químicos pode afetar a microestrutura do concreto, de alguma forma também podem alterar os valores de resistividade elétrica (AGUIAR, 2018). A autora cita como exemplo a utilização de aditivos plastificantes e superplastificantes, que tem potencial para reduzir o consumo de água no preparo do concreto, fator que atua diretamente do aumento da resistividade elétrica.

Como valores maiores de resistividade elétrica implicam em menor probabilidade de corrosão das armaduras (MEHTA e MONTEIRO, 2008), no presente trabalho se propôs avaliar como os aditivos químicos, acrescidos ao concreto durante a mistura dos componentes, podem influenciar as características elétricas do material.

A principal motivação para esta pesquisa é a relevância que a mesma representa para o setor da construção civil, devido à crescente demanda por materiais e sistemas construtivos que cumpram a vida útil de projeto, possam garantir a durabilidade da estrutura e permitam o uso adequado do empreendimento.

Sendo assim, por ser assunto pouco estudado até então e pela utilização cada vez maior de aditivos químicos durante a fabricação do concreto, fica evidente a importância de estudar e conhecer o modo com que estes produtos, quando adicionados ao concreto, influenciam o comportamento do material, no que diz respeito à resistividade elétrica.

Para a viabilização do presente trabalho foram produzidos corpos de prova de concreto, utilizando diferentes tipos de aditivos químicos, mantendo os demais parâmetros fixos. A medição da resistividade elétrica superficial e volumétrica do material permitiu comparar os valores obtidos em função dos diferentes tipos de aditivos acrescentados durante a confecção da mistura, inclusive relacioná-los a concretos isentos destes materiais em sua composição.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral do presente estudo é realizar uma análise experimental em concretos produzidos com diferentes tipos de aditivos químicos, observando de que forma a variação dos produtos adicionados à mistura influenciam as medidas de resistividade elétrica do concreto.

2.2. Objetivos específicos

São objetivos específicos deste estudo:

- Avaliar a resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto em função da variação do aditivo químico utilizado no traço;
- Analisar e avaliar as características de resistividade elétrica superficial e volumétrica em concretos com baixo fator água/cimento (a/c), aos 7, 14 e 28 dias de cura;
- Comparar os resultados obtidos através dos estudos em concretos com aditivos químicos ao concreto sem aditivos, curados sob as mesmas condições, durante os mesmos períodos de tempo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um dos principais fatores responsáveis pela degradação de estruturas de concreto é a corrosão das armaduras, conforme comentado anteriormente. Sendo assim, cada vez mais pesquisas sobre o assunto são desenvolvidas, principalmente devido aos danos gerados pelo avanço das reações químicas envolvidas nesse processo e os impactos financeiros referentes ao tratamento das manifestações patológicas (SANTOS, 2006).

HORNBOSTEL *et al.* (2013) mostraram que o processo de corrosão das armaduras tem relação direta com a resistividade elétrica do concreto. Isso porque a resistividade de um material é um parâmetro que indica sua capacidade de oposição à passagem de uma corrente elétrica. Logo, valores maiores de resistividade indicam melhor comportamento frente aos fenômenos eletroquímicos responsáveis pelos processos de deterioração da estrutura.

De acordo com HELENE (1993) e AHMAD (2014), algumas condições devem ser atendidas para que o meio se torne propício e haja propagação da corrosão nas armaduras do concreto. Com isso, o avanço da ação de determinada célula de corrosão depende dos seguintes aspectos principais:

- i. A existência de um ânodo e um cátodo, no qual o processo de oxidação do ferro é desencadeado pelo avanço da frente de carbonatação ou pela contaminação dos íons cloreto;
- ii. O surgimento de uma diferença de potencial entre a região anódica e catódica, o que possibilita um fluxo de corrente elétrica para o transporte de elétrons;
- iii. A presença de elemento metálico conectando eletricamente ânodo e cátodo, que se combina com o oxigênio disponível no meio, formando os íons OH^- ; e
- iv. A imersão de ânodo e cátodo em um eletrólito eletricamente condutivo, para ocorrer o transporte dos íons OH^- das regiões catódicas para as regiões anódicas, através dos poros do concreto completando o circuito da célula de corrosão.

Devido às diferentes origens dos insumos que compõe o concreto, ele possui uma microestrutura complexa, formada por uma mistura de componentes sólidos,

líquidos e vazios, onde se encontram água, aglomerante e agregados de diferentes formas e tamanhos.

Segundo AGUIAR (2018), essa microestrutura está relacionada a diversos fatores, tais como o tipo de cimento, eventuais adições e aditivos utilizados em seu preparo, as características geomorfológicas e o tamanho dos agregados e, principalmente, a quantidade de água utilizada na mistura.

Como a resistividade elétrica do concreto é uma característica diretamente influenciada pelas propriedades microestruturais do material, tal como a porosidade e a solução presente no interior destes poros, conforme indicado por HORNBOSTEL *et al.* (2013), pode-se inferir que o grau de saturação da estrutura é um fator intrinsecamente ligado à resistividade do material.

Além disso, SANTOR (2011) comenta como a influência do teor de umidade do concreto, a composição iônica da solução presente nos poros e a interconectividade entre os poros da pasta de cimento afetam significativamente a resistividade elétrica do concreto.

Deste modo, percebe-se que existem vários fatores que afetam o comportamento elétrico do concreto, sendo alguns destes aspectos discutidos detalhadamente neste trabalho.

3.1. Fatores que alteram a medida de resistividade

A seguir, são relacionados alguns dos fatores que alteram as medidas de resistividade elétrica do concreto.

3.1.1. Relação água/cimento (a/c)

Quando há interesse em otimizar o desempenho do concreto, um dos principais parâmetros a ser analisado é a relação água/cimento (a/c). Isso porque a porosidade e a permeabilidade do concreto são diretamente proporcionais à quantidade de água adicionada à mistura e, por outro lado, são inversamente proporcionais à resistividade elétrica (ABREU, 1998).

Dessa forma, quanto mais água presente na pasta de cimento, maior será o número de poros no concreto, maior o volume e possibilidade de existirem conexões

entre estes poros. Logo, o comportamento estrutural e a resistência aos agentes agressivos são parâmetros consideravelmente influenciados pela água, inclusive reduzindo a resistividade elétrica do material, conforme apresentado por SANTOS (2006).

Ao final da década de 1970, WOELFL e LAUER (1979) estudaram, dentre outros parâmetros, a resistividade elétrica do concreto. Mantendo constante o traço, o trabalho consistiu na variação da relação água/cimento, em proporções iguais a 0,4, 0,5 e 0,6. Os autores tomaram como referência a relação $a/c = 0,5$ e concluíram que a resistividade elétrica do concreto diminui com o aumento da relação a/c , isso porque os íons constantes na água livre são grandes condutores de eletricidade no interior do concreto.

De acordo com NEVILLE (1997), mantendo-se constante a relação a/c e variando o consumo de cimento, também se altera a resistividade elétrica do concreto (Figura 1). Isso ocorre porque a menor disponibilidade do eletrólito implica em redução da corrente elétrica capaz de percorrer o material.

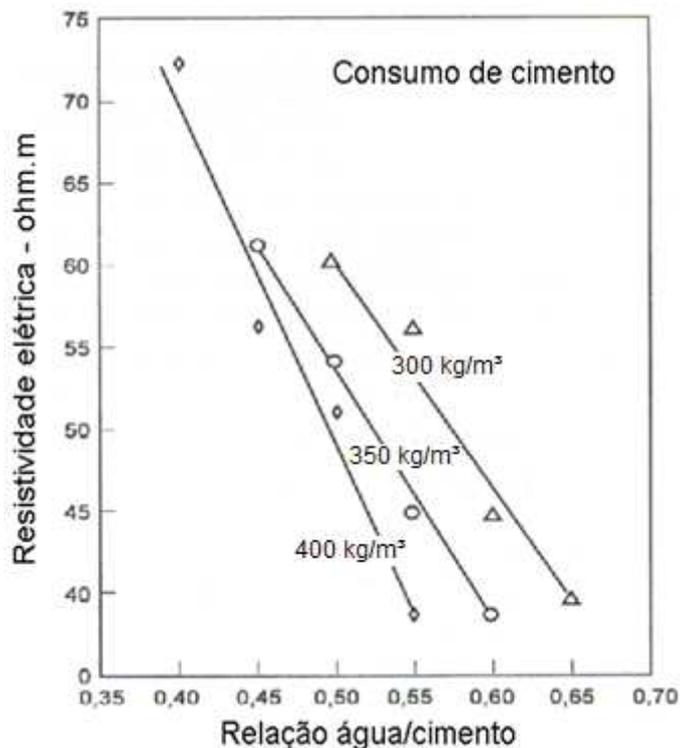


Figura 1 – Resistividade elétrica em função da relação água/cimento e consumo de cimento Portland comum, ensaiado aos 28 dias (adaptado de NEVILLE, 1997).

Portanto, a quantidade de água adicionada à mistura é um fator que deve ser analisado com cautela, devido à relação que ela tem sobre a quantidade e volume dos poros do concreto, como também pela contribuição para a saturação destes vazios e, conseqüentemente, nas reações de carbonatação e nos ataques de íons Cl⁻.

3.1.2. Hidratação do cimento

Devido às reações químicas entre água e cimento, assim como o aumento da resistência mecânica do concreto, pode-se inferir que a resistividade elétrica também aumenta com o passar do tempo. Isso porque a água livre no concreto, que tende a facilitar a passagem da corrente pelo material, diminui à medida que reage com as partículas do cimento, no fenômeno denominado “hidratação do cimento”.

WHITINGTON *et al.* (1981) já haviam observado esse comportamento, uma vez que a quantidade de água livre, seja no momento da mistura ou após a hidratação completa do cimento, apresenta comportamento diretamente proporcional à idade. Em outros termos, a resistividade elétrica do material aumenta com o avanço das reações do cimento e, conseqüentemente, com a idade do concreto.

Além disso, estudos realizados por WOELF e LAUER (1979) indicaram um aumento significativo da resistividade elétrica em corpos-de-prova de concreto submetidos à cura ao ar, quando comparados aos corpos-de-prova sujeitos a processos de cura úmida.

Quando ocorre a redução da quantidade de água disponível para hidratação do cimento, as reações ocorridas nas primeiras idades ficam comprometidas, gerando aparecimento de aberturas e fissuras no concreto. Esse efeito pode ser maximizado pela ação de ventos e pela baixa umidade relativa do ar, o que reduz a resistência mecânica do concreto e altera a resistividade elétrica do material.

Dessa forma, ensaios realizados nas primeiras idades do concreto devem observar o efeito de hidratação do cimento, para que não haja variações e análises equivocadas dos valores de resistividade obtidos, uma vez que as reações de hidratação podem alterar sensivelmente a quantidade de água livre no interior do material.

3.1.3. Teor de umidade

Quando se trata da umidade relativa do ar, percebe-se que este é um fator fundamental para o grau de saturação dos poros, que influencia diretamente a resistividade elétrica do concreto, sobretudo na área mais próxima à superfície da estrutura.

O percentual de saturação dos poros do concreto pode variar em função de vários fatores, inclusive pelas condições ambientais onde a estrutura está inserida, como as mudanças na umidade relativa do ar, incidência de chuvas e exposição à radiação solar direta, que podem alterar a quantidade de água presentes nos poros do concreto, conforme apresentado por CASTELLOTE *et al.* (2002).

Segundo ABREU (1998), quanto maior o grau de saturação dos poros do concreto, menor será a resistividade elétrica percebida na estrutura e, a princípio, maior a velocidade de corrosão do aço. Isso ocorre pela restrição da condução de carga elétrica entre áreas anódicas e catódicas da armadura.

Deste modo, como o teor de umidade altera sensivelmente os valores de resistividade elétrica do concreto, principalmente quando se trata de análise da resistividade superficial, deve ser evitada a realização de ensaios *in loco* em períodos chuvosos ou sob condição de insolação intensa atípica.

Para que o resultado não seja avaliado erroneamente, a literatura recomenda que o concreto esteja saturado com superfície seca e toda estrutura ou amostras analisadas sob as mesmas condições, para evitar distorções nas leituras dos equipamentos.

3.1.4. Temperatura

Mudanças de temperatura também implicam em alterações significativas na resistividade do concreto, conforme afirmado por POLDER *et al.* (2000), por exemplo, quando mantida constante a umidade do material, o aumento da temperatura pode provocar uma queda da resistividade, ou seja, temperatura e resistividade são parâmetros que se relacionam inversamente para o concreto.

Ainda de acordo com POLDER *et al.* (2000), essa variação supracitada é justificada pelo aumento da mobilidade iônica e pela maior interação entre os íons que compõem a solução contida nos poros e o concreto.

Já AL-ABDUL-HADI (1982) analisou a influência da variação da temperatura em um concreto produzido com relação $a/c = 0,5$. Nesse estudo, foi avaliada a resistividade do material submetido a temperaturas de 20° C, 40° C, 60° C e 80° C. Foi observado que a resistividade do concreto a 80° C corresponde a 46% da resistividade do mesmo concreto a 20° C, enquanto amostras analisadas à temperatura de 40° C apresentam redução próxima de 34%, quando comparadas aos valores obtidos a 20° C.

De acordo com POLDER *et al.* (2000), em consonância com as recomendações técnicas da *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures – RILEM*, organização criada ainda na década de 1940, a correlação dos dados de resistividade elétrica de um material em função da variação da temperatura é algo complexo.

Segundo AGUIAR (2018), a condutividade elétrica é um parâmetro relevante quando o material sofre variação de temperatura, isto ocorre pelo comportamento oposto de elementos condutores e semicondutores, conforme visto na Figura 2. Ao longo deste trabalho são discutidas outras características resistivas do concreto armado e seus componentes.

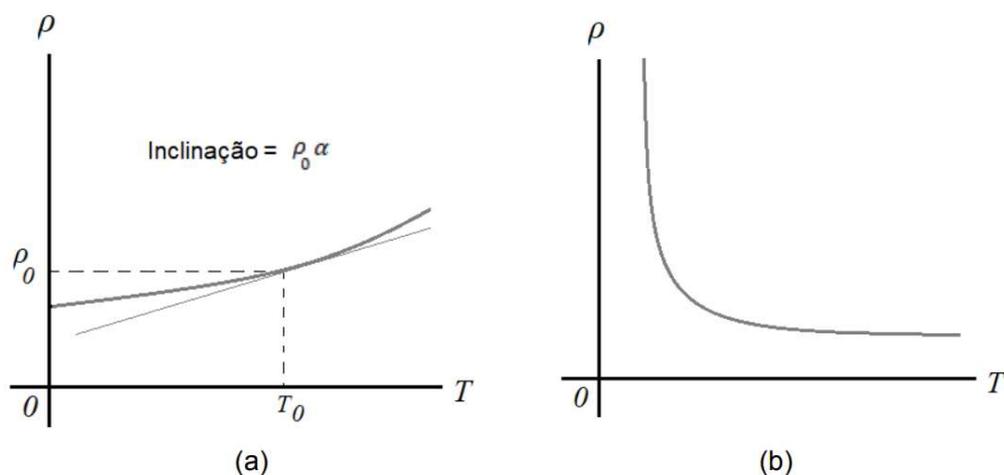


Figura 2 – Variação da resistividade elétrica em função da temperatura para (a) um condutor (metal) e (b) um semicondutor (Adaptado de YOUNG, 2009).

YOUNG (2009) conclui que, para os materiais condutores, o aumento da temperatura está associado ao aumento do grau de energia dos íons, com isso, uma maior amplitude de vibração eleva a probabilidade de colisão entre elétrons e íons, dificultando o arraste de elétrons através do condutor e, por conseguinte, reduzindo a corrente elétrica através do elemento.

Já no caso dos semicondutores, há redução da resistividade elétrica com o aumento da temperatura, devido ao fato dos elétrons estabelecerem ligações mais fracas com os átomos em temperaturas elevadas, adquirindo maior mobilidade.

POLDER *et al.* (2000) ainda apresentam um modelo matemático para o cálculo da resistividade, com a utilização de um fator empírico, o que pode distorcer os valores reais desta propriedade do material.

De forma simplificada, POLDER *et al.* (2000) concluem que pode ser considerado um aumento de 100% da resistividade quando há uma queda de 20° na temperatura, desde que analisado um intervalo de variação entre 0°C a 40°C. Da mesma forma, pode-se assumir uma variação de 3% a 5% no valor de resistividade para concreto úmido e seco, respectivamente, em função de cada grau de temperatura, o que permite admitir certa linearidade no comportamento do material para temperaturas menores.

3.1.5. Agregados

Estruturalmente falando, o concreto pode ser definido como um compósito formado por partículas de aglomerante (cimento), agregados de vários tamanhos, eventuais aditivos e água. Esta última, quando em contato com o aglomerante, forma uma pasta de cimento Portland, de acordo com WHITINGTON *et al.* (1981).

Segundo GOWERS e MILLARD (1999), quando é utilizado o método de Wenner, que será discutido adiante, para avaliação da resistividade elétrica de determinado material, admite-se que o material analisado seja homogêneo.

Entretanto, o concreto apresenta partículas que possuem, geralmente, comportamentos diferentes no que se refere à resistividade, podendo os agregados apresentar valores muito mais elevados quando comparados à pasta de cimento. Com isso, a maior parte da corrente elétrica é conduzida, preferencialmente, através da pasta, que oferece menor resistência à sua passagem.

Ademais, segundo SANTOS (2006), a resistividade elétrica do concreto é muito mais sensível às variações das características da pasta de cimento do que às mudanças nos agregados utilizados na composição do material.

Com isso, a resistividade elétrica do concreto tende a alcançar valores maiores quando há o aumento da quantidade de agregado utilizado. Conforme MONFORE (1968), por se tratar de material praticamente não condutor, a presença de agregados no concreto funciona como obstáculo à passagem da corrente elétrica, aumentando o caminho a ser percorrido pela corrente, de forma que sua trajetória efetiva seja maior do que a dimensão do material.

Assim, quanto maior o percentual de agregados no traço, mais dificuldade a corrente elétrica terá para passar pelo concreto, devido ao efeito de obstrução ou barreira que os agregados geram, conseqüentemente maior será a resistividade elétrica observada.

Com o aumento do consumo de agregados e, conseqüentemente, redução do volume de pasta no concreto, o resultado é a diminuição da porosidade do material. Estudos realizados por HUGHES *et al.* (1985, apud HOPPE, 2005) avaliaram a influência do teor de agregados na resistividade elétrica do material e os resultados são ilustrados pela Figura 3.

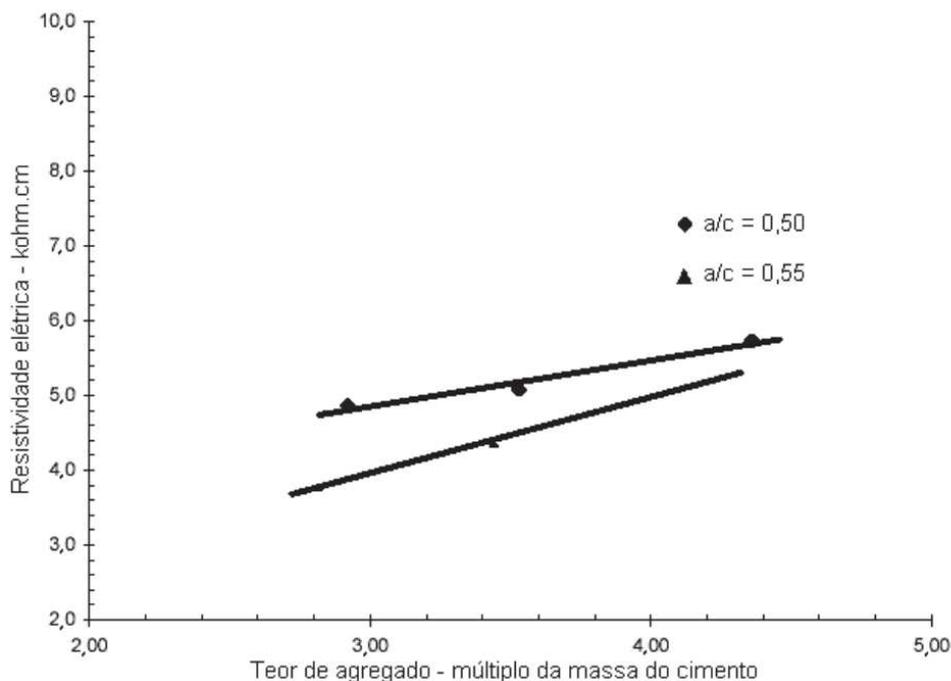


Figura 3 – Efeito do teor do agregado na resistividade elétrica do concreto (HUGHES *et al.*, 1985 apud HOPPE, 2005).

3.1.6. Carbonatação e íons cloreto

A porosidade do concreto é um dos principais parâmetros que permitem a permeabilidade de fluidos como o CO₂ e a difusividade de íons cloreto em seu interior (MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014). Com isso, por serem fatores diretamente ligados à deterioração do aço, o número de poros e a conectividade entre eles altera a resistividade elétrica do material, que, por sua vez, pode ser tomada como indicador da tendência à corrosão das armaduras.

Segundo MILLARD (1991), o produto da reação de carbonatação é o carbonato de cálcio, que preenche os poros do concreto e provoca o endurecimento da superfície do material, contribuindo para um aumento significativo da resistividade elétrica superficial.

Quando o concreto é exposto a um grau de saturação elevado, principalmente se a frente de carbonatação já tiver alcançado a armadura, a corrosão do aço também pode ser elevada, seguindo a correlação inversamente proporcional entre a resistividade e a taxa de corrosão, de acordo POLDER *et al.* (2000).

Além disso, POLDER *et al.* (2000) também afirma que a carbonatação pode ocasionar o aumento da resistividade elétrica do concreto, uma vez que reduz a concentração dos íons existentes na solução aquosa presente nos poros do concreto, sendo que esta solução é responsável pela condução da corrente.

Estudos feitos por CHI *et al.* (2002) avaliaram os efeitos da carbonatação nas propriedades mecânicas e durabilidade do concreto. A Figura 4 apresenta os resultados obtidos e indica um aumento da resistividade com o avanço do tempo de carbonatação, fato que pode ser explicado, segundo os autores, pela redução da porosidade da pasta decorrente da conversão de Ca(OH)₂ em CaCO₃.

Já o efeito dos íons cloreto na resistividade elétrica do concreto não é tão simples de ser entendido. Isso porque, enquanto alguns autores afirmam que a ação de cloretos sobre a resistividade elétrica é irrelevante, outros entendem que esse fator pode gerar uma redução significativa da resistividade quando há o aumento do teor desses íons no interior do concreto.

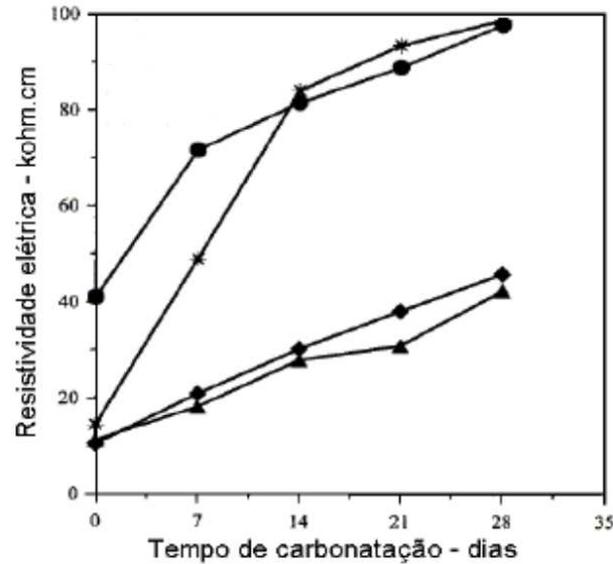


Figura 4 – Evolução resistividade elétrica do concreto com o avanço da carbonatação (Adaptado de CHI *et al.*, 2002).

Para SALEEM *et al.* (1996), a contaminação do concreto por íons cloreto e sulfatos reduz a resistividade elétrica do material, conforme pode ser visto na Figura 5. Os resultados apresentados pelo autor indicam um decréscimo exponencial da resistividade devido ao aumento do teor de umidade, à maior concentração de cloretos e sulfatos, bem como à condutividade iônica da corrente elétrica dessas soluções.

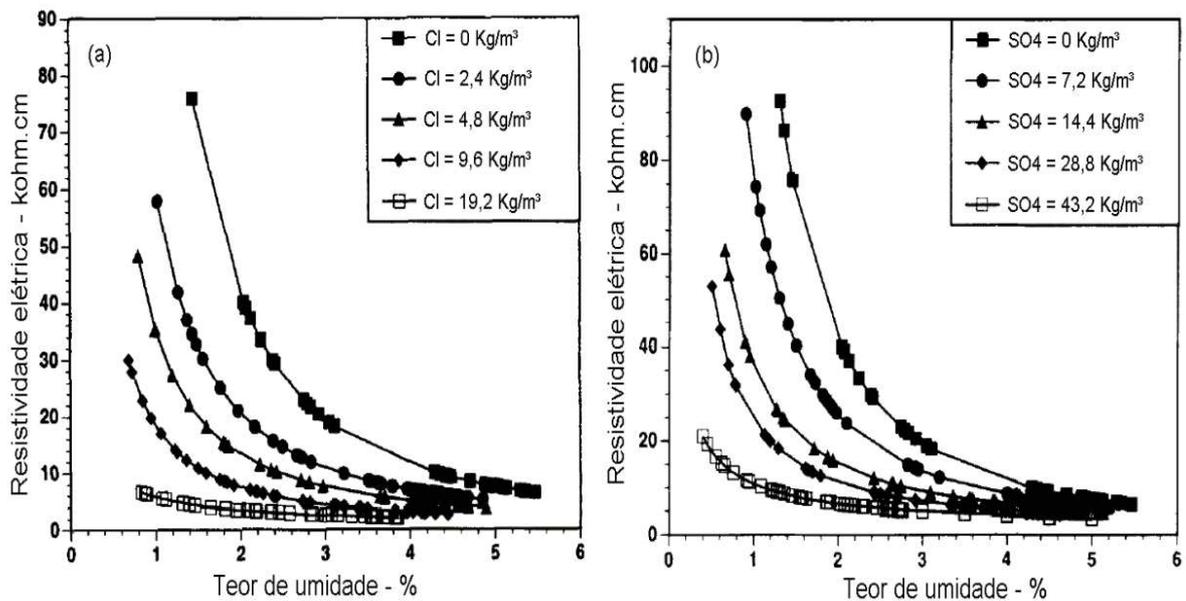


Figura 5 – Influência da concentração de íons em solução na resistividade elétrica do concreto (Adaptado de CHI *et al.*, 2002).

Quando se observa estruturas com quantidade de poros elevada, nota-se também que estas apresentam baixa resistividade elétrica e grande penetração de íons cloreto (POLDER *et al.*, 2000). Quando se analisa um concreto não carbonatado, pelo contrário, o efeito da penetração destes íons na resistividade é relativamente pequeno.

Estudos realizados por HUNKELER (1996) mostram que o pH da pasta de cimento, solução formada por álcalis como o Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio), diminui com o aumento da concentração de Cl^- , havendo a redução também da concentração de íons Ca^{2+} e OH^- do concreto. Desta forma, o aumento de Cl^- possibilita reações químicas que envolvem a diminuição de íons OH^- , o que leva à redução do pH da solução aquosa existente nos poros do concreto.

3.1.7. Adições minerais

No que se refere às adições minerais, como por exemplo, sílica ativa, cinza volante e escória de alto-forno, materiais inertes muito finos, podem influenciar a resistividade elétrica do concreto positivamente, visto que provocam um melhor empacotamento das partículas de cimento e reduzem dos poros da pasta, seja por reações químicas e/ou físicas, conforme exposto por SANTOS (2006).

Os cimentos com escória de alto forno (CPIII) e pozolanas (CPIV) apresentam resistividades elétricas superiores, aos cimentos CPII e CPV. Este fator pode ser explicado devido às próprias adições desses cimentos (escória ou pozolana), as quais reduzem a dimensão dos poros do concreto e, conseqüentemente, reduzem a sua permeabilidade, aumentando a resistividade elétrica. Os cimentos CPIII e CPIV também apresentam um aumento da resistividade gradativo ao longo do tempo, tendo em vista que as reações de hidratação dos grãos de cimento são mais progressivas do que os cimentos CPII e CPV, que reagem mais rapidamente com a água (MEDEIROS-JUNIOR e LIMA, 2016).

Portanto, quando se compara duas amostras de concreto, contendo o mesmo traço, diferenciando apenas pela adição de minerais, ocorre uma variação da resistividade elétrica. Uma maior densidade e a redução da dimensão dos poros dificultam a passagem da corrente através do concreto, gerando um aumento da resistividade elétrica do material.

3.2. Ensaio de resistividade elétrica do concreto

Existem várias formas para medir valores de resistividade elétrica do concreto, podendo ser analisada a resistividade volumétrica ou superficial do material. Dentre as metodologias mais empregadas, destacam-se o método dos dois eletrodos e o método dos três eletrodos, utilizados para avaliar a resistividade volumétrica do concreto, e o método dos quatro eletrodos, também conhecido como método Wenner, que mede a resistividade elétrica superficial do material (GJØRV, 2015).

Atualmente, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui regulamentado apenas o método dos três eletrodos, normalizado pela NBR 9204:2012 – *Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica volumétrica – Método de ensaio*, para avaliação da resistividade elétrica do concreto.

Sendo assim, para ensaios de resistividade elétrica superficial, é necessária a utilização de normas estrangeiras, como, por exemplo, a AASHTO T358-17 – *Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*.

Com diferentes metodologias de ensaio, nota-se que a avaliação da resistividade elétrica do concreto através de técnicas distintas, normalmente, produz resultados diversos, que dificilmente são passíveis de comparação (AGUIAR, 2018).

O método dos quatro pontos é um dos ensaios mais utilizados para determinação da resistividade elétrica superficial do concreto e apresenta vantagens quando comparado aos ensaios de resistividade volumétrica. Isto porque são necessários poucos equipamentos para sua realização, pela possibilidade de ser executado tanto em laboratório quanto *in situ* e, principalmente, por ser um método não destrutivo (SILVA, 2016).

Uma das principais características que diferencia os mais diversos tipos de materiais existentes, intrínseca ao material e oriunda de sua composição química, é sua resistividade elétrica (ρ).

Para melhor compreensão da resistividade elétrica do concreto, partindo dos conceitos de eletromagnetismo e conforme definido por GIROTTI e SANTOS (2002), a resistividade elétrica (ρ) pode ser definida como a razão entre o campo

elétrico (E) gerado por uma diferença de potencial e a densidade de corrente (J), como apresentado na Equação 1.

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

ρ é a resistividade elétrica, medida em ohms-metros (Ωm);

E é o campo elétrico, medido em ampère (V/m); e

J é a densidade de corrente elétrica, medida em ohm (A/m^2).

A Lei de Ohm define que um condutor, mantido à temperatura constante, apresenta intensidade de corrente elétrica proporcional à diferença de potencial aplicada entre suas extremidades (YOUNG, 2009). Em outras palavras, um material é dito ôhmico quando sua resistência elétrica (R) é proporcional à razão da diferença de potencial elétrico (V) e a intensidade de corrente (I), conforme apresentado na Equação 2.

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

V é a diferença de potencial elétrico (ou tensão, ou d.d.p.), medida em volt (V);

I é a intensidade da corrente elétrica, medida em ampère (A); e

R é a resistência elétrica de um material, medida em ohm (Ω).

Além disso, sabe-se que a densidade de corrente (J) está associada à intensidade de corrente (I) que passa por um condutor de área (A). Quando a área da seção não varia ao longo do condutor, pode-se adotar a relação linear dada pela Equação 3.

$$J = \frac{I}{A} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

A é a área da seção do objeto, em metros quadrados (m^2).

Como a resistência elétrica (R) de um condutor, desde que este seja constituído por material homogêneo e possua seção transversal constante, é diretamente proporcional ao seu comprimento (L) e inversamente proporcional à sua área de seção transversal (A), então a resistência é dada pela Equação 4.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

L é o comprimento do objeto, medido em metros (m).

Logo, da Equação 4, nota-se que a resistividade elétrica (ρ) é diretamente proporcional à resistência (R) quando se trata de materiais ôhmicos e, conforme apresentado por VILLATE (2012), quanto maior a resistividade elétrica de um material condutor, maior é sua capacidade de impedir a passagem desta corrente.

3.2.1. Resistividade elétrica superficial pelo método Wenner (quatro pontos)

Este método de ensaio, conforme descrito por GOWERS e MILLARD (1999), consiste na utilização de equipamento que conta com quatro contatos, igualmente espaçados, posicionados tocando a superfície de concreto. Então é estabelecida uma pequena corrente elétrica alternada (I), aplicada sobre a estrutura, entre os contatos externos. A partir desta corrente, a diferença de potencial (V) é medida entre os contatos internos do equipamento, como mostra a Figura 6.

É importante destacar que esta técnica, que indica valores de resistividade elétrica superficial do concreto, foi criada inicialmente para a avaliação da resistividade de solos, principalmente em instalações e redes elétricas. Contudo, de acordo com SANTOS (2006), sua utilização em elementos de concreto já foi amplamente estudada, inclusive com equipamentos específicos para este fim.

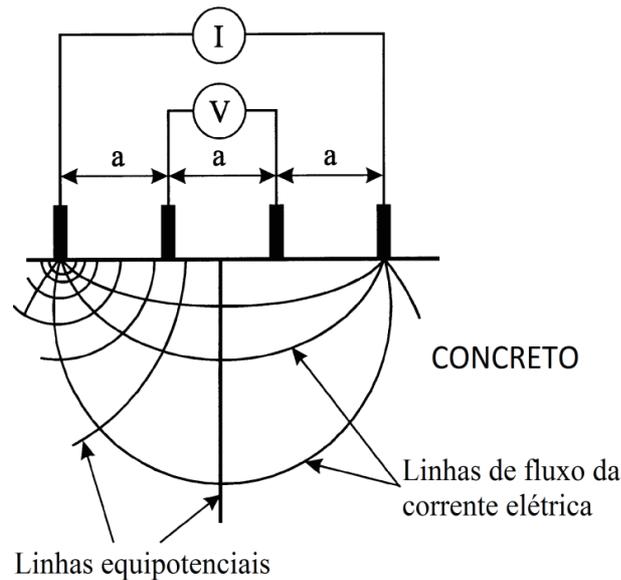


Figura 6 - Método de Wenner para as medidas de resistividade elétrica superficial do concreto (Adaptado de GOWERS e MILLARD, 1999).

Substituindo as Equações (2) em (4), ainda segundo GOWERS e MILLARD (1999), com os devidos ajustes para uma geometria semi-infinita, a resistividade elétrica (ρ) pode ser dada pela Equação 5.

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

a é o espaçamento entre os eletrodos do equipamento, em centímetros, (cm);

As linhas de fluxo da corrente elétrica, geradas pelo equipamento e representadas na Figura 6, devem ser consideradas durante a realização do ensaio. Isso significa que há necessidade de verificação das dimensões mínimas do elemento de concreto em análise, de forma a se evitar fuga de corrente. Eventuais dispersões da corrente aplicada podem gerar distorções nos resultados obtidos durante o ensaio e mascarar os valores de resistividade elétrica reais do material.

Pela facilidade e rapidez da realização deste ensaio *in situ*, o método dos quatro pontos torna-se atrativo para execução em estruturas de concreto onde há restrições para a extração de testemunhos, seja pelo acesso aos elementos estruturais, pelo porte da estrutura ou pelo custo dos serviços (AGUIAR, 2018).

De acordo com HELENE (1993), a resistividade elétrica é uma propriedade do concreto relevante no estudo da evolução do processo de corrosão das armaduras, principalmente do ponto de vista eletroquímico.

Devido à natureza eletroquímica dessa deterioração, as transformações resultantes sugerem uma relação entre a resistividade do concreto e a velocidade da corrosão das armaduras, ainda mais intensa após a despassivação do aço. Isso porque a mobilidade iônica, entre as regiões com diferentes potenciais elétricos, é um fator que influencia a velocidade das reações anódicas e catódicas no interior do concreto (SANTOS, 2006).

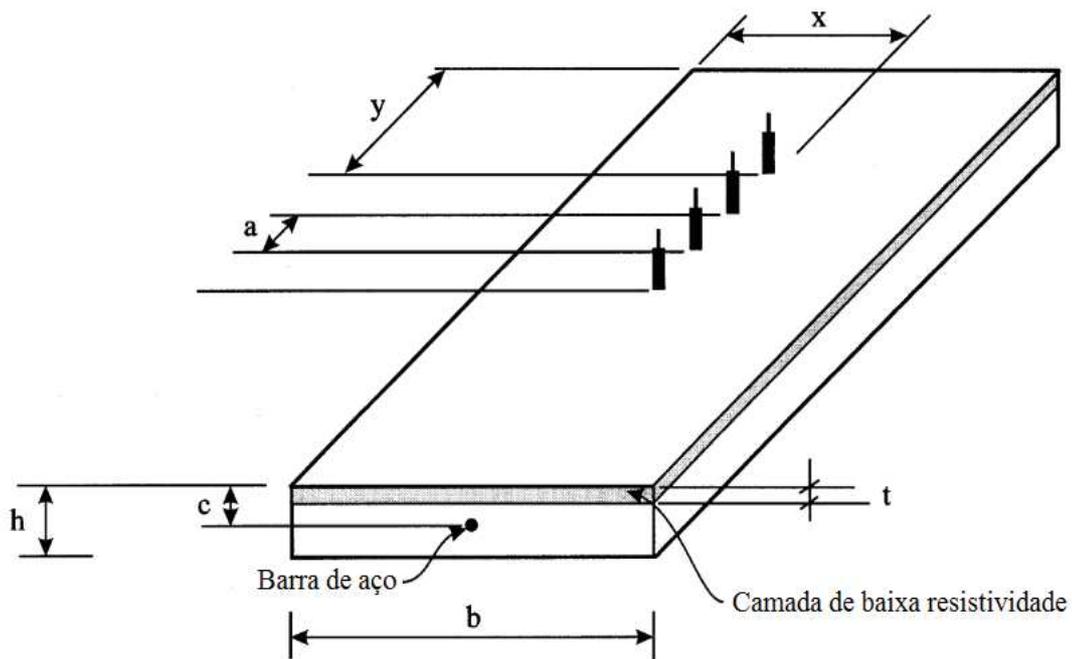
Quando observadas determinadas estruturas, onde já houve início o processo de despassivação da armadura, os testes realizados por POLDER (2001) indicaram que áreas com menores valores de resistividade elétrica apresentam uma taxa de corrosão relativamente maior, principalmente quando comparadas aos trechos com armaduras íntegras.

Como visto no item 3.1, vários são os fatores que afetam a resistividade elétrica do concreto, entretanto, existem outras considerações a se fazer durante a realização de ensaios de resistividade elétrica superficial, inclusive por provocarem variações nos resultados obtidos.

Primeiramente, devem-se considerar as dimensões mínimas dos elementos estruturais que serão analisados, para que problemas de fuga de corrente e distorções dos valores medidos durante ensaios de resistividade sejam evitados. GOWERS e MILLARD (1999) recomendam alguns parâmetros geométricos, de forma a orientar pesquisas onde seja aplicado o método de Wenner, conforme apresentado na Figura 7.

A posição das barras de aço da armadura, por serem elementos com característica de condutividade elétrica diferente do concreto, deve ser observada previamente. Isto porque alteram o fluxo da corrente elétrica e podem induzir à interpretação equivocada dos resultados.

De acordo com GIROTTO e SANTOS (2002), os metais e ligas metálicas geralmente apresentam menor resistividade elétrica, sendo classificados como materiais condutores. Quando a característica de resistividade é significativa e a capacidade de conduzir a corrente elétrica é baixa, classifica-se o material como isolante.



Onde:

$$\begin{array}{l}
 a \left\{ \begin{array}{l}
 > 40 \text{ mm} \\
 \leq \frac{h}{4} \\
 \leq \frac{b}{4} \\
 \leq \frac{2}{3} c, \text{ se houver presença de barra de aço} \\
 \geq 8 t, \text{ se houver camada de baixa resistividade} \\
 \geq 1,5 \phi_{\text{máx}}, \text{ onde } \phi_{\text{máx}} \text{ é o tamanho máximo do agregado}
 \end{array} \right. \\
 x \geq 2a \\
 y = \text{sem restrições}
 \end{array}$$

Figura 7 – Parâmetros geométricos recomendados para ensaio de resistividade elétrica superficial do concreto (Adaptado de GOWERS e MILLARD, 1999).

Há também materiais cuja resistividade elétrica e a condutividade se encontram em um patamar intermediário quando comparados aos isolantes e condutores, sendo denominados materiais semicondutores. Em seu trabalho, GIROTTO e SANTOS (2002) afirmam que condutores podem apresentar condutividade elétrica cerca de 10^{22} maior do que a do isolante.

Quando se trata do método de Wenner, a execução incorreta do ensaio pode gerar medidas de resistividade acima ou abaixo do valor real, a depender de qual dos eletrodos estiver próximo à barra, conforme indicado por POLDER *et al.* (2000).

Estudos realizados por GOWERS e MILLARD (1999) sugerem que deve ser considerada a espessura da camada carbonatada e o espaçamento entre os eletrodos durante o ensaio de resistividade superficial, devendo-se aumentar a distância entre os contatos do equipamento conforme o estágio da frente de carbonatação. Embora, aparentemente, esta última possa aumentar a resistência mecânica e a resistividade elétrica do concreto, isso ocorre a nível superficial, diferenciando da parte interior do material.

Como não existem normas brasileiras que regulamentam a execução deste ensaio, frequentemente são utilizadas normas internacionais (LENCIONI, 2011). Dentre elas, pode-se destacar: *“Test methods for on site measurement of resistivity of concrete”* (RILEM, 2000); *Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration - T358-17* (AASHTO, 2017); *“Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner”* (UNE 83988-2:2014).

3.2.2. Método dos dois pontos para análise da resistividade volumétrica

Esta técnica consiste na aplicação de um campo elétrico entre dois eletrodos de cobre, em forma de chapa, posicionados nas extremidades do corpo de prova (Figura 8). Conforme LENCIONI (2011), as amostras podem ser cilíndricas ou prismáticas, moldadas ou extraídas, entretanto os ensaios devem ser realizados com as mesmas em condição saturada.

Para a realização do ensaio, é necessário aplicar uma corrente elétrica entre as chapas de cobre, posicionadas paralelamente, que resultará em uma diferença de potencial entre os eletrodos. Para garantir o contato adequado entre a superfície de concreto e a peça metálica, AGUIAR (2018) recomenda a utilização de esponja de aço umedecida.

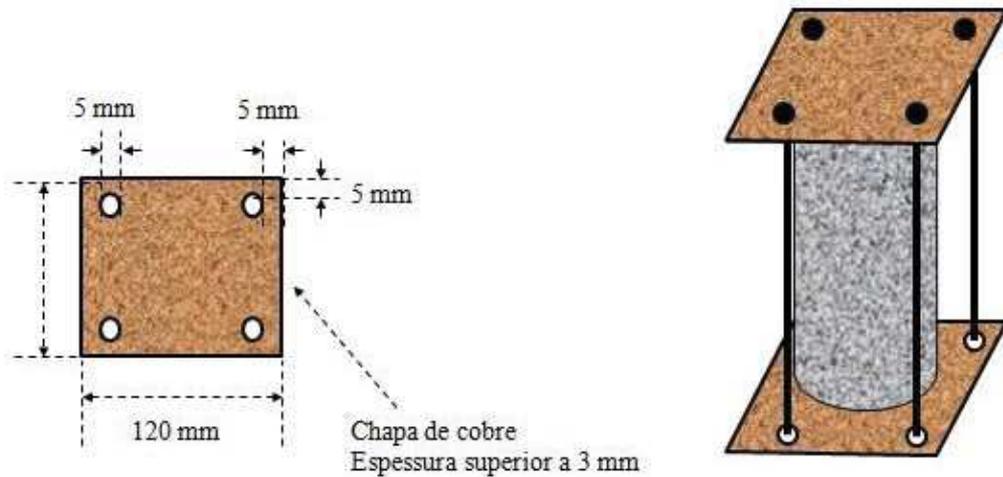


Figura 8 – Esboço do sistema montado com a amostra de concreto e as chapas de cobre para obtenção da resistividade volumétrica pelo método dos dois eletrodos (LAMOUNIER, 2014).

Após a montagem do conjunto, procede-se a aplicação de corrente alternada no interior do corpo de prova de concreto, realizando leituras da queda de potencial observada entre os eletrodos. Esta redução indica a resistência elétrica do material e pode-se definir a resistividade por meio de um ohmímetro (R) em uma frequência pré-estabelecida (GJØRV, 2015), conforme Figura 9.

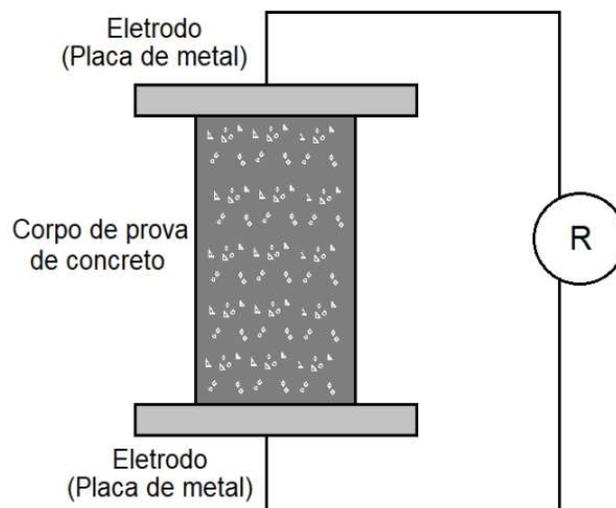


Figura 9 – Detalhe do conjunto utilizado para ensaio de análise da resistividade volumétrica do concreto (GJØRV, 2015).

Esta técnica apresenta a vantagem de ser um método simples e confiável para medir a resistividade elétrica volumétrica em testes de laboratório. Entretanto, diferentemente do ensaio de resistividade elétrica superficial, a avaliação da resistividade elétrica volumétrica do concreto exige a extração de testemunhos *in*

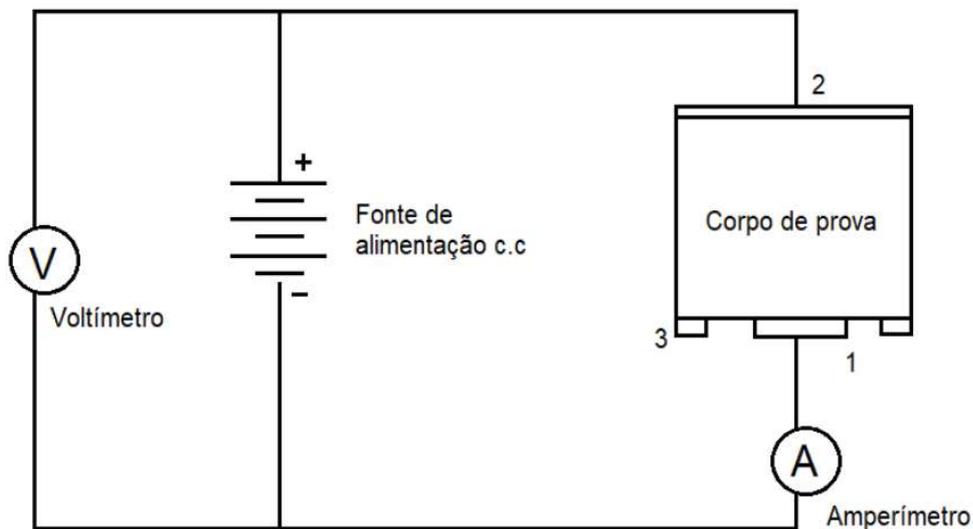
loco ou a moldagem de amostras do material durante a execução da estrutura, o que pode limitar sua utilização em alguns casos (LAYSSI *et al.*, 2015).

Como este ensaio para medição de resistividade não é destrutivo, as mesmas amostras de concreto cilíndricas moldadas podem ser utilizadas em outros ensaios, inclusive em teste de resistência mecânica.

3.2.3. Análise da resistividade elétrica pelo método dos três pontos

Este método é normalizado pela NBR 9204:2012 e consiste na determinação da resistividade elétrica de corpos de prova de concreto moldados em laboratório ou através de testemunhos extraídos em campo (LENCIONI, 2011).

Para a realização deste ensaio, uma fonte de alimentação de corrente contínua é ligada a um voltímetro e um miliamperímetro, conforme esquema apresentado na Figura 10. A esse sistema são interligados três eletrodos de mercúrio metálico líquido (eletrodo principal ou blindado; eletrodo secundário ou não blindado e eletrodo de blindagem) e é aplicada tensão contínua de aproximadamente 50 V.



- 1 - Eletrodo principal ou blindado
- 2 - Eletrodo secundário ou não blindado
- 3 - Eletrodo de blindagem

Figura 10 – Esquema elétrico do ensaio para obtenção da resistividade volumétrica pelo método dos três eletrodos (NBR 9402:2012).

Quando comparado ao método Wenner (método dos quatro pontos), fica evidente a desvantagem de aplicação do método dos três pontos, pelas dificuldades de realização do ensaio *in situ* e a necessidade de extração de amostras da estrutura.

3.3. Determinação do índice de vazios do concreto

Conforme já dito anteriormente, a porosidade é uma importante propriedade que influencia, principalmente, a durabilidade do concreto, uma vez que um maior número de poros e a interligação entre eles facilitam a passagem de água e outros elementos para seu interior, o que estimula o início do processo corrosivo.

A composição do concreto, o procedimento de aplicação e o processo de cura adotado podem contribuir significativamente para o aumento da porosidade do material, que influencia não só a resistividade elétrica, mas também podem comprometer a resistência mecânica da estrutura (QUARCIONI *et al.* 2009).

A porosidade também foi avaliada por MEHTA e MONTEIRO (2008), que relacionaram essa propriedade de argamassas produzidas com diferentes dosagens e a resistência à compressão do material, conforme apresentado na Figura 11.

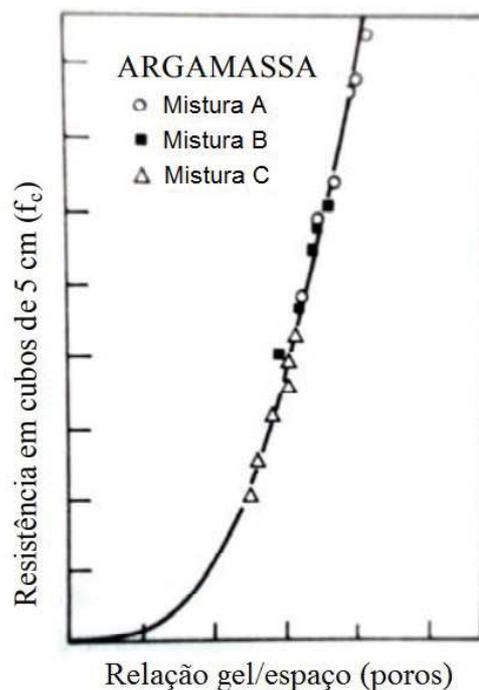


Figura 11 – Relação porosidade-resistência em argamassas de cimento Portland com diferentes dosagens (Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo CAMPITELLI (1987), a porosidade de um material é a sua propriedade de apresentar poros ou vazios interligados. Como visto ao longo deste trabalho, essa característica é inversamente proporcional à resistividade elétrica do concreto. Dessa forma, pode-se relacionar o volume total de uma amostra com o volume de poros do material.

A norma NBR 9778:2009 – *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*, indica as condições mínimas exigíveis para ensaios de determinação da porosidade de amostras de concreto.

A realização do ensaio é feita a partir da comparação da massa seca, massa saturada e massa submersa da amostra. Para tal, é necessária a utilização de estufa, recipiente para submersão do material em água fervente e balança hidrostática. Os detalhes do ensaio, suas especificidades, a aparelhagem utilizada e as etapas para sua realização são discutidos no tópico 4.3.5 deste trabalho.

Vale ressaltar que, concretos que apresentam menor número de poros geralmente estão relacionados a um baixo fator água/cimento. Além disso, o adequado dimensionamento e adensamento do material durante a execução da estrutura contribuem para uma menor porosidade e o aumento da durabilidade da estrutura.

Contudo, a corrosão da armadura pode ocorrer mesmo nessas situações, visto que, com o passar do tempo, há um aumento da permeabilidade do concreto devido à fissuração que é inerente a este tipo de material. Tanto as deformações devidas ao peso próprio da estrutura quanto os efeitos de sua utilização ao longo do tempo favorecem a propagação das microfissuras no material.

Estas fissuras se tornam caminhos preferenciais, que geralmente estão presentes na superfície do concreto e na zona de transição entre a pasta e o agregado graúdo. A interconexão destas aberturas, somadas aos poros do material, fazem com que a estrutura perca a sua capacidade hermética, o que favorece a entrada de agentes agressivos e deletérios.

3.4. Ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão axial do concreto é uma das propriedades mecânicas mais estudadas e conhecidas do material, sendo amplamente utilizada no dimensionamento das estruturas. Para a realização do ensaio, quando não há indicação da idade do material para sua realização, geralmente adota-se 28 dias (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo NEVILLE (1997), a resistência à compressão do concreto é inversamente proporcional à relação água/cimento adotada durante sua produção e diretamente proporcional ao adensamento realizado na moldagem do material. Além disso, MEHTA e MONTEIRO (2008) afirmam que, quanto maior o tempo de cura úmida a que se submete o concreto, maior será a resistência à compressão.

Outro fator que influencia a resistência mecânica do concreto são as características dos agregados, como: dimensões, forma, textura e mineralogia. Quanto mais rugosas as superfícies dos agregados, melhor a aderência destes com a pasta de cimento e maior a resistência à compressão verificada (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Uma maneira de medir a resistência mecânica do concreto é através do ensaio de compressão uniaxial, descrito pela norma NBR 5739:2018 – *Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Neste caso, pode-se calcular a resistência do material pela Equação 6.

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão (MPa);

F é a força de ruptura (N);

A é a área (m²).

3.5. Ensaio de ultrassom

Normalmente a avaliação da condição do material que constitui a estrutura é feita a partir da extração de testemunhos da mesma, ou seja, ensaios destrutivos

que podem danificá-la ou comprometê-la. Sendo assim, o uso de técnicas não destrutivas tem se mostrado cada vez mais relevante, principalmente quando há interesse em analisar a resistência mecânica dos materiais aplicados em grandes estruturas.

A execução de métodos menos invasivos, onde não seja necessária a retirada de amostras do material, passa a ser uma alternativa atraente, uma vez que existem diversos ensaios não destrutivos que permitem, inclusive, uma maior precisão da análise. Esses ensaios fornecem informações a respeito da integridade estrutural dos elementos e podem contribuir durante a tomada de decisão pela forma de intervenção, ações corretivas e manutenção das estruturas (PERLIN e PINTO, 2013).

O ensaio através de ultrassonografia destaca-se dentre as diversas técnicas não destrutivas disponíveis, que possibilita avaliar a resistência do concreto através de curvas de correlação e permite inspecionar elementos estruturais a procura de regiões não homogêneas em seu interior (PERLIN e PINTO, 2013).

Usualmente, a técnica de inspeção com o ultrassom, que identifica essas não homogeneidades, consiste em efetuar leituras diretas ao longo da estrutura, obtendo o tempo de propagação da onda ultrassônica. Em seguida, a velocidade da onda em cada ponto é calculada em função da distância entre os transdutores do equipamento. Desta forma, as zonas com menores homogeneidades são detectadas pela existência de baixas velocidades associadas.

Contudo, a representação obtida por esse método é, de certa forma, deficiente, pois se trata de uma tentativa de expressar uma seção bidimensional em um gráfico unidimensional. Para garantir a durabilidade adequada de uma estrutura executada em concreto, é necessário um rigoroso controle de qualidade, especialmente nos materiais que o compõem. É possível realizar esse controle através de ensaios tecnológicos que garantam que a vida útil projetada seja atingida (MAZER, 2012).

Como pode ser visto, o ensaio de ultrassom é do tipo não destrutivo, utilizado como meio de verificação da qualidade de concretos e argamassas, permitindo detectar falhas de adensamento, alteração na relação água/cimento, existência e desenvolvimento de fissuras em estruturas, monitoramento de variações no concreto

em função da agressividade do meio, dentre outros (NBR 8802:2019; NEVILLE e BROOKS, 2013; QASRAWI, 2000).

As ondas sonoras são ondas mecânicas longitudinais, onde as partículas se deslocam na direção de propagação da onda, em meios sólidos, aquosos e gasosos. As ondas com frequência até 16Hz são ondas subsônicas, as ondas sônicas (ondas audíveis) possuem uma frequência entre 16Hz a 20kHz e as ondas ultrassônicas são aquelas que apresentam frequência é acima de 20kHz, comumente utilizadas em ensaios de inspeção em estruturas de concreto. (HALLIDAY e RESNICK, 1991 apud NASCIMENTO *et al.*, 2016).

O equipamento gera um pulso de vibrações em frequência ultrassônica, que é transmitido por um transdutor eletroacústico (emissor) mantido em contato com a face plana do CP. Ao passar pelo concreto, as vibrações são recebidas e convertidas em sinal elétrico por um segundo transdutor (receptor), que é enviado por um amplificador para um osciloscópio, medindo com exatidão o tempo de trânsito do pulso através do concreto (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Este método é normalizado no Brasil pela NBR 8802:2019 – *Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*, onde são indicadas três posições possíveis para emissão e recepção do pulso ultrassônico, conforme pode ser visto na Figura 12. Segundo POPOVICS *et al.* (1998), a transmissão pode ser dos tipos direta, indireta e semi-indireta, sendo a primeira a mais recomendada para avaliar elementos estruturais em concreto armado, devido à maior precisão dos resultados.

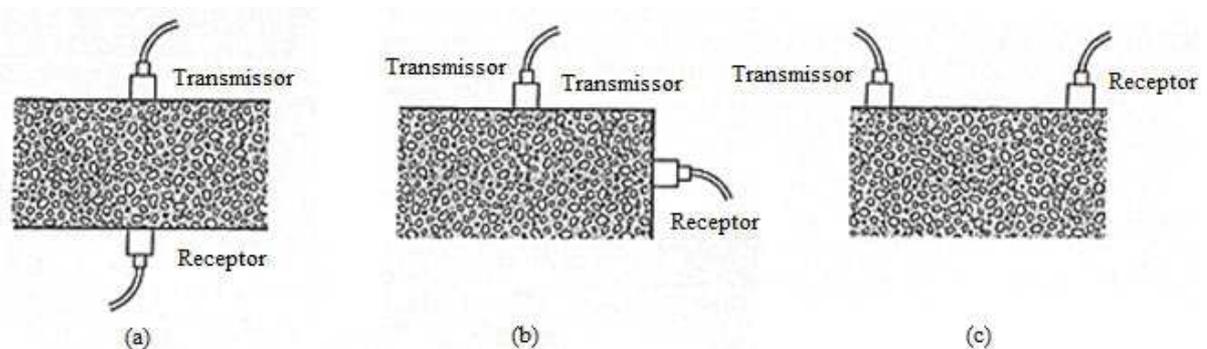


Figura 12 – Métodos de propagação e recepção de pulsos ultrassônicos: a) transmissão direta; b) transmissão semidireta e c) transmissão indireta ou superficial. (Adaptado de NEVILLE & BROOKS, 2013).

Uma vez que resistência mecânica é a principal propriedade de interesse em concretos estruturais, pode-se relacionar a velocidade de propagação da onda ultrassônica à resistência característica à compressão, inclusive através de gráficos de velocidade versus resistência. Entretanto, os resultados do teste são sensíveis às propriedades da superfície do material, presença de aço, vazios e fissuras, propriedades de agregados e proporções das misturas (QASRAWI, 2000).

WHITCHURST (1951, apud QASRAWI, 2000) sugeriu o uso de velocidades de pulso ultrassônico como um indicador de qualidade de concretos, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Qualidade do concreto em função da velocidade do pulso ultrassônico (QASRAWI, 2000).

Velocidade pulso (m/s)	<2.000	2.000-3.000	3.000-3.500	3.500-4.500	>4.500
Qualidade do concreto	Muito pobre	Pobre	Duvidoso	Bom	Excelente

Existem ainda restrições advindas do fato de o pulso ser mais veloz através de vazios preenchidos com água do que vazios com ar, conseqüentemente, a condição de umidade do concreto influencia a velocidade da onda, enquanto a resistência mecânica do concreto em campo não é afetada (NEVILLE, 2016).

Essas técnicas são relevantes não somente para estruturas existentes, mas também para estruturas novas ou ainda em execução, onde podem ser realizados ensaios de aceitação. Dada sua importância, a bibliografia afirma que há uma grande necessidade de desenvolvimento de trabalhos e de formação de mão de obra qualificada nesta área, objetivando análise adequada das estruturas de concreto produzidas com os materiais disponíveis no mercado nacional (EVANGELISTA, 2002 apud COSTA *et al.*, 2016).

3.6. Aditivos químicos

Segundo PETRUCCI (1995), aditivos químicos são substâncias adicionadas ao concreto com o intuito de melhorar uma ou mais características do material, inclusive no estado fresco, por exemplo, para aumentar a trabalhabilidade da mistura.

Atualmente, na produção do concreto são utilizados diversos tipos de aditivos e adições, com o objetivo de garantir à mistura diferentes características, a depender da aplicação do material.

Os principais interesses no uso dessas substâncias, além da melhora da trabalhabilidade, é o aumento da resistência mecânica do concreto endurecido e redução no consumo de água, que influencia o número de poros no interior do material. Os aditivos também podem colaborar para um baixo calor de hidratação, para a resistência ao ataque por sulfato, para minimizar os efeitos das reações álcali-agregado, bem como para aumentar a proteção das armaduras contra a corrosão.

Com isso, percebe-se que os aditivos têm duas funções fundamentais, uma é ampliar as qualidades do concreto, melhorando seu comportamento no estado fresco ou endurecido, e a outra é minimizar as características ruins do material.

MEHTA e MONTEIRO (2008) afirmam que o uso de aditivos pode melhorar a qualidade do concreto nos seguintes aspectos: trabalhabilidade, resistência, deformabilidade, compacidade, durabilidade, bombeamento e fluidez (auto adensável). Por outro lado, o uso de aditivo pode diminuir a permeabilidade, retração, calor de hidratação, tempo de pega (retardar ou acelerar) e a absorção de água.

Mais uma vez, percebe-se que existem poucos estudos onde é avaliada a influência da inclusão de aditivos químicos sobre a resistividade elétrica do concreto, embora haja um interesse cada vez maior no uso de concretos industrializados. Sendo assim, chega a ser inevitável discutir o comportamento de estruturas construídas a partir de concretos que contenham aditivos incluídos em sua composição.

Nas obras civis correntes, usualmente são encontrados diversos tipos de aditivos químicos, normalizados pela NBR 11768:2011 – *Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos*, que são apresentados a seguir.

3.6.1. Aditivos tenso-ativos (plastificantes e superplastificantes)

Enquadram-se nesse grupo os aditivos plastificantes, superplastificantes e redutores de água. São produtos que agem diretamente na plasticidade do concreto,

melhorando a trabalhabilidade do material, permitindo melhor adensamento. Além disso, possibilitam a redução da relação água/cimento, o que gera menor retração, aumentando a resistência ou reduzindo o consumo de aglomerante (FONSECA, 2010).

3.6.2. Aditivos incorporadores de ar

Esse tipo de aditivo introduz no concreto microbolhas de ar, favorecendo a trabalhabilidade do material no estado fresco. Pode contribuir para o aumento da durabilidade do concreto, auxiliando na diminuição da segregação durante o transporte do material, melhora a plasticidade e auxiliam na redução da exsudação. Dessa forma, a mistura apresenta-se mais homogênea e coesa.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), aditivos incorporadores de ar reduzem a tensão superficial da água e incorporam ar ao concreto, introduzindo na mistura bolhas de 0,1mm a 0,8mm de diâmetro. A Figura 13 apresenta esquematicamente sua microestrutura.

FONSECA (2010) recomenda a aplicação deste aditivo em concretos submetidos a grandes variações de temperatura, visto que aumentam a resistência do concreto aos ciclos de gelo-degelo. Também são utilizados em concreto-massa, por reduzirem o atrito entre os agregados.

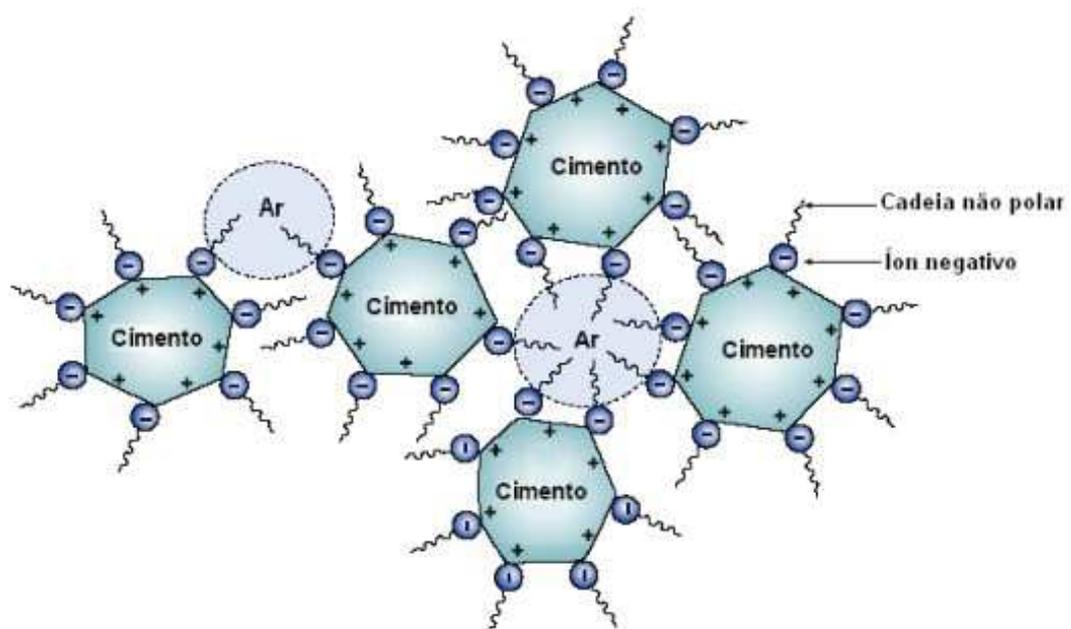


Figura 13 – Esquema da microestrutura de concretos com aditivo incorporador de ar (Adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Comumente na sua composição são empregados resina vinsol (aniônico), ácido abiético, ácido oléico, ácido cáprico, alquil-sulfonatos, alquil-fenóis etoxilados (não iônico) e sais de alquil-amônio.

Como o ar não apresenta resistência mecânica aos esforços de compressão, o excesso de ar incorporado diminui a resistência característica do concreto. Ressalta-se também que o grau eficiência depende da presença de finos na composição, uma vez que a quantidade de finos influencia o volume de ar incorporado, a homogeneidade e a coesão da mistura.

3.6.3. Aditivos aceleradores de pega

Estes aditivos são responsáveis por acelerar as reações de hidratação do cimento, proporcionando a retirada das formas em menor prazo (VARGAS, 2002).

São aditivos capazes de acelerar o crescimento da resistência do concreto, alcançando grandes resistências já nas primeiras idades, o que permite uma desforma mais rápida e a possibilidade de avançar com os demais serviços previstos para o empreendimento.

Os compostos orgânicos ou inorgânicos que compõem esse tipo de aditivo são solúveis em água. Os sais de elementos alcalinos ou alcalino-terrosos à base de cloretos, fluoretos, carbonatos, silicatos, fluorsilicatos, aluminatos, boratos, nitratos, nitritos, etc., fazem parte dos compostos inorgânicos. Para os compostos orgânicos destaca-se a trietanolamina (MARTIN, 2005).

Atualmente são muito utilizados pela indústria de pré-moldados, sendo também aplicados em casos onde o concreto precisa ser lançado em temperaturas baixas, pelo alto calor de hidratação gerado, em casos de reparos e tratamentos emergenciais nas estruturas ou para revestimentos em concreto projetado (FONSECA, 2010).

3.6.4. Aditivos retardadores de pega

Tem a capacidade de manter o material plástico por um período de tempo prolongado, evitando, assim, o surgimento de juntas de concretagem e mantendo a

trabalhabilidade do material durante o lançamento, principalmente quando há grandes distâncias de transporte. Também são úteis para lançamento em ambientes quentes, quando a pega normal é acelerada pelas altas temperaturas (FONSECA, 2010).

Estes aditivos são comumente utilizados na produção de calda de cimento, inclusive para injeção em bainhas de estruturas de concreto protendido, em concretagem de grandes peças e em casos especiais onde é necessário garantir um período maior de trabalhabilidade.

O produto atua retardando a dissolução de ânions e cátions do cimento. As substâncias mais comuns são: carboidratos (açúcares), ácidos hidroxí-carboxílicos e dicarboxílicos, fosfatos e sais de chumbo e zinco.

3.6.5. Aditivos impermeabilizantes

Como o próprio nome já diz, estes aditivos reduzem a penetração de umidade e demais agentes agressivos, devido à ação repulsiva em relação à água ou por colmatação dos poros. São utilizados na composição de argamassas de reparo, em estruturas de reservatórios e tanques, bem como na execução de ambientes molhados, como banheiros e cozinhas (FONSECA, 2010).

3.6.6. Aditivos geradores de gás ou espuma

Os aditivos desse grupo são capazes de gerar bolhas na mistura do concreto, originando produtos significativamente porosos. Estes materiais que são caracterizados pelo baixo peso específico e pelo bom comportamento frente às grandes variações de temperatura, visto que o ar não é material bom condutor de calor, melhorando o desempenho térmico e protegendo a estrutura contra o fogo. São aplicados a pisos, lajes e em obras de recuperação (FONSECA, 2010).

3.6.7. Aditivos inibidores de corrosão

Este tipo de aditivo colabora para a proteção das armaduras, controlando e até reduzindo a taxa de corrosão do aço. São efetivos quando aplicados junto aos

materiais de reparo e em concretos submetidos à ação de cloretos (FONSECA, 2010).

Os tópicos abordados nesta revisão bibliográfica apresentam fatores e parâmetros que alteram a resistividade elétrica do concreto, mas que, todavia, podem ser controlados durante as diversas etapas de um empreendimento, desde que sejam considerados certos cuidados que vão desde a escolha dos materiais e a produção do concreto, até os procedimentos de cura e manutenção das estruturas.

Com uma extensa gama de aditivos químicos e ensaios para controle tecnológico do concreto, fica evidente que os ensaios de resistividade elétrica são bastante úteis para obtenção de informações sobre a qualidade do material e a tendência de a armadura da estrutura desenvolver um processo corrosivo, comprometendo a segurança e utilização da construção.

Desde que combinado a outros ensaios, conhecer as características resistivas do material permite intervenções preventivas e corretivas, antes que seja comprometida a estabilidade e as características originais da estrutura, inviabilizando sua utilização.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo da influência dos aditivos químicos na resistividade elétrica do concreto, de maneira a viabilizar a etapa experimental da pesquisa, o concreto foi produzido com agregados naturais e industrializados, típicos do Estado de Minas Gerais, utilizando cimento Portland e aditivos que atendem às recomendações da NBR 11768:2011.

Para moldagem das amostras, foram produzidos 36 corpos de prova (CPs) cilíndricos, divididos em seis grupos, que se diferenciaram pelo tipo de aditivo utilizado, sendo um grupo sem aditivo, que serviu como referência. Estes corpos de prova foram moldados conforme diretrizes da NBR 5738:2015 – *Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*, com dimensões de 10 cm x 20 cm.

A definição da quantidade de amostras analisadas baseou-se nas recomendações da NBR 11655:2015 – *Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento*, onde é sugerido no mínimo seis exemplares para os concretos com resistência mecânica de até 50 MPa para controle do material.

O traço em massa adotado para a preparação do concreto foi o mesmo para todos os grupos, independentemente do tipo de aditivo utilizado. Também foi mantida a mesma relação água/cimento (a/c) para todos os CPs, igual a 0,45. A fixação destes parâmetros deve-se ao interesse em analisar exclusivamente a influência dos aditivos, sem que haja interferência de outros fatores.

A cura das amostras foi submersa, durante 28 dias. No momento de realização dos ensaios, os CPs foram retirados um a um do recipiente com água, ensaiados aos 7, 14 e 28 dias e recolocados submersos até o fim dos ensaios de resistividade elétrica superficial e volumétrica, quando foram submetidos aos demais ensaios previstos.

A escolha dos aditivos utilizados neste trabalho baseou-se nos produtos comumente empregados em obras de construção civil no Brasil, os CPs foram moldados conforme as exigências das normas técnicas pertinentes e os ensaios realizados nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais e

Construção da Escola de Engenharia da UFMG. O procedimento experimental adotado está apresentado de forma esquemática no fluxograma da Figura 14.

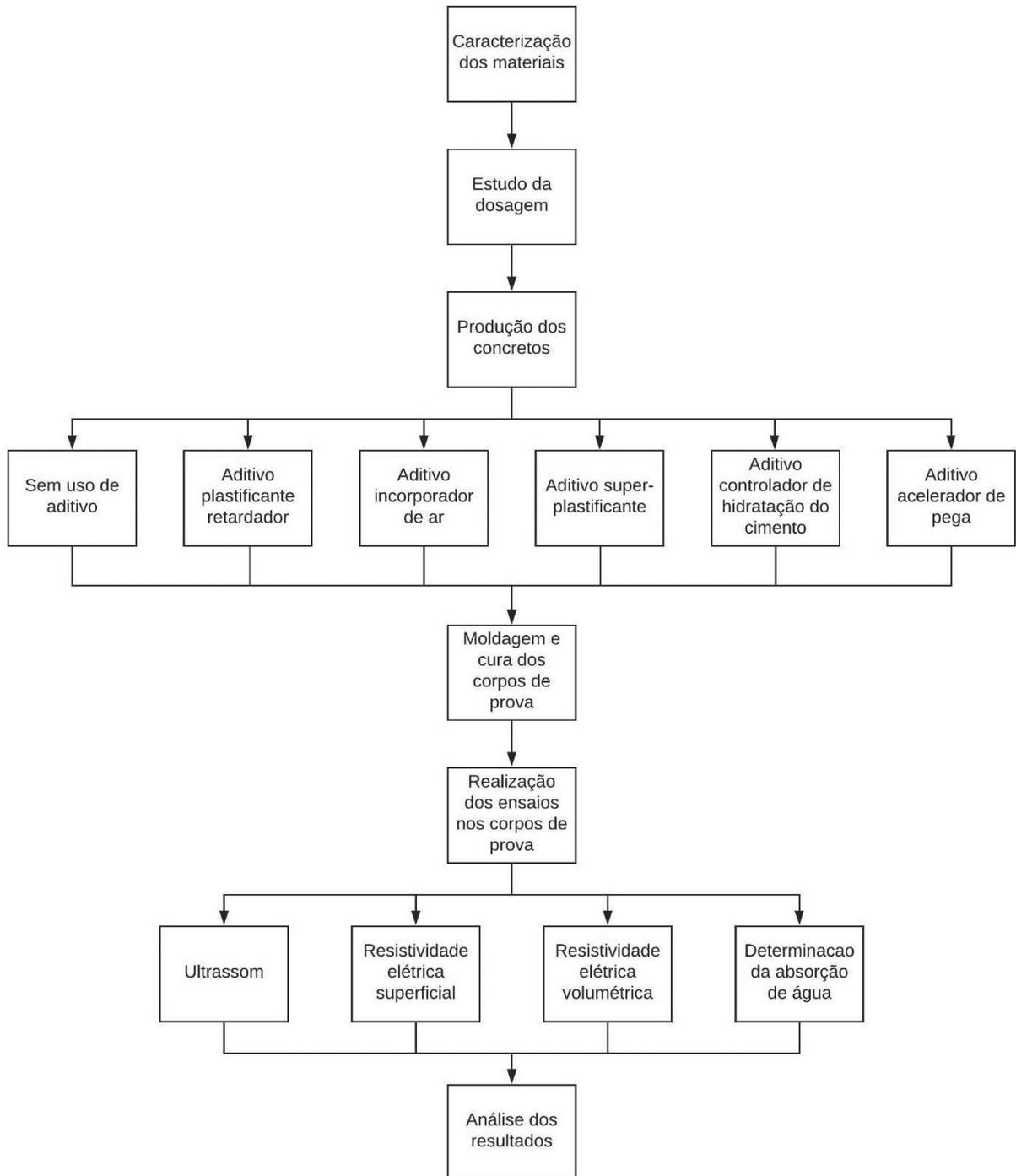


Figura 14 – Representação esquemática do procedimento experimental.

As medidas de resistividade elétrica superficial foram feitas com a utilização de equipamento do tipo sonda Wenner de quatro pontos, que possibilita a realização do ensaio preservando a amostra (ensaio não destrutivo). Já os valores de

resistividade volumétrica foram obtidos pelo método dos dois pontos, a partir da utilização de equipamento desenvolvido no Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica.

Também foi realizado ensaio para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, normalizado pela NBR 9778:2009. Com isso, foi possível identificar a quantidade de água que é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis do concreto, ou seja, a porosidade do material.

Por fim, após a realização dos ensaios citados, foi executado ensaio de ultrassonografia, visando avaliar a homogeneidade das amostras utilizadas e, também, relacionar a característica elétrica resistiva à velocidade de propagação da onda ultrassônica através do material.

4.1. Materiais constituintes do concreto

O concreto produzido sem aditivos, conforme mencionado, serviu como grupo de controle, sendo a referência para comparação junto aos CPs moldados com concreto utilizando aditivos químicos. Todos os CPs estudados foram produzidos com os mesmos materiais, mesmo traço, mesma relação água/cimento e sob as mesmas condições de laboratório, diferenciando-os apenas quanto ao aditivo utilizado durante a produção das amostras.

Tanto o cimento quanto os agregados utilizados na pesquisa são os comumente empregados nas obras de construção civil, comercializados no município de Belo Horizonte. O traço foi elaborado com cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo, água potável fornecida pela Copasa e aditivos químicos.

A caracterização física e química dos materiais utilizados, a produção do concreto e a moldagem das amostras basearam-se nas recomendações das normas brasileiras vigentes.

4.1.1. Cimento Portland

Conforme já mencionado, os CPs foram confeccionados com cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno (CP II-E-32), fabricado no

município de Matozinhos/MG, onde os parâmetros e características atendem aos limites estabelecidos nas normas brasileiras vigentes.

A escolha deste tipo de cimento se deu em função da sua grande utilização e vasta aplicabilidade nos mais diversos tipos de obras de construção civil. A Tabela 2 apresenta os ensaios de caracterização do cimento, fornecidos pela fabricante e a normalização de referência.

Tabela 2 – Características do cimento Portland

Parâmetro		Relatório do ensaio	Limite	Normalização
Blaine (cm ² /g)		3.896	-	NBR 16372:2015
Massa específica (g/cm ³)		2,98	-	NBR 16605:2017
Finura (resíduo peneira (%))	#200	2,40	=< 12,0	NBR 12826:2014
	#325	8,56	-	
Tempo de pega (minutos)	Início	210	>= 60	NBR 16607:2018
	Fim	243	=< 600	
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	9,8	-	NBR 16697:2018
	3 dias	16,3	>= 10,0	
	7 dias	21,7	>= 20,0	
	28 dias	34,9	>= 32,0	

Fonte: CRH

A ficha técnica do material, contendo o relatório completo dos ensaios de caracterização do cimento CP II-E-32 está contida no Anexo I deste trabalho.

4.1.2. Agregados

De acordo com ALMEIDA (2012), os agregados podem ser definidos como os materiais inertes e granulosos, que são adicionados ao concreto e ligados entre si por um aglomerante. São utilizados, principalmente, para reduzir os efeitos de retração da pasta de cimento e pelos benefícios econômicos, visto que aumentam consideravelmente o volume da pasta de cimento, com custo relativamente baixo.

A NBR 7211:2009 – *Agregados para concreto – Especificação* estabelece 4,75 mm como a dimensão característica limite dos agregados que os diferencia entre agregados miúdos e graúdos. Os agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75mm são denominados agregados miúdos e aquele

cujas partículas passam pela peneira com abertura de malha de 75mm e ficam retidas na peneira com abertura de malha de 4,75mm são os agregados graúdos.

METHA e MONTEIRO (2008) classificam como agregado miúdo as partículas com tamanhos variando de 75 µm (peneira #200) a 4,75mm (peneira #4), enquanto o agregado graúdo varia de 4,75 mm (peneira #4) a cerca de 50mm. Estes autores também sugerem classificar os agregados quanto à massa específica, sendo classificados como leves aqueles com massa unitária menor que 1.120 Kg/m³ e pesados aqueles que pesam mais que 2.080 Kg/m³.

4.1.2.1. Agregado miúdo

Para realização dos ensaios foram utilizadas areia natural e areia industrializada, oriundas do município de Santa Luzia/MG, sendo esta última obtida a partir do processo de britagem e peneiramento de rocha gnáissica. A análise granulométrica do agregado miúdo está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Análise granulométrica e caracterização do agregado miúdo

Característica	Areia natural	Areia artificial
Módulo de finura (NBR NM 248)	2,697	3,074
Dimensão máxima (NBR NM 248)	2,4	4,8
Massa específica (NBR NM 52)	2,630	2,640
Massa unitária seca (NBR 7251)	1,400	1,537
Material pulverulento (NBR NM 46)	0,9	6,6
Torrões de argila (NBR 7218)	0,5	Isento
Impurezas orgânicas (NBR 7220)	≤ 300	-

Fonte: Via Engenharia S.A.

4.1.2.2. Agregado graúdo

Para a realização dos ensaios, o agregado graúdo utilizado para produção do concreto foi obtido a partir do processo de britagem e peneiramento de rocha calcária extraída de pedreira localizada no município de Santa Luzia/MG. Para a composição do traço, foi utilizada brita B0 (4,8mm ~ 12,5mm) e brita B1 (9,5mm ~ 25mm).

Para obtenção de um menor volume de vazios, proporcionando ao agregado graúdo condição de obter uma maior massa unitária compactada, foi adotada a proporção de 30% de brita B0 e 70% de brita B1.

A análise granulométrica do agregado graúdo está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Análise granulométrica e caracterização do agregado graúdo

Característica	Brita B0	Brita B1
Módulo de finura (NBR NM 248)	6,824	7,954
Dimensão máxima (NBR NM 248)	12,5	19,0
Massa específica (NBR NM 52)	2,700	2,700
Massa unitária seca (NBR 7251)	1,420	1,390
Material pulverulento (NBR NM 46)	0,3	0,2

Fonte: Mineração Santiago

4.1.3. Aditivos químicos

Foram utilizados cinco tipos de aditivos químicos, superplastificante, plastificante retardador de pega, incorporador de ar, controlador de hidratação do cimento e acelerador de pega, fabricados e amplamente comercializados no Brasil. A descrição dos produtos está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Características dos aditivos

Aditivo	Descrição	Densidade	Dosagem recomendada (s.p.c.) ¹
MC-Powerflow 4001	Aditivo Superplastificante de alto desempenho	1,12 kg/L	0,2% ~ 5,0%
Muraplast FK101	Aditivo plastificante multifuncional retardador de pega	1,20 g/cm ³	0,2% ~ 1,0%
Centrament Air 200	Aditivo incorporador de ar	1,00 g/cm ³	0,02% ~ 0,50%
Murasit Eco 210	Aditivo para controle de hidratação do cimento	1,17 g/cm ³	0,1% ~ 2,0%
Centrament 600 Rápido	Aditivo acelerador de endurecimento	1,01 g/cm ³	0,2% ~ 1,0%

¹ Dosagem recomendada sobre o peso do cimento

Fonte: MC-Bauchemie Brasil

As amostras dos aditivos utilizados estão representadas na Figura 15 e as fichas completas com as informações técnicas de cada um dos aditivos químicos utilizados foram fornecidas pela fabricante e estão contidas no Anexo II deste trabalho.



Figura 15 – Amostras dos aditivos utilizados na pesquisa.

4.1.4. Água

A água adicionada à mistura, durante o amassamento, não deve conter impurezas que possam comprometer a qualidade do concreto no estado fresco ou endurecido, afetando as reações de hidratação que ocorrem com o cimento presente na mistura. A Tabela 6 apresenta alguns requisitos da NBR 15900:2009 – *Água para amassamento do concreto*, que estabelece limites toleráveis para impurezas que, eventualmente, estejam presentes na água. São eles:

Tabela 6 – Requisitos para inspeção preliminar de água destinada ao amassamento de concreto

Parâmetro	Requisito
Óleos e gorduras	Não mais do que traços visíveis
Detergentes	Qualquer espuma deve desaparecer em 2 min
Cor	A cor deve ser comparada qualitativamente com água potável devendo ser amarelo claro a incolor, exceto para a água classificada em 3.3 ¹
Material sólido	Máximo de 50 000 mg/L
Odor	Água de fontes classificadas em 3.3 ¹ não devem apresentar cheiro, exceto um leve odor de cimento e, onde houver escória, um leve odor de sulfeto de hidrogênio após a adição de ácido clorídrico
	Água de outras fontes deve ser inodora e sem odor de sulfeto de hidrogênio, após a adição de ácido clorídrico
Ácidos	pH ≥ 5
Matéria orgânica	A cor da água deve ser mais clara ou igual à da solução-padrão, após a adição de NaOH

¹ Água recuperada de processos de preparo do concreto: água usada para limpar a parte interna de betoneiras de centrais misturadoras, de caminhões betoneiras, misturadores e bombas de concreto ou água proveniente do processo de recuperação de agregados de concreto fresco.

Além dos requisitos supracitados, a NBR 15900:2009 também estabelece valores de referência e indica procedimentos de ensaio para algumas propriedades químicas da água, como, por exemplo, o teor de cloretos, sulfatos, álcalis, dentre outras substâncias presentes. A Tabela 7 resume algumas dessas informações.

Caso surjam dúvidas quanto à qualidade da água, devem ser realizados os ensaios indicados pela NBR 15900:2009, para a verificação e confirmação de sua procedência e a presença de impurezas que possam comprometer as propriedades do concreto, principalmente características como o tempo de pega e resistência à compressão.

Tabela 7 – Propriedades químicas da água destinada ao amassamento de concreto

Propriedade química	Teores máximos admissíveis
Cloretos	500 mg/L (concreto protendido ou graute)
	1000 mg/L (concreto armado)
	4500 mg/L (concreto simples)
Sulfatos	2000 mg/L
Álcalis	1500 mg/L

Fonte: NBR 15900:2009

Segundo ALMEIDA (2012), as anomalias detectadas no concreto, relacionadas à água de amassamento, são causadas pelo excesso de água empregada na sua confecção, sendo que os elementos nocivos presentes não implicam em prejuízos significativos.

Para a confecção dos CPs foi utilizada água potável fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Copasa), cujo resultado da última pesquisa de qualidade da água divulgado pela empresa é apresentado na Tabela 8.

4.2. Estudo da dosagem

Para elaboração do traço a ser utilizado na pesquisa, o estudo da dosagem adotou como premissa um traço comumente utilizado em obras de construção civil, com baixo fator a/c , de forma que a moldagem dos corpos de prova não ficasse comprometida pelo consumo de água estabelecido.

Tabela 8 – Pesquisa de qualidade da água de 2017

Parâmetro	Unidade	Número de amostras				Valor médio	Limite
		Mínimo	Realizadas	Fora padrões	Dentro padrões		
Cloro	mg/L C ⁻	558	709	1	708	0,6	0,2 a 2
Coliformes totais	NMP/100mL	558	709	17	692	97,6	Obs.
Cor	UH	124	307	10	297	3,79	15
Escherichia coli	NMP/100mL	558	709	0	709	-	Obs.
Fluoreto	mg/L F ⁻	0	37	11	26	0,85	0,6 a 0,85
pH	-	0	138	0	138	7,28	6 a 9,5
Turbidez	uT	558	709	12	697	0,66	5

Obs.: Para os parâmetros Coliforme total e Escherichia coli, os valores médios não se aplicam. Referem-se ao percentual de amostras que atende aos padrões no período, sendo avaliados da seguinte forma:

- Coliforme total: Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem menos de 20.000 habitantes: apenas uma amostra, entre as amostras examinadas no mês, poderá apresentar resultado positivo. Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem a partir de 20.000 habitantes devem apresentar ausência desses indicadores em, pelo menos, 95% das amostras examinadas no mês.
- Escherichia coli: Ausência em 100 ml.

Os dados apresentados nesta tabela referem-se aos testes realizados na água fornecida ao Município de Pedro Leopoldo.

Fonte: Copasa (2018)

Inicialmente utilizou-se a metodologia da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), publicada em 1984, por meio do Estudo Técnico N° 67 (ET-67), denominada “Parâmetros de Dosagem de Concreto” e, em seguida, foram realizados alguns ajustes no traço para propiciar melhor trabalhabilidade ao material, sem que fossem afetados outros parâmetros.

Conhecido como método de dosagem da ABCP, ele considera gráficos e tabelas elaborados a partir de informações experimentais, que permitem a utilização dos agregados que se enquadram nos limites propostos pela NBR 7211:2009. Com isso, pode-se determinar o consumo dos componentes a partir da definição da relação água/cimento (a/c).

Conforme já mencionado neste trabalho, para a produção do concreto e a moldagem dos CPs, estabeleceu-se a relação a/c = 0,45, ajustando o consumo de cimento e agregados, de forma a se obter um concreto aplicável aos interesses da pesquisa. A adoção de uma relação a/c baixa visa minimizar a influência da água sobre o concreto, tanto no estado fresco quanto endurecido.

Para determinação da proporção entre os agregados, como sugerido por ASSUNÇÃO (2002), buscou-se a combinação de consistência e um menor volume de vazios. Assim, determinou-se um teor ótimo dos agregados na mistura por meio de proporções adequadas na relação agregado graúdo/agregado miúdo.

RODRIGUES (1998) recomenda proporções entre agregados graúdos que permita o menor volume de vazios, conseqüentemente a máxima massa unitária na condição compactada dos agregados, conforme apresentado na Tabela 9.

Segundo ASSUNÇÃO (2002), a estimativa do consumo do agregado miúdo é imediata quando a quantidade dos demais materiais já está determinada. Isso se deve ao fato que, por princípio, o volume de concreto é formado pela soma dos volumes absolutos dos materiais que o constituem.

Tabela 9 – Proporção entre agregados graúdos (Adaptado de Rodrigues, 1998)

Britas utilizadas	Proporções entre britas
Brita 0 (B0) - Brita 1 (B1)	30% B0 e 70% B1
Brita 1 (B1) - Brita 2 (B2)	50% B1 e 50% B2
Brita 2 (B2) - Brita 3 (B3)	50% B2 e 50% B3
Brita 3 (B3) - Brita 4 (B4)	50% B3 e 50% B4

Por fim, feitas as considerações e ajustes acerca do consumo de cada um dos componentes do concreto do presente trabalho, definiu-se o traço a ser adotado, conforme apresentado na Tabela 10:

Tabela 10 – Dosagem do traço do concreto

Insumo		Consumo			
Cimento CP II-E-32		400 kg/m ³			
Areia natural		486 kg/m ³			
Areia industrializada		275 kg/m ³			
Brita 0		339 kg/m ³			
Brita 1		733 kg/m ³			
Água		180 L/m ³			
Relação a/c		0,45			
Traço adotado					
Cimento	Areia natural	Areia industrializada	Brita 0	Brita 1	Água
1,000	1,214	0,687	0,848	1,833	0,450

4.3. Métodos empregados

Após a caracterização dos materiais e o estudo da dosagem, foi realizada a produção do concreto e a moldagem dos corpos de prova, para posteriormente submetê-los aos ensaios em laboratório.

Para a dosagem do concreto, fixando-se a relação água/cimento e o consumo de cimento e agregados, foi determinado o traço a utilizar para elaboração das amostras segundo o método da ABCP, tendo como referência um concreto com resistência à compressão de 30 MPa, comumente utilizado no mercado da construção civil, e os ajustes foram necessários para garantir a trabalhabilidade do material.

Ao comparar a composição dos seis grupos de CPs, fica explícito que a diferença entre eles é única e exclusivamente a presença do aditivo químico adicionado ao concreto durante sua fabricação. Este dado foi fundamental para a presente pesquisa, visto que tornou possível analisar isoladamente o efeito dos aditivos no desempenho da resistividade elétrica dos concretos.

4.3.1. Moldagem e cura dos corpos de prova

A confecção dos CPs utilizou formas metálicas cilíndricas, com dimensões internas de 10 cm de diâmetro por 20 cm de comprimento (Figura 16), conforme recomendado pela NBR 5738:2015, num total de 36 amostras, sendo estas divididas em seis grupos.

Estes CPs foram utilizados para a caracterização do desempenho dos concretos com aditivos, através de ensaio de resistividade elétrica superficial, resistividade elétrica volumétrica, ensaio de ultrassonografia e ensaio para determinação do índice de vazios.



Figura 16 – Formas já preparadas para produção dos corpos de prova.

O consumo referente a cada tipo de aditivos, o resultado do *slump test* e as demais informações do processo de moldagem das amostras estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados da moldagem dos corpos de prova

Tipo aditivo	Consumo aditivo (%)	Nº CP	Data da moldagem	Hora	f_{ck} projeto (MPa)	Slump test (cm)
Sem uso de aditivo	0,0	001 a 006	05/06/2019	07:50	30	1,3
Superplastificante	0,2	101 a 106	05/06/2019	08:25	30	11
Plastificante multifuncional e retardador de pega	0,4	201 a 206	05/06/2019	09:00	30	4
Incorporador de ar	0,3	301 a 306	05/06/2019	09:25	30	2,4
Controlador de hidratação do cimento	0,3	401 a 406	05/06/2019	09:50	30	1,5
Acelerador de pega	0,2	501 a 506	05/06/2019	10:25	30	0,5

A mistura dos insumos foi realizada em betoneira elétrica (Figura 17) e o adensamento dos CPs procedeu-se manualmente, com auxílio de haste metálica. Decorrido um prazo de 24h após a moldagem, os CPs foram retirados das formas e armazenados em recipiente com água, para dar prosseguimento ao processo de cura úmida submersa.



Figura 17 – Detalhe da betoneira elétrica utilizada durante a produção do concreto

Assim como a água utilizada na produção do concreto, a água empregada para cura submersa dos CPs (Figura 18) também foi da rede de abastecimento da Copasa. Esse processo durou 28 dias sob estas condições, sendo retirados do ambiente submerso apenas no momento dos ensaios, conforme as datas previstas.



Figura 18 – Detalhe da cura submersa dos corpos de prova

4.3.2. Ensaio de resistividade elétrica superficial (Método Wenner)

O ensaio de resistividade elétrica superficial foi realizado em todos os corpos de prova, aos 7, 14 e 28 dias, por se tratar de ensaio não destrutivo. Para tal, utilizou-se equipamento do tipo sonda Wenner (quatro pontos), apresentado na Figura 19.

Foram realizadas quatro leituras em cada corpo de prova, conforme as indicações da norma AASHTO TP95-11. Para isso, o valor de resistividade superficial de um CP corresponde à média das quatro leituras obtidas no ensaio, obedecendo a ângulos de 90° entre cada medição, para padronizar o posicionamento do aparelho em todos os ensaios que serão realizados.



Figura 19 – Equipamento tipo sonda Wenner (quatro pontos) e acessórios (AGUIAR, 2018).

A Figura 20 apresenta detalhe do posicionamento do equipamento (a) e a leitura da medida de resistividade (b) durante a realização do ensaio.

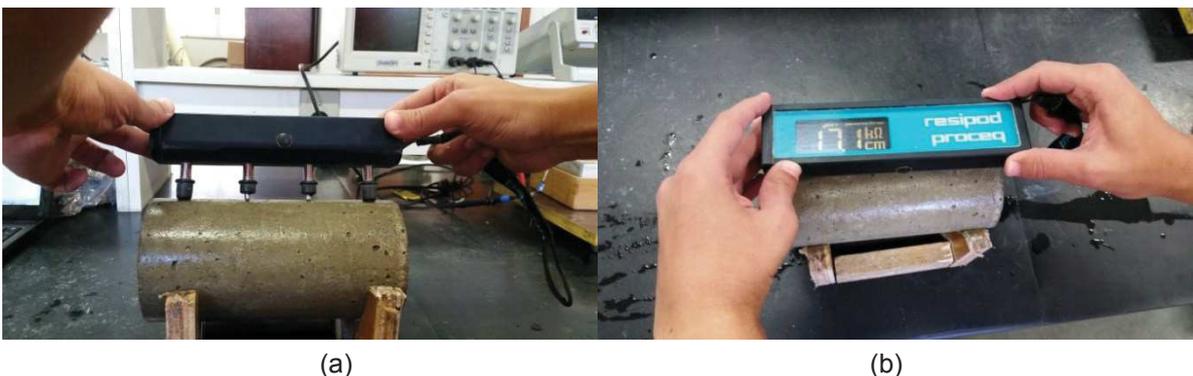


Figura 20 – Realização do ensaio de resistividade elétrica superficial

Como o grau de saturação do CP altera a leitura da diferença de potencial e corrente elétrica no equipamento, as medições foram ser feitas em cada amostra por vez, individualmente. Dessa forma, imediatamente após a realização deste ensaio, o CP retornou ao recipiente com água para o prosseguir submerso até o momento do próximo ensaio.

4.3.3. Ensaio de resistividade elétrica volumétrica (método dos dois pontos)

Assim como o ensaio de resistividade elétrica superficial, o ensaio de resistividade volumétrica foi realizado em todos os corpos de prova, nas idades de 7, 14 e 28 dias, por se tratar de ensaio que não exige descaracterizar os corpos de prova moldados.

Para tal, optou-se pela realização do método dos dois pontos, utilizando equipamento disponível no Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica da UFMG (Figura 21), visto que o método não utiliza mercúrio durante a realização do ensaio.

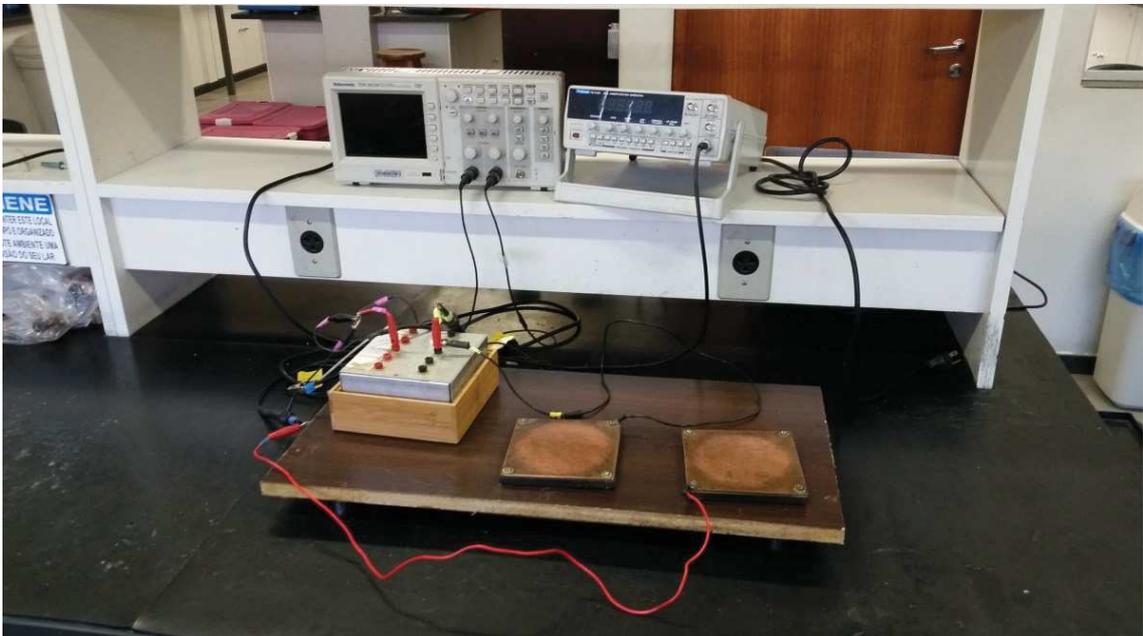


Figura 21 – Equipamento utilizado para realização do ensaio de resistividade elétrica volumétrica

Conforme sugerido por LAGE (2018) e AGUIAR (2018), nesta pesquisa será utilizada esponja de aço umedecida para garantir o contato entre os eletrodos e a amostra de concreto.

A substituição do mercúrio metálico líquido, conforme recomenda a NBR 9402:2012, pela esponja de aço justifica-se pelas dificuldades de emprego deste tipo de material, pelos efeitos tóxicos e riscos de manuseio do mercúrio, bem como pelas precauções do contato do operador por períodos contínuos. A Figura 22 apresenta uma visão geral do equipamento durante a execução do ensaio.

Da mesma forma que ensaio de resistividade elétrica superficial, como a umidade do CP altera a leitura da diferença de potencial e corrente elétrica no equipamento, as medições durante o ensaio de resistividade elétrica volumétrica foram feitas em cada amostra por vez, individualmente. Assim, após a realização deste ensaio, o CP retornou imediatamente ao recipiente com água para o prosseguir submerso até o momento do próximo ensaio.

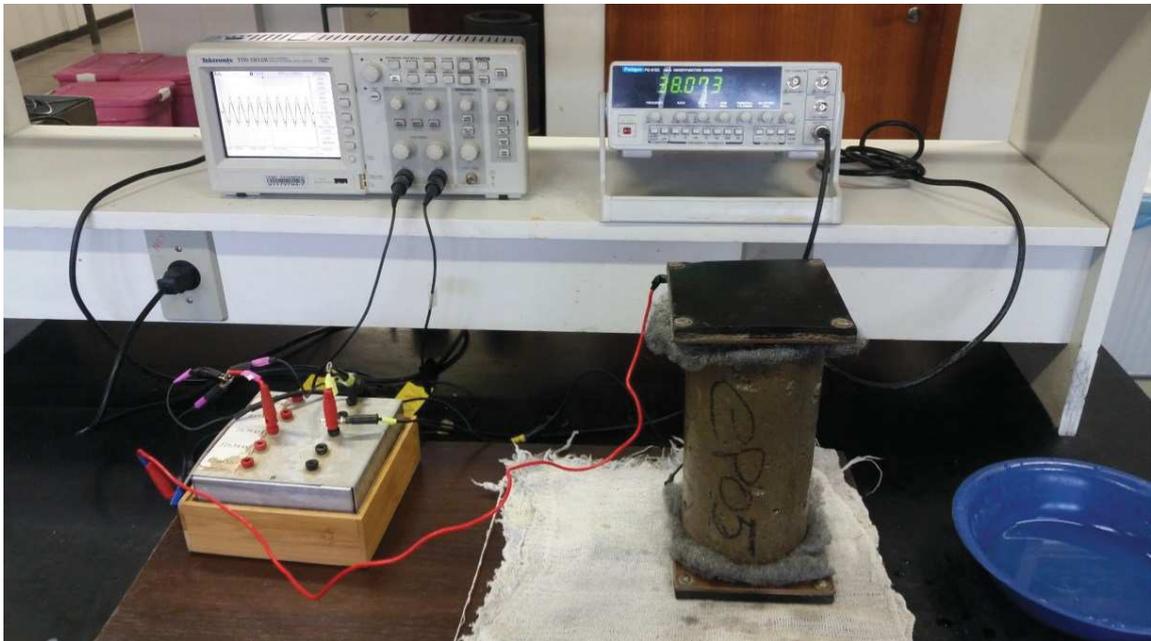


Figura 22 – Realização do ensaio de resistividade elétrica volumétrica

O funcionamento deste equipamento é relativamente simples, forma-se um circuito elétrico com o concreto, onde um gerador de sinais aplica uma corrente alternada utilizando uma frequência de aproximadamente 40 Hz e o visor do osciloscópio apresenta a queda de potencial elétrico entre os eletrodos.

De acordo com LAGE (2018), a resistência de derivação ou “*shunt*” ligada ao sistema apresentado na Figura 22 possibilita medições mais precisas da impedância (Z) do concreto, sendo a resistividade elétrica (ρ) do material dada pela Equação 7.

$$\rho_{\text{concreto}} = \frac{A}{L} Z \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

A é a área da seção do objeto (amostra), medida em metros quadrados (m^2);

L é a distância entre os eletrodos de cobre, medida em metros (m);

Z é a impedância do material, medida em ohm (Ω).

4.3.4. Ensaio de ultrassom

Os ensaios dos corpos-de-prova foram realizados com auxílio do equipamento de onda ultrassônica, apresentado na Figura 23, que é recomendado para realização de ensaios não destrutivos utilizando ultrassom por velocidade dos pulsos.



Figura 23 – Equipamento de ultrassom

Com o interesse de avaliar o desempenho da compacidade interna dos concretos e a homogeneidade dos CPs, o ensaio foi realizado aos 28 dias após a moldagem das amostras e seguiram as recomendações da NBR 8802:2019. A velocidade de propagação de ondas (V) é calculada conforme a relação apresentada na Equação 8.

$$V = \frac{L}{t} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

V é a velocidade de propagação, medida em metros por segundo (m/s);

L é a distância entre os pontos de acoplamento do centro das faces dos transdutores, medida em metros (m);

t é o tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção, medida em segundos (s).

Os corpos-de-prova foram preparados para a realização do ensaio, inicialmente, verificou-se a necessidade de regularização da superfície dos corpos-de-prova, visando evitar falhas no contato entre os sensores transdutores do equipamento e a superfície do concreto, o que poderia gerar distorções nos valores de velocidade de percolação da onda no concreto.

Dispensada essa necessidade, a NBR 8802:2019 recomenda também que seja determinado o comprimento do corpo-de-prova, sendo o tamanho dos testemunhos um dado inserido no equipamento utilizado, para correlacioná-lo com o tempo de percolação da onda ultrassônica, obtendo então sua velocidade.

Além dessa preparação, também foi realizada a calibração do equipamento, conforme Figura 24, através da barra acrílica (peça padrão-referência), fornecida pelo fabricante, bem como a utilização de gel apropriado, para garantir o contato adequado entre a superfície do concreto e os transdutores da máquina.



Figura 24 – Calibração do equipamento antes do início dos ensaios

Para o ensaio dos CPs foi utilizado método direto, aplicando-se gel nos transdutores para leitura da velocidade de propagação da onda ultrassônica, empregando-se uma força de forma padronizada entre os transdutores e a amostra de concreto, conforme pode ser visto na Figura 25.



Figura 25 – Representação do posicionamento dos transdutores

Para cada corpo de prova foram medidos os valores de velocidade da onda e seu tempo de propagação, com anotação dos resultados diretamente do visor do equipamento, em m/s e μs , respectivamente (Figura 26). A partir dos resultados obtidos, estabeleceu-se a velocidade média e o tempo médio de propagação da onda para cada grupo de CPs, de acordo com o aditivo utilizado no traço.



Figura 26 – Realização do ensaio e apresentação de resultado no equipamento

4.3.5. Ensaio para determinação da porosidade do concreto

A NBR 9778:2009 recomenda a secagem da amostra em estufa, mantendo os CPs à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ por um período de 72 h, para determinação e registro da massa seca do concreto, conforme apresentado na Figura 27.



Figura 27 – Secagem dos corpos de prova em estufa

As amostras retiradas da estufa foram pesadas e, posteriormente, realizou-se a saturação das mesmas, a partir da imersão dos corpos de prova em água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, e mantendo-os durante 72 h nessa condição, tal como apresentado na Figura 18.

Embora a NBR 9778:2009 recomende submeter cada uma das amostras ao processo de fervura, através de recipiente com água até a ebulição durante 5 horas, segundo testes realizados por SANTOS (2006), os resultados de absorção por imersão e índice de vazios obtidos a partir da imersão em água sob fervura são bem próximos aos obtidos após a imersão em água à temperatura ambiente o que mostra que o procedimento de fervura dos corpos-de-prova pode ser suprimido.

Dessa forma, seguindo as instruções normativas, com as amostras saturadas, determinou-se a massa imersa em água dos corpos de prova, com auxílio de balança hidrostática, conforme Figura 28.

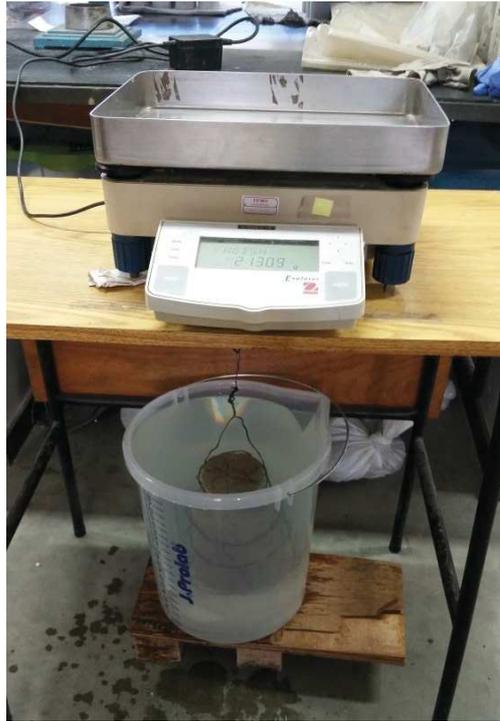


Figura 28 – Balança hidrostática para determinação da massa submersa em água

Por fim, as amostras foram retiradas da água, enxugadas com pano úmido e registrou-se a massa saturada com superfície seca dos corpos de prova, conforme pode ser visto na Figura 29.



Figura 29 – Determinação da massa saturada dos corpos de prova

Coletadas as informações de massa dos corpos de prova no laboratório, pode-se calcular a absorção de água, o índice de vazios e a massa específica do concreto, conforme estabelecido pela NBR 9778:2009.

Com isso, tem-se a absorção, em porcentagem, dada pela Equação 9.

$$A = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

m_{sat} é a massa da amostra saturada, medida em (g/cm^3) ; e

m_s é a massa da amostra seca em estufa, medida em (g/cm^3) .

O índice de vazios, em porcentagem, dado pela Equação 10.

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

Onde:

m_i é a massa da amostra saturada imersa em água, medida em (g/cm^3) .

Já a massa específica seca, medida em (g/cm^3) , dada pela Equação 11.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 100 \quad (\text{Equação 11})$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial, resistividade elétrica volumétrica, ultrassom e porosidade. Conforme já mencionado, os ensaios foram realizados sob as mesmas condições para todos os corpos de prova, independentemente do tipo de aditivo utilizado durante a moldagem das amostras.

Para facilitar a visualização e interpretação dos resultados, optou-se por apresentá-los em forma de tabelas e gráficos. Os dados coletados serão discutidos ao longo das próximas páginas deste trabalho separadamente e correlacionados, para que seja comparada a influência de cada um dos aditivos químicos no concreto.

Os corpos de prova foram nomeados com um número de três dígitos, sendo o primeiro referente ao tipo de aditivo utilizado na amostra, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Codificação dos CPs produzidos em função do tipo de aditivo

Tipo	Dígito inicial
-	0
Aditivo superplastificante de alto desempenho	1
Aditivo plastificante multifuncional retardador de pega	2
Aditivo incorporador de ar	3
Aditivo para controle de hidratação do cimento	4
Aditivo acelerador de endurecimento	5

5.1. Ensaio de resistividade elétrica superficial (Método Wenner)

As medições da resistividade elétrica superficial do concreto ocorreram aos 7, 14 e 28 dias após a data da moldagem dos corpos de prova. Nos intervalos entre os ensaios, as amostras eram mantidas imersas em água para mantê-las sempre em condição saturada.

A Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15 apresentam os valores de resistividade elétrica superficial medidos para as idades de 7, 14 e 28 dias, respectivamente. As tabelas também apresentam a média dos quatro valores anotados em cada corpo de prova, medida em $k\Omega.cm$, para cada idade do concreto e seu desvio padrão.

Tabela 13 – Resultados dos testes aos dias 7 dias após a moldagem

Resistividade Elétrica Superficial (kΩ.cm)							
Nº CP	Med1	Med2	Med3	Med4	Média CP	Média grupo	Desvio padrão
001	8,5	9,0	8,6	8,1	8,55	8,77	0,33
002	8,5	7,8	9,0	8,6	8,48		
003	9,1	8,6	9,1	8,1	8,73		
004	8,5	8,0	8,7	9,1	8,58		
005	8,9	9,1	8,9	8,4	8,83		
006	9,0	8,9	9,8	10,1	9,45		
101	9,3	9,7	9,9	9,4	9,58	9,82	0,17
102	9,8	9,8	9,9	9,7	9,80		
103	10,2	9,9	9,6	10,0	9,93		
104	9,2	9,4	10,1	10,1	9,70		
105	10,1	9,8	10,6	10,0	10,13		
106	10,0	9,5	9,5	10,1	9,78		
201	9,8	9,6	9,5	9,3	9,55	9,38	0,38
202	8,2	9,2	9,2	9,6	9,05		
203	9,6	8,5	8,7	8,6	8,85		
204	10,2	9,2	10,1	10,3	9,95		
205	9,9	10,1	9,8	8,9	9,68		
206	9,6	8,8	9,7	8,8	9,23		
301	10,8	10,7	11,2	10,6	10,83	10,78	0,28
302	11,2	10,7	11,0	10,8	10,93		
303	11,3	10,2	10,2	10,4	10,53		
304	10,0	10,5	10,2	10,5	10,30		
305	11,4	11,5	10,8	10,2	10,98		
306	11,3	11,2	10,7	11,3	11,13		
401	9,6	9,7	9,7	10,0	9,75	9,91	0,29
402	9,6	9,1	10,0	9,9	9,65		
403	9,8	9,6	9,4	10,3	9,78		
404	9,9	9,7	9,8	10,0	9,85		
405	9,8	10,4	10,7	11,2	10,53		
406	10,0	9,7	10,1	9,8	9,90		
501	9,1	9,6	8,3	9,0	9,00	9,17	0,38
502	9,2	8,9	10,1	9,5	9,43		
503	8,4	8,7	8,9	8,2	8,55		
504	9,4	8,9	9,9	9,6	9,45		
505	9,7	9,4	10,1	9,5	9,68		
506	9,5	8,7	8,9	8,5	8,90		

Tabela 14 – Resultados dos testes aos dias 14 dias após a moldagem

Resistividade Elétrica Superficial (kΩ.cm)							
Nº CP	Med1	Med2	Med3	Med4	Média CP	Média grupo	Desvio padrão
001	14,5	14,5	13,4	14,0	14,10	14,39	0,40
002	13,9	13,7	14,3	14,3	14,05		
003	15,0	14,7	15,2	14,5	14,85		
004	13,8	13,8	13,6	15,1	14,08		
005	13,7	15,1	14,2	13,9	14,23		
006	14,3	14,8	16,4	14,6	15,03		
101	15,4	14,8	15,3	16,4	15,48	15,93	0,42
102	16,2	15,7	16,0	16,0	15,98		
103	17,0	15,7	15,7	15,6	16,00		
104	16,6	15,0	16,2	15,2	15,75		
105	17,1	16,3	17,1	16,6	16,78		
106	15,6	16,4	15,6	14,9	15,63		
201	15,0	14,8	14,4	14,6	14,70	14,52	0,57
202	13,8	13,9	13,8	14,0	13,88		
203	14,0	14,4	13,9	13,3	13,90		
204	15,3	15,8	14,7	14,8	15,15		
205	14,5	15,2	15,4	16,1	15,30		
206	14,3	13,8	15,0	13,7	14,20		
301	17,8	17,7	18,5	17,7	17,93	17,96	0,57
302	17,8	18,1	17,7	18,0	17,90		
303	18,4	17,2	17,4	17,6	17,65		
304	17,1	17,2	17,0	16,9	17,05		
305	18,8	18,9	18,7	19,1	18,88		
306	18,5	17,9	18,4	18,6	18,35		
401	13,3	13,3	13,1	13,3	13,25	12,95	1,34
402	12,5	14,0	1,9	12,4	10,20		
403	14,1	13,2	13,3	13,7	13,58		
404	12,4	13,2	13,4	12,6	12,90		
405	15,2	14,5	15,0	13,7	14,60		
406	12,9	13,2	13,1	13,5	13,18		
501	14,4	15,5	14,6	15,5	15,00	15,12	0,36
502	15,5	16,4	15,6	15,2	15,68		
503	14,4	14,2	15,1	14,8	14,63		
504	14,8	15,8	16,1	14,7	15,35		
505	15,6	15,1	16,0	14,6	15,33		
506	15,2	14,5	15,0	14,3	14,75		

Tabela 15 – Resultados dos testes aos dias 28 dias após a moldagem

Resistividade Elétrica Superficial (kΩ.cm)							
Nº CP	Med1	Med2	Med3	Med4	Média CP	Média grupo	Desvio padrão
001	38,8	36,7	36,8	37,3	37,40	37,38	0,86
002	37,9	35,9	36,5	36,4	36,68		
003	37,3	37,4	38,9	34,5	37,03		
004	36,4	39,0	34,9	36,6	36,73		
005	38,3	35,2	37,5	38,0	37,25		
006	39,3	38,4	40,0	39,2	39,23		
101	39,8	39,4	42,2	40,4	40,45	41,09	0,42
102	41,2	41,6	40,0	41,7	41,13		
103	41,8	40,9	41,0	40,2	40,98		
104	44,2	42,4	39,5	41,4	41,88		
105	41,7	38,9	41,2	42,4	41,05		
106	40,8	42,6	38,9	41,9	41,05		
201	32,9	33,1	33,2	33,1	33,08	32,93	1,46
202	28,7	32,8	31,6	31,5	31,15		
203	34,0	30,5	30,6	30,6	31,43		
204	33,7	33,8	33,8	34,7	34,00		
205	34,7	34,3	35,4	37,2	35,40		
206	33,4	31,3	34,5	30,9	32,53		
301	45,0	43,8	44,5	42,8	44,03	43,27	1,25
302	44,1	44,8	45,0	43,6	44,38		
303	44,1	42,3	41,9	42,2	42,63		
304	40,3	40,8	41,6	40,6	40,83		
305	46,9	45,3	43,7	41,5	44,35		
306	43,8	44,1	41,8	44,0	43,43		
401	31,3	30,1	32,1	30,4	30,98	31,38	0,81
402	29,4	30,5	30,9	30,4	30,30		
403	32,0	29,8	29,4	31,8	30,75		
404	30,9	31,6	33,1	30,7	31,58		
405	33,7	32,2	33,7	31,3	32,73		
406	31,1	31,2	33,7	31,9	31,98		
501	40,0	41,1	37,4	39,2	39,43	38,98	1,12
502	38,9	43,4	39,1	36,8	39,55		
503	39,0	37,5	36,1	35,6	37,05		
504	39,3	40,1	41,0	37,8	39,55		
505	40,6	39,6	41,6	39,6	40,35		
506	39,2	37,4	38,6	36,6	37,95		

A Figura 30 apresenta os valores médios de resistividade elétrica superficial, medida em $k\Omega.cm$, obtidos nos ensaios em laboratório com a idade do concreto (7, 14 e 28 dias), considerando separadamente cada um dos aditivos utilizados.

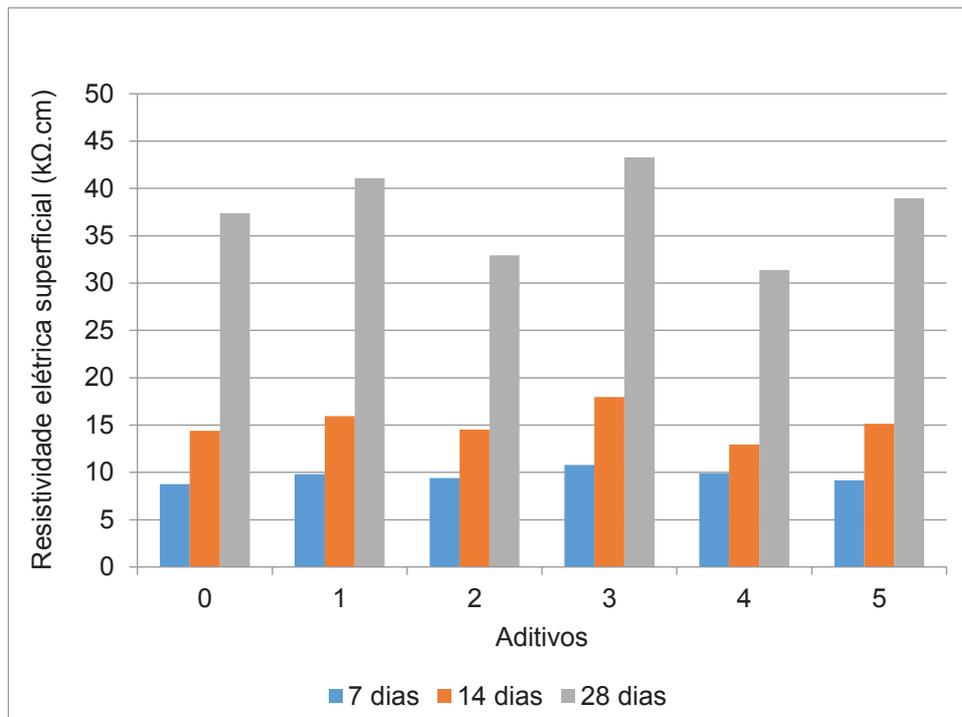


Figura 30 – Valores médios de resistividade elétrica superficial do concreto

Estes resultados condizem com as expectativas no que se refere ao aumento da resistividade elétrica superficial das amostras estudadas com o avanço da idade do concreto. Este crescimento ultrapassa 400% quando comparadas as médias aos 7 e 28 dias para os traços com aditivo superplastificante, incorporador de ar e acelerador de pega.

Desde o início dos ensaios, os corpos de prova moldados com aditivo incorporador de ar apresentaram valores de resistividade elétrica superficial superiores aos demais. Este resultado, embora inesperado, indica que, mesmo com o incremento de ar e um maior número de poros no concreto, a interligação entre estes vazios é limitada.

Por outro lado, a Figura 30 mostra que os corpos de prova moldados com aditivo plastificante multifuncional retardador de pega e aditivo inibidor de hidratação do cimento apresentaram valores de resistividade inferiores aos 28 dias até quando comparados às amostras moldadas sem aditivos químicos.

Este comportamento era esperado, uma vez que tais aditivos permitem uma maior quantidade de água livre no interior do concreto, isso ocorre devido às reações de hidratação do cimento suceder mais lentamente, o que resulta em valores mais baixos de resistividade para as idades analisadas.

Embora a variação do tipo de aditivo utilizado junto ao concreto não apresente impactos significativos nas primeiras idades, os resultados mostram que próximo aos 28 dias da moldagem a diferença entre eles é mais representativa, como mostra a Figura 31.

Essa diferença fica ainda mais nítida quando comparados o aditivo incorporador de ar (43,27 kΩ.cm) e o aditivo para controle de hidratação do cimento (31,38 kΩ.cm), que aos 28 dias apresenta uma diferença de 37,9%.

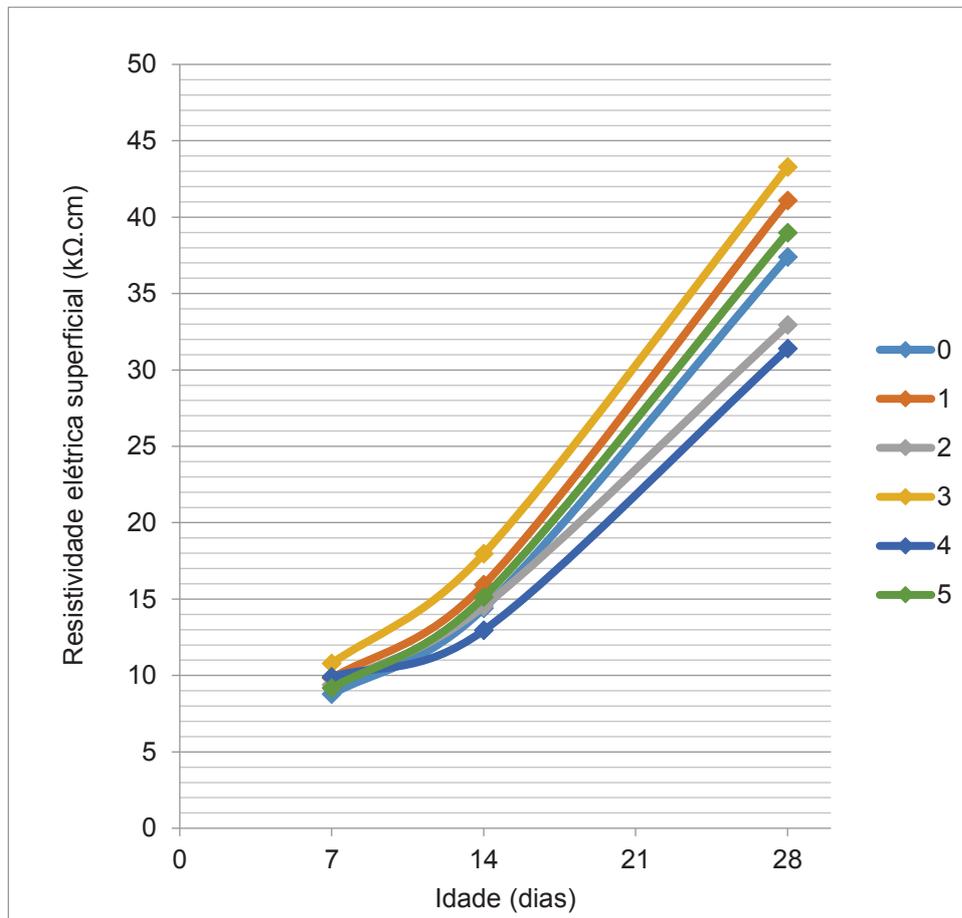


Figura 31 – Aumento da resistividade elétrica superficial em função da idade do concreto

Nota-se que, para o concreto, a resistividade elétrica superficial é uma propriedade do material que varia sensivelmente quando há mudanças que interferem em sua microestrutura. Os resultados obtidos nesta etapa comprovam

que, embora as dosagens adotadas estejam próximas do limite mínimo recomendado pelo fabricante, os aditivos foram capazes de alterar a resistividade elétrica superficial significativamente.

5.2. Ensaio de resistividade elétrica volumétrica (método dos dois pontos)

As medições da resistividade elétrica volumétrica do concreto também ocorreram aos 7, 14 e 28 dias após a data da moldagem dos corpos de prova. Assim como o ensaio de resistividade elétrica superficial, entre as datas de realização dos ensaios as amostras ficaram mantidas imersas em água para garantir que estivessem sempre saturadas.

A Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18 apresentam os valores de resistividade elétrica volumétrica medidos para as idades de 7, 14 e 28 dias, respectivamente.

Dos dados obtidos, nota-se que em todos os CPs, independente do aditivo utilizado, houve um crescimento da resistividade elétrica volumétrica com o avanço da idade do concreto, isso era esperado à medida que ocorrem as reações de hidratação do cimento, o que reduz a água livre e torna a estrutura mais compacta.

Bem como no ensaio anterior, agora também se constatou que os corpos de prova moldados com aditivo incorporador de ar apresentaram valores de resistividade elétrica superior aos demais. Este resultado, embora inesperado, sugere que, mesmo com maior número de poros no material, estes vazios não se comunicam entre si.

Semelhante ao que ocorreu no ensaio de resistividade elétrica superficial, a Figura 32 mostra que os corpos de prova moldados com aditivo plastificante multifuncional retardador de pega e aditivo controlador de hidratação do cimento apresentaram valores de resistividade inferiores, aos 28 dias, até quando comparados às amostras moldadas sem aditivos químicos.

Mais uma vez este comportamento era esperado, pela quantidade de água livre presente no interior do concreto produzido com estes aditivos, visto que as reações de hidratação ocorrem mais lentamente nesses casos, o que resulta em valores mais baixos de resistividade nas primeiras idades.

Tabela 16 – Resultados dos testes aos dias 7 dias após a moldagem

CP	CH 01 RMS (V)	CH 02 RMS (V)	R (Ω)	Resistividade ($\Omega.m$)	Média	Desvio padrão
001	7,81	3,20	968,01	38,01	37,92	0,48
002	7,88	3,28	942,35	37,01		
003	7,86	3,23	963,18	37,82		
004	7,86	3,22	968,26	38,02		
005	7,86	3,19	983,69	38,63		
006	7,86	3,22	968,26	38,02		
101	7,85	3,12	1.018,68	40,00	40,26	1,11
102	7,86	3,09	1.037,27	40,73		
103	7,87	3,11	1.028,44	40,39		
104	7,86	3,05	1.059,68	41,61		
105	7,87	3,09	1.039,44	40,82		
106	7,86	3,22	968,26	38,02		
201	7,86	3,12	1.020,83	40,09	39,95	1,36
202	7,85	3,21	971,28	38,14		
203	7,83	3,18	982,55	38,58		
204	7,85	3,10	1.029,59	40,43		
205	7,84	3,01	1.078,23	42,34		
206	7,84	3,11	1.021,95	40,13		
301	7,84	2,98	1.095,85	43,03	44,33	1,19
302	7,85	2,92	1.134,47	44,55		
303	7,85	2,90	1.146,93	45,04		
304	7,85	3,01	1.080,46	42,43		
305	7,86	2,88	1.161,90	45,63		
306	7,88	2,90	1.153,88	45,31		
401	7,83	3,18	982,55	38,58	38,88	0,98
402	7,81	3,21	962,90	37,81		
403	7,83	3,18	982,55	38,58		
404	7,82	3,20	970,11	38,10		
405	7,84	3,08	1.038,45	40,78		
406	7,83	3,14	1.003,63	39,41		
501	7,82	3,24	949,84	37,30	38,25	0,76
502	7,81	3,19	973,15	38,22		
503	7,84	3,24	953,99	37,46		
504	7,80	3,13	1.002,54	39,37		
505	7,84	3,16	995,15	39,08		
506	7,82	3,20	970,11	38,10		

Tabela 17 – Resultados dos testes aos dias 14 dias após a moldagem

CP	CH 01 RMS (V)	CH 02 RMS (V)	R (Ω)	Resistividade ($\Omega.m$)	Média	Desvio padrão
001	7,95	2,44	1.517,37	59,59	60,41	1,47
002	7,95	2,49	1.473,41	57,86		
003	7,94	2,42	1.532,69	60,19		
004	7,95	2,41	1.544,63	60,66		
005	7,93	2,36	1.585,89	62,28		
006	7,93	2,37	1.576,37	61,90		
101	7,95	2,32	1.630,61	64,03	65,06	2,10
102	7,92	2,35	1.592,64	62,54		
103	7,96	2,23	1.726,55	67,80		
104	7,94	2,24	1.709,85	67,15		
105	7,93	2,26	1.685,80	66,20		
106	7,93	2,35	1.595,50	62,66		
201	7,94	2,44	1.514,62	59,48	60,48	2,55
202	7,90	2,49	1.459,92	57,33		
203	7,90	2,48	1.468,51	57,67		
204	7,93	2,36	1.585,89	62,28		
205	7,95	2,31	1.640,58	64,43		
206	7,91	2,37	1.570,70	61,68		
301	7,94	2,12	1.844,67	72,44	73,30	2,05
302	7,94	2,10	1.868,63	73,38		
303	7,94	2,08	1.893,06	74,34		
304	7,92	2,18	1.769,24	69,48		
305	7,93	2,04	1.940,06	76,19		
306	7,91	2,08	1.883,37	73,96		
401	7,90	2,63	1.346,43	52,87	54,03	1,05
402	7,87	2,60	1.361,97	53,48		
403	7,89	2,60	1.367,14	53,69		
404	7,88	2,61	1.356,75	53,28		
405	7,89	2,53	1.423,56	55,90		
406	7,89	2,56	1.399,00	54,94		
501	7,89	2,37	1.565,02	61,46	62,23	1,63
502	7,89	2,34	1.593,70	62,58		
503	7,90	2,39	1.549,12	60,83		
504	7,92	2,27	1.672,45	65,68		
505	7,90	2,38	1.558,45	61,20		
506	7,87	2,36	1.568,81	61,61		

Tabela 18 – Resultados dos testes aos dias 28 dias após a moldagem

CP	CH 01 RMS (V)	CH 02 RMS (V)	R (Ω)	Resistividade ($\Omega.m$)	Média	Desvio padrão
001	8,00	1,21	3.770,64	148,07	149,16	3,03
002	7,99	1,23	3.692,94	145,02		
003	8,01	1,21	3.776,19	148,29		
004	7,99	1,21	3.765,09	147,85		
005	8,03	1,17	3.939,75	154,71		
006	8,00	1,19	3.845,30	151,00		
101	8,03	1,16	3.979,51	156,27	156,25	3,20
102	8,01	1,13	4.091,10	160,66		
103	7,99	1,17	3.916,78	153,81		
104	8,04	1,15	4.025,80	158,09		
105	8,03	1,15	4.019,95	157,86		
106	7,99	1,19	3.839,66	150,78		
201	7,98	1,42	3.104,17	121,90	125,44	3,11
202	7,98	1,42	3.104,17	121,90		
203	8,01	1,41	3.145,25	123,51		
204	7,98	1,37	3.241,99	127,31		
205	7,99	1,36	3.275,71	128,64		
206	7,97	1,35	3.294,99	129,39		
301	8,03	1,12	4.145,63	162,80	169,72	3,39
302	8,03	1,08	4.324,06	169,81		
303	8,00	1,06	4.399,31	172,76		
304	7,99	1,07	4.345,63	170,65		
305	8,01	1,06	4.405,64	173,01		
306	8,01	1,08	4.311,62	169,32		
401	7,96	1,46	2.991,51	117,48	118,77	2,04
402	7,97	1,46	2.996,12	117,66		
403	7,97	1,48	2.946,55	115,71		
404	7,97	1,43	3.073,07	120,68		
405	7,97	1,42	3.099,44	121,71		
406	8,01	1,45	3.039,95	119,38		
501	8,00	1,23	3.698,40	145,24	150,22	3,50
502	7,98	1,18	3.872,20	152,06		
503	8,00	1,21	3.770,64	148,07		
504	7,99	1,16	3.956,34	155,36		
505	8,02	1,18	3.894,97	152,96		
506	7,98	1,21	3.759,53	147,64		

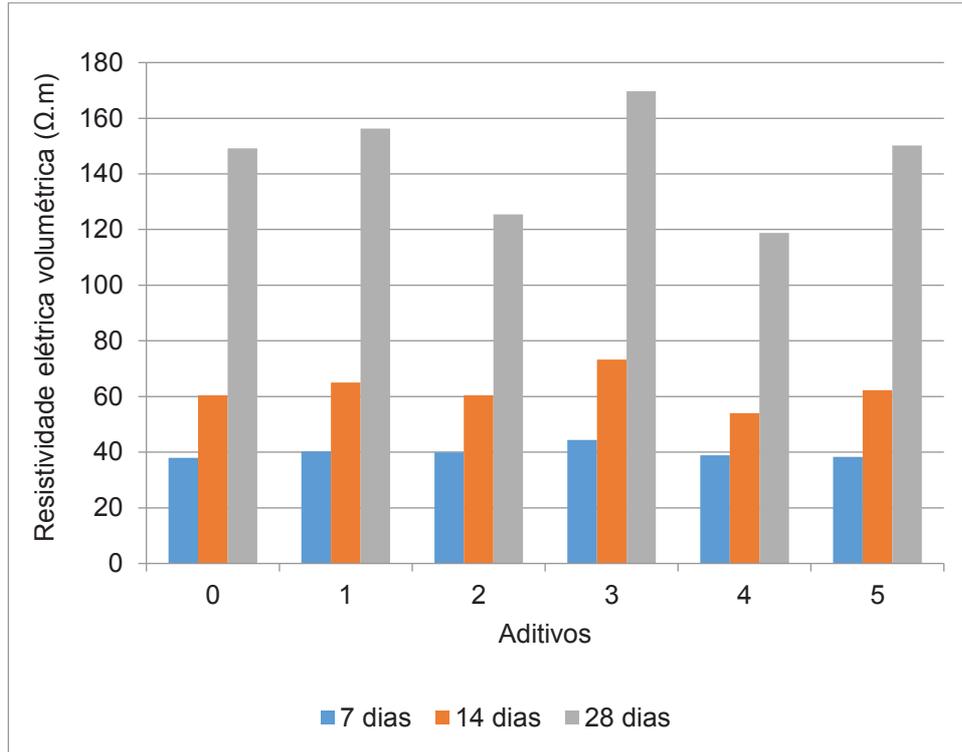


Figura 32 – Valores médios de resistividade elétrica volumétrica do concreto

Logo nas primeiras idades, todos os grupos de CPs analisados apresentam valores de resistividade próximos a 40 $\Omega.m$. Contudo, aos 28 dias da moldagem, é possível perceber uma diferença mais significativa, como pode ser visto na Figura 33. Quando comparados o aditivo incorporador de ar (169,72 $\Omega.m$) e o aditivo para controle de hidratação do cimento (118,77 $\Omega.m$), a diferença chega a 42,9% nos valores medidos.

Nota-se que, para o concreto, a resistividade elétrica volumétrica também é uma propriedade do material que varia sensivelmente quando há mudanças que interferem em sua microestrutura. Os resultados obtidos nesta etapa comprovam que, embora as dosagens adotadas estejam próximas das mínimas recomendadas pelo fabricante, os aditivos foram capazes de alterar a resistividade elétrica superficial significativamente.

Quando se compara os resultados da resistividade elétrica superficial à volumétrica, conforme AGUIAR (2018) comentou em seu trabalho, diferentes técnicas e metodologias de ensaio normalmente, produzem resultados distintos. Contudo, há uma similaridade no comportamento de cada grupo de amostras, em função do tipo de aditivo utilizado na produção do concreto.

Quando comparados para um mesmo grupo de aditivos, os resultados obtidos nos ensaios de resistividade elétrica superficial e volumétrica, apresentados na Figura 34, confirmam a homogeneidade das amostras e indicam a confiabilidade dos testes a partir da correspondência no desempenho dos aditivos utilizados.

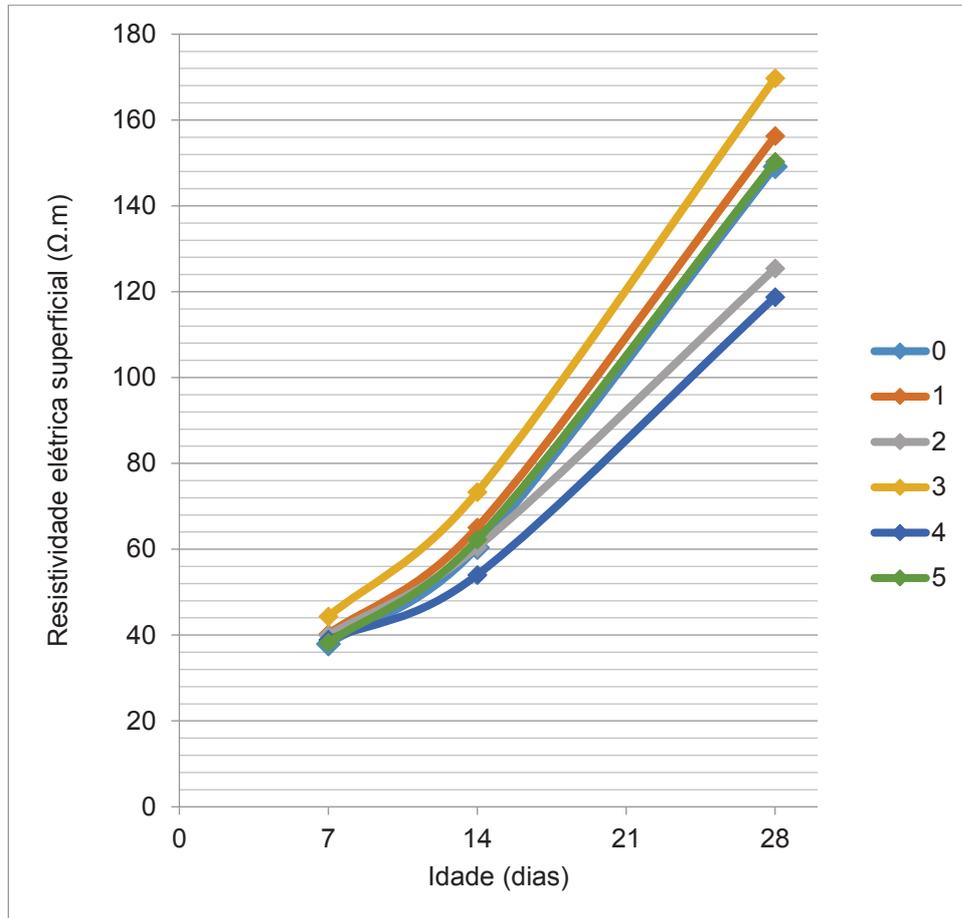


Figura 33 – Aumento da resistividade elétrica volumétrica em função da idade do concreto

Em ambos os ensaios, o aditivo incorporador de ar apresentou os valores de resistividade elétrica mais altos, seguidos pelo aditivo superplastificante e aditivo acelerador de pega, enquanto o aditivo plastificante multifuncional retardador de pega e o aditivo controlador de hidratação do cimento apresentaram os piores resultados no que se refere à resistividade elétrica do material, inclusive quando comparados às amostras moldadas sem aditivos.

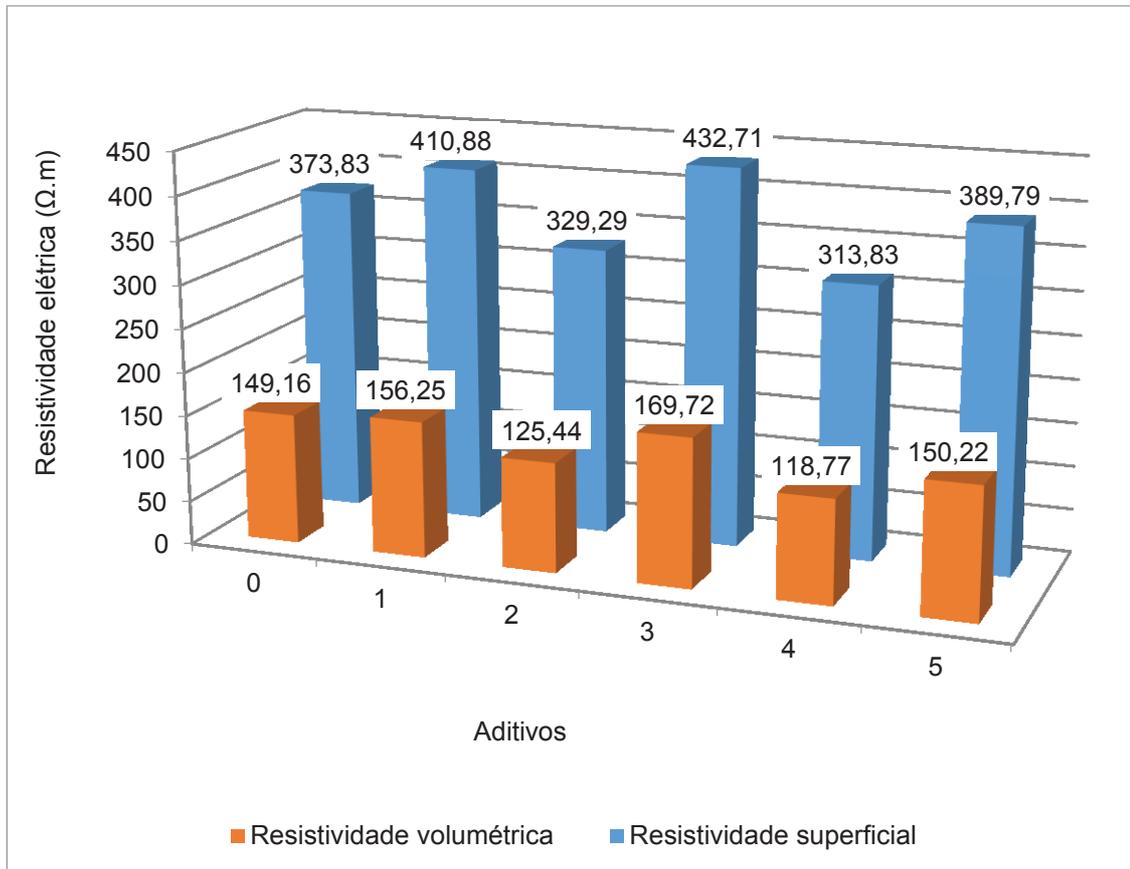


Figura 34 – Comparação dos resultados obtidos de resistividade elétrica volumétrica e superficial

5.3. Resultados do ensaio de ultrassom

Nesta etapa do procedimento experimental, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de propagação da onda ultrassônica, principalmente para avaliar a homogeneidade das amostras. Com isso, os resultados obtidos serviram como parâmetro da qualidade do concreto e poderiam evidenciar falhas na moldagem das amostras.

Os resultados obtidos expressam o tempo que a onda ultrassônica leva para percorrer a amostra de concreto, entre os transdutores do equipamento. Com isso, foi possível determinar a velocidade de propagação da onda, conforme pode ser visto na Tabela 19.

Para avaliação da homogeneidade das amostras, os valores de velocidade de propagação de percolação da onda ultrassônica são apresentados na Figura 35, na forma de gráfico Box Plot, onde é possível avaliar a uniformidade entre as amostras.

Tabela 19 – Resultados do ensaio de ultrassom

Nº CP	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Velocidade média (m/s)	Desvio padrão
001	41,3	4843	4831	22,2
002	41,2	4854		
003	41,7	4796		
004	41,6	4808		
005	41,4	4831		
006	41,2	4854		
101	41,2	4854	4899	68,0
102	41,7	4796		
103	40,5	4938		
104	40,2	4975		
105	40,2	4975		
106	41,2	4854		
201	40,8	4902	4867	55,4
202	41,3	4843		
203	42,0	4762		
204	41,1	4866		
205	40,5	4938		
206	40,9	4890		
301	41,9	4773	4777	23,3
302	41,7	4796		
303	41,7	4796		
304	42,3	4728		
305	41,8	4785		
306	41,8	4785		
401	40,8	4902	4900	23,4
402	40,6	4926		
403	40,7	4914		
404	40,7	4914		
405	41,2	4854		
406	40,9	4890		
501	42,0	4762	4855	58,2
502	40,9	4890		
503	41,7	4796		
504	40,7	4914		
505	40,7	4914		
506	41,2	4854		

Data Summary								
Groups	N	Min	Q ₁	Median	Q ₃	Max	Mean	SD
Total	36	4728	4796	4854	4905	4975	4854.7778	63.2885
0	6	4796	4813.75	4837	4851.25	4854	4831	24.3146
1	6	4796	4854	4896	4965.75	4975	4898.6667	74.4733
2	6	4762	4848.75	4878	4899	4938	4866.8333	60.6578
3	6	4728	4776	4785	4793.25	4796	4777.1667	25.561
4	6	4854	4893	4908	4914	4926	4900	25.6437
5	6	4762	4810.5	4872	4908	4914	4855	63.7464

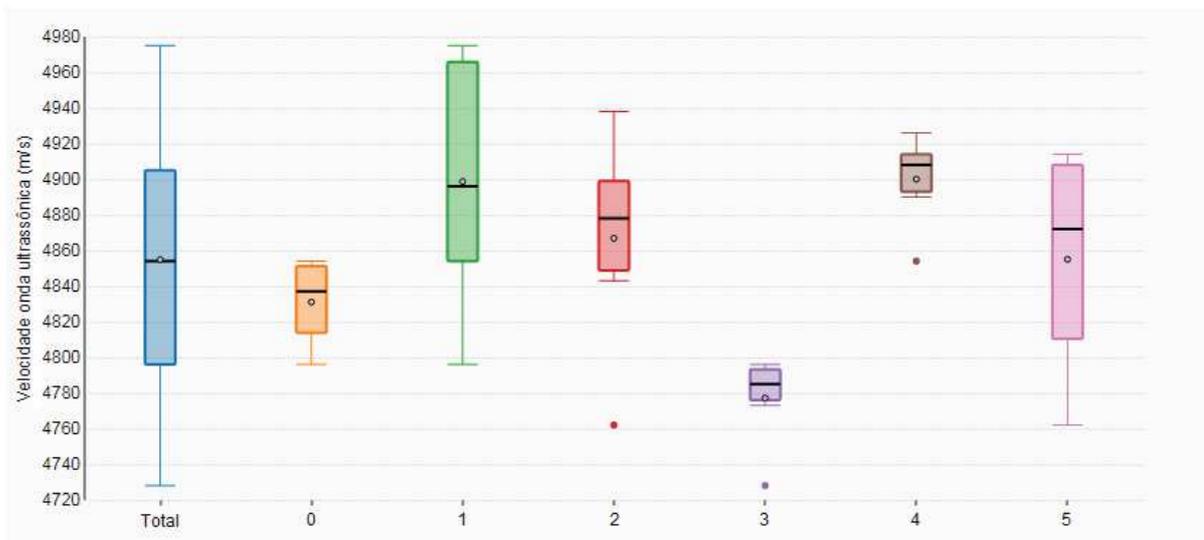


Figura 35 – Análise estatística da velocidade da onda ultrassônica

Este tipo de gráfico consiste em um retângulo, limitado entre o primeiro quartil (Q₁) e pelo terceiro quartil (Q₃) de valores medidos, e indica onde está localizada a maioria dos resultados. O valor central é dado pela mediana (–), que aparece no interior do retângulo.

Além disso, o gráfico ainda fornece os limites inferiores e superiores dos valores analisados, limitados pelas barras (–) e eliminando automaticamente os resultados dispersos (●), denominados “outliers”.

Analisando o gráfico da Figura 35, pode-se verificar que, quando tomado o grupo total de amostras, o valor mediano da velocidade de propagação da onda de ultrassom dos 36 corpos de prova ensaiados é igual a 4854 m/s.

Do total de amostras, 58,3% apresentam resultados compreendidos entre o Q₁ e Q₃, 16,7% abaixo do limite Q₁, 25% acima de Q₃ e não houve medidas fora destes intervalos. Isso permite concluir que há simetria na distribuição dos valores obtidos durante o ensaio e, embora haja diferença de 247 m/s entre os resultados

mínimos e máximos encontrados, o desvio-padrão (SD) é pequeno para os grupos ensaiados, indicando a homogeneidade das amostras analisadas.

A partir da Figura 36, pode-se observar que a maioria dos aditivos apresenta velocidade de propagação da onda ultrassônica superior ao grupo de amostras produzido sem nenhuma adição química. A exceção é o grupo que contém aditivo incorporador de ar, onde os vazios existentes no interior do concreto reduzem a velocidade média da onda em 1,1% quando comparado ao grupo de controle, diminuindo de 4.831m/s (sem aditivos) para 4.777 m/s (aditivo incorporador de ar).

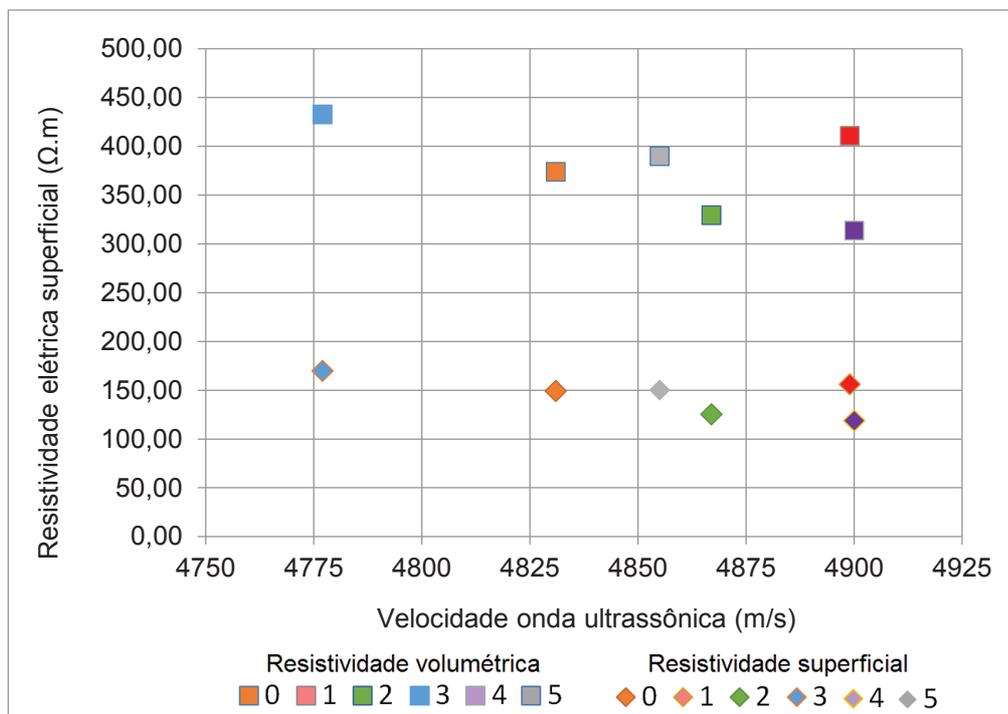


Figura 36 – Relação da resistividade elétrica em função da velocidade da onda ultrassônica

Isso ocorre devido à influência que a porosidade tem sobre a velocidade de propagação da onda ultrassônica, já que o aumento de vazios implica em maiores perdas do sinal, reduzindo a velocidade do pulso. Esta última, por sua vez, depende apenas do meio, e não da amplitude, comprimento de onda ou período da onda.

5.4. Resultados do ensaio de porosidade

Este ensaio avaliou a porosidade do concreto dos corpos de prova moldados para o ensaio. A Tabela 20 apresenta a massa dos corpos de prova, medida em

gramas (g), nas condições saturada, seca e imersa. Estes valores subsidiaram os cálculos de índice de vazios e absorção que estão na Tabela 21.

Tabela 20 – Relatório da massa dos corpos de prova ensaiados

Nº CP	Massa (g)					
	Saturada	Média	Imersa	Média	Seca	Média
001	3.771,7	3.764,4	2.248,6	2.242,5	3.691,5	3.676,4
002	3.793,8		2.256,6		3.709,8	
003	3.825,7		2.277,6		3.742,5	
004	3.715,4		2.213,6		3.635,8	
005	3.753,0		2.239,0		3.674,4	
006	3.727,0		2.219,4		3.604,3	
101	3.821,0	3.786,3	2.280,2	2.259,7	3.742,1	3.707,2
102	3.738,0		2.232,2		3.672,9	
103	3.795,8		2.267,1		3.717,2	
104	3.756,8		2.244,5		3.674,9	
105	3.783,6		2.257,7		3.692,1	
106	3.822,3		2.276,4		3.744,0	
201	3.712,4	3.758,5	2.212,3	2.241,2	3.632,3	3.665,7
202	3.753,7		2.234,4		3.665,2	
203	3.765,7		2.245,1		3.686,1	
204	3.765,1		2.243,2		3.669,8	
205	3.746,6		2.241,9		3.616,9	
206	3.807,4		2.270,5		3.723,8	
301	3.661,1	3.662,5	2.142,0	2.141,2	3.525,0	3.567,2
302	3.644,1		2.130,3		3.564,0	
303	3.621,6		2.119,2		3.531,3	
304	3.675,4		2.143,1		3.587,2	
305	3.704,0		2.166,1		3.629,8	
306	3.668,5		2.146,6		3.565,7	
401	3.807,0	3.774,7	2.270,2	2.249,3	3.726,0	3.674,6
402	3.764,5		2.251,6		3.687,0	
403	3.726,3		2.222,9		3.588,0	
404	3.809,7		2.279,3		3.735,3	
405	3.769,6		2.221,5		3.664,7	
406	3.771,3		2.250,4		3.646,5	
501	3.759,9	3.769,6	2.237,3	2.248,7	3.677,7	3.678,1
502	3.752,4		2.240,9		3.670,2	
503	3.777,1		2.251,0		3.694,8	
504	3.731,2		2.229,9		3.656,7	
505	3.788,7		2.262,5		3.710,2	
506	3.808,4		2.270,5		3.659,0	

Tabela 21 – Resultados de absorção e índice de vazios

Nº CP	Resultados									
	Absorção (%)	Média	Índice de vazios (%)	Média	Massa específica					
					Seca	Média	Saturada	Média	Real	Média
001	2,173	2,399	5,266	5,789	2,424	2,416	2,476	2,473	2,558	2,564
002	2,264		5,464		2,413		2,468		2,553	
003	2,223		5,374		2,417		2,471		2,555	
004	2,189		5,300		2,421		2,474		2,556	
005	2,139		5,192		2,427		2,479		2,560	
006	3,404		8,139		2,391		2,472		2,603	
101	2,108	2,132	5,121	5,177	2,429	2,428	2,480	2,480	2,560	2,561
102	1,772		4,323		2,439		2,482		2,549	
103	2,114		5,142		2,432		2,483		2,563	
104	2,229		5,416		2,430		2,484		2,569	
105	2,478		5,996		2,420		2,480		2,574	
106	2,091		5,065		2,422		2,473		2,551	
201	2,205	2,535	5,340	6,120	2,421	2,416	2,475	2,477	2,558	2,574
202	2,415		5,825		2,412		2,471		2,562	
203	2,159		5,235		2,424		2,476		2,558	
204	2,597		6,262		2,411		2,474		2,572	
205	3,586		8,620		2,404		2,490		2,630	
206	2,245		5,440		2,423		2,477		2,562	
301	3,861	2,675	8,959	6,266	2,320	2,345	2,410	2,408	2,549	2,502
302	2,247		5,291		2,354		2,407		2,486	
303	2,557		6,010		2,350		2,411		2,501	
304	2,459		5,756		2,341		2,399		2,484	
305	2,044		4,825		2,360		2,408		2,480	
306	2,883		6,755		2,343		2,410		2,513	
401	2,174	2,735	5,271	6,573	2,425	2,409	2,477	2,475	2,559	2,579
402	2,102		5,123		2,437		2,488		2,569	
403	3,855		9,199		2,387		2,479		2,628	
404	1,992		4,861		2,441		2,489		2,565	
405	2,862		6,776		2,367		2,435		2,539	
406	3,422		8,206		2,398		2,480		2,612	
501	2,235	2,490	5,399	6,008	2,415	2,418	2,469	2,479	2,553	2,574
502	2,240		5,438		2,428		2,483		2,568	
503	2,227		5,393		2,421		2,475		2,559	
504	2,037		4,962		2,436		2,485		2,563	
505	2,116		5,143		2,431		2,482		2,563	
506	4,083		9,715		2,379		2,476		2,635	

A partir da Figura 37, pode-se observar que a maioria dos aditivos apresenta percentual de absorção média de 2,49% e índice de vazios médio de 5,99%. Todos os grupos analisados apresentaram resultados superiores ao grupo de amostras produzido sem nenhuma adição química. A exceção é o grupo que contém aditivo superplastificante, que apresentou menor porosidade dentre os demais, com absorção igual a 2,13% e índice de vazios igual a 5,18%.

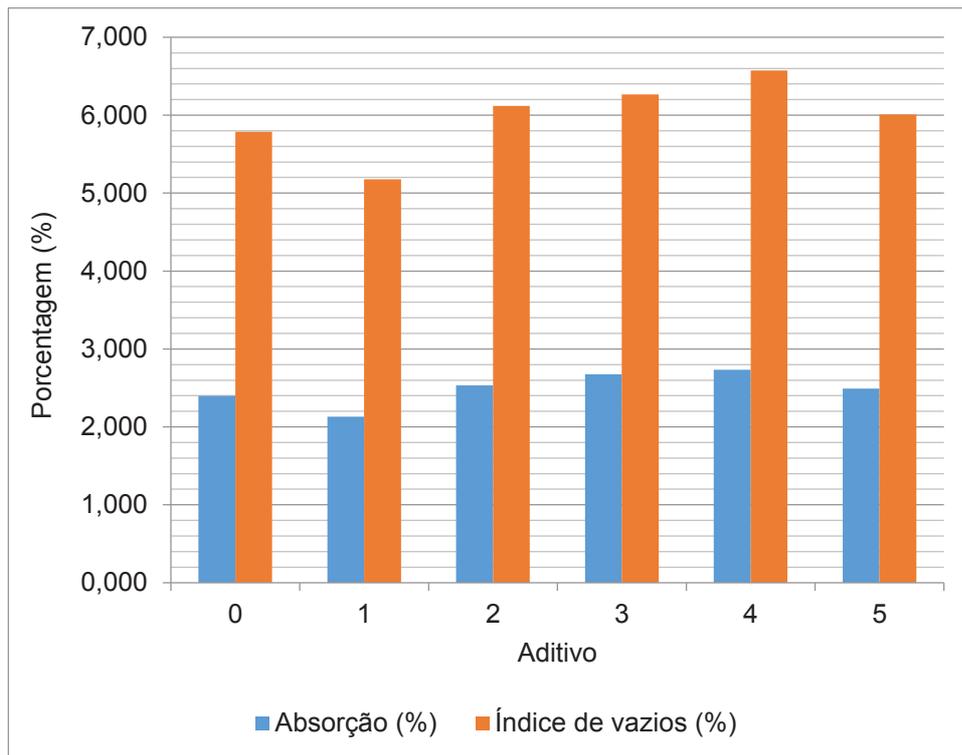


Figura 37 – Percentual de absorção e índice de vazios em função do tipo de aditivo

Entre os CPs analisados, o aditivo para controle de hidratação do cimento apresentou percentuais de absorção e índice de vazios maiores do que os demais aditivos. Embora os resultados obtidos de absorção sejam próximos em todas as amostras, o índice de vazios alcançou 6,6% para o grupo com aditivo controlador de hidratação, o que representa 1,4% a mais que os resultados obtidos do grupo com aditivo superplastificante, por exemplo.

Tanto na avaliação da absorção quanto do índice de vazios, o único grupo que ficou abaixo dos valores das amostras sem aditivos foi o concreto moldado com superplastificantes, este resultado pode ser associado à redução da tensão de cisalhamento e a viscosidade da pasta.

Conforme apresentado por ROJAS e CINCOTTO (2013), as moléculas de polímeros policarboxilatos que compõe o aditivo superplastificante modificam a distribuição das partículas de cimento, com aumento da área específica superficial que entra em contato com as moléculas de água, com isso, há menor facilidade das misturas em perderem água em função da dimensão, formato e distribuição dos poros.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando o assunto é durabilidade de estruturas de concreto, nota-se que diversos fatores influenciam a vida útil do material, em maior ou menor grau, que podem ser desde a concepção do projeto, até mesmo o cobrimento das armaduras ou as técnicas de adensamento e condições de cura do concreto.

Além disso, há agentes agressivos como o gás carbônico existente no ar, os cloretos muito presentes em regiões litorâneas, os gases sulfurosos de uma rede de esgoto, dentre outros elementos que reduzem a durabilidade do material, sendo que, quanto maior a porosidade do concreto, mais rapidamente esses agentes agressivos adentram ao interior da estrutura e comprometem a integridade de seus elementos, principalmente corroendo as armaduras.

A presente pesquisa teve como objetivo principal avaliar a variação dos parâmetros de resistividade elétrica do concreto em função do tipo de aditivo químico utilizado durante a produção do material, observando de que forma a os produtos adicionados à mistura influenciam as medidas de resistividade elétrica do concreto.

Percebe-se que o ensaio de resistividade elétrica superficial é uma ferramenta capaz de fornecer importantes informações sobre a qualidade do concreto, sendo um método prático para obtenção dos valores *in situ*. Entretanto, é preciso conhecer e avaliar outras propriedades do material para determinar suas características elétricas, uma vez que existem diversos fatores que influenciam a resistividade elétrica do material.

Após a realização dos ensaios propostos e análise dos resultados obtidos, constatou-se que a resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto varia proporcionalmente à idade do corpo de prova. Contudo, os valores de resistividade superficial e volumétrica medidos apresentaram diferenças significativas em todas as idades, como já havia sido apontado por AGUIAR (2018).

O crescimento da resistividade elétrica volumétrica alcançou valores significativamente maiores para o aditivo incorporador de ar (169,72 $\Omega.m$) quando comparado ao aditivo controlador de hidratação do cimento (118,77 $\Omega.m$), uma diferença próxima a 42,9%. Enquanto a resistividade elétrica superficial apresentou

para o aditivo incorporador de ar (432,71 $\Omega.m$) e o aditivo para controle de hidratação do cimento (313,83 $\Omega.m$), uma diferença de 37,9%.

Constatou-se ainda que as reações de hidratação do cimento ocorridas nas primeiras idades do concreto também afetam seus valores de resistividade elétrica. Isso foi visto tanto no ensaio de resistividade elétrica superficial quanto volumétrica, onde as amostras que continham aditivo retardador de pega e aditivo controlador de hidratação do cimento apresentaram resistividade menor que os demais grupos em todas as idades ensaiadas (7, 14 e 28 dias).

Quando comparados os resultados dos ensaios de resistividade elétrica ao ensaio de índice de vazios, não foi possível estabelecer uma relação entre os valores obtidos, uma vez que os CPs que apresentaram melhor comportamento resistivo não são os mesmos que apresentam um menor índice de vazios. Dessa forma, podemos inferir que há outros fatores mais representativos e que influenciam a resistividade elétrica que a porosidade do material.

O mesmo ocorre com a velocidade da onda ultrassônica, onde se percebe que as amostras moldadas com aditivo incorporador de ar apresentaram os menores valores no ensaio de ultrassom, enquanto as mesmas obtiveram os maiores valores de resistividade elétrica superficial e volumétrica. Isso sugere que, embora houvesse maior número de poros na pasta, não havia conectividade entre estes vazios.

Como visto ao longo da revisão bibliográfica, vários fatores interferem sobre a resistividade elétrica do concreto, tornando necessário isolar estes fatores e analisar a influência de cada um separadamente. Dada a complexidade de interpretar a combinação de tantas variáveis, tornou-se inviável a esta pesquisa entender a extensão e os efeitos de cada um destes fatores de maneira conjunta.

De maneira geral, esperava-se que o aditivo incorporador de ar influenciasse a resistividade elétrica do concreto reduzindo-a, devido ao aumento dos vazios no interior do material.

Contudo, o incremento de bolhas de ar durante a produção das amostras contribuiu para que estes CPs apresentassem a maior resistividade elétrica média dentre os grupos avaliados. Dessa forma, acredita-se que a conectividade entre os poros foi restringida pela pequena dimensão dos poros produzidos pelo aditivo.

O aditivo superplastificante, pela característica de reduzir a tensão superficial da água, favoreceu a compacidade do concreto, gerando menos vazios e menor

absorção pelo material. Por outro lado, o aditivo controlador de hidratação do cimento apresentou maior porosidade dentre os concretos estudados, possivelmente por conter, no momento do ensaio, grande parte da água de hidratação do cimento ainda livre no interior do concreto.

Quando comparados os valores de absorção de água e do índice de vazios do concreto, verificou-se uma diferença do percentual relativamente pequena, provavelmente devido ao traço adotado possuir a mesma relação água/cimento para todas as amostras analisadas. O resultado obtido no ensaio de porosidade difere, em parte, da literatura, ao passo que se esperava maior absorção do grupo que continha aditivo incorporador de ar.

Dessa forma, dentre os tipos de aditivos utilizados, considerando as dosagens adotadas nesta pesquisa, acredita-se que o aditivo incorporador de ar é o recomendado para obtenção de maiores resultados resistividade elétrica do concreto.

Os produtos adicionados podem trazer benefícios, que vão depender das especificidades da obra, como melhor trabalhabilidade ou menor consumo de água. Entretanto, os pontos negativos devem ser considerados, uma vez que o tipo de aditivo adotado pode influenciar a durabilidade da estrutura, visto que o material altera a resistividade elétrica do concreto em mais de 40% em alguns casos.

Portanto, quando se utiliza aditivos químicos durante a produção do concreto é necessário avaliar o comportamento do material não só no estado fresco, mas também no estado endurecido.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na presente pesquisa, avaliou-se a influência da inclusão de aditivos químicos ao concreto, em relação à resistividade elétrica superficial e volumétrica. Para a continuidade deste trabalho sugere-se:

- i) Analisar a influência de diferentes dosagens de um mesmo tipo de aditivo químico, com variações dentro dos limites determinados pelos fabricantes;
- ii) Avaliar a resistividade elétrica de concretos com aditivos químicos em idades maiores, superiores a 12 meses;
- iii) Avaliar a resistividade elétrica de concretos com aditivos químicos, produzidos com diferentes tipos de cimentos;
- iv) Realizar testes em concreto armado, para que sejam analisadas eventuais interferências pela presença de armaduras na resistividade elétrica superficial e volumétrica;
- v) Estudar outras propriedades do concreto com aditivos, como permeabilidade a cloretos, composição e condutividade elétrica específica da solução dos poros e testes de carbonatação, visto que são fatores que influenciam diretamente a durabilidade do material.

8. REFERÊNCIAS

- ABREU, Aguida Gomes de. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**: Dissertação de mestrado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998. 142 p.
- AGUIAR, Letícia Couto de. **Os efeitos da variação de temperatura nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto**: Dissertação de mestrado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2018. 103 p.
- AHMAD, Shamsad. **An experimental study on correlation between concrete resistivity and reinforcement corrosion rate**. Anti-corrosion Methods And Materials, Vol. 61, 2014. p.158-165.
- AL-ABDUL-HADI, Salman Saleh. **Electrical resistivity of concrete in relation to corrosion of reinforcement**. Dhahran - Saudi Arabia: University Of Petroleum & Minerals, 1982. 288 p.
- ALMEIDA, Sílvia Martins de. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**: Dissertação de mestrado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 213 p.
- ANDOLFATO, Rodrigo Piernas. **Controle tecnológico básico do concreto**. Ilha Solteira, São Paulo: Unesp, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11655:2015 – Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900: Água para amassamento do concreto**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9204: Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica-volumétrica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSUNÇÃO, José Wilson. **Curvas de dosagem para concretos convencionais e aditivados confeccionados com materiais da Região Noroeste do Paraná:** Dissertação de mestrado. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. 254 p.

CAMPITELI, Vicente Coney. **Porosidade do Concreto.** Boletim Técnico nº 9 – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1987. 20 p.

CASTELLOTE, Marta; ANDRADE, Carmen; ALONSO, Mari Cruz. **Standardization, to a Reference of 25 °C, of Electrical Resistivity for Mortars and Concretes in Saturated or Isolated Conditions.** ACI Materials Journal, Vol. 99, 2002. p.119-128.

CHI, Jack M.; HUANG, Ran; YANG, C. C.. **Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method.** Journal Of Marine Science And Technology, Vol. 10, 2002. p. 14-20.

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais. **Relatório De Qualidade da Água – 2017.** Disponível em: <<http://www.Copasa.com.br/wps/portal/internet/abastecimento-de-agua/relqual>>. Acesso em 27 de dezembro de 2018.

CORREIA, Leandro Cupertino et al. **Resistividade elétrica superficial do concreto:** principais fatores que comprometem a durabilidade do concreto armado – 60º Congresso Brasileiro do Concreto, Foz do Iguaçu: Ibracon, 2018. 12 p.

COSTA, Ada Catarina Soares de Sena et al. **Correlação entre a resistência à compressão do concreto e a velocidade de propagação da onda ultrassônica –** 58º Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte: Ibracon, 2016. 10 p.

FONSECA, Gustavo Celso da. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica –** Dissertação de mestrado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2010. 106 p.

GIROTTI, Emerson M. and SANTOS, Ivair A. **Medidas de resistividade elétrica DC em sólidos: como efetuálas corretamente.** Quím. Nova [online], Vol.25, n.4. 2002. p. 639-647.

GJØRV, Odd E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade –** revisão técnica Enio Pazini Figueiredo e Paulo Helene – tradução Leda Maria Marques Dias Beck. São Paulo, Oficina de textos, 2015. 53 p.

GOWERS, K. R.; MILLARD, S. G.. **Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique.** ACI Materials Journal, Vol. 96, 1999. p. 536-541.

HELENE, Paulo. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado:** Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993. 231 p.

HOPPE, Tiago Fernandes. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz:** Dissertação de mestrado. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2005. 147 p.

HORNBOSTEL, Karla; LARSEN, Claus; GEIKER, Mette. **Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review**. Cement And Concrete Composites, Vol. 39, 2013. pp. 60-72.

HUNKELER, Fritz. **The resistivity of pore water solution - a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods**. Construction And Building Materials, Vol. 10, 1996. p. 381-389.

LAGE, Eduardo Brandão Diniz. **Comparação dos métodos de ensaio não destrutivo para qualidade do concreto: resistividade elétrica superficial e volumétrica em corpo de prova**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2018. 100 p.

LAMOUNIER, Arthur Soares et al. **Determinação da resistividade elétrica e da porosidade aberta de compósitos cimentícios de engenharia – 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Cuiabá: CBECIMAT, 2014. 18 p.

LAYSSI, Hamed et al. **Electrical Resistivity of Concrete: Concepts, applications, and measurement techniques**. Concrete International, 2015. 6 p.

LENCIONI, Julia Wippich. **Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios: Tese de doutorado**. São P: Instituto Tecnológico de Aeronáutica - Ita, 2011. 263 p.

MARTIN, Juan Fernando Matías. **Aditivos para concreto: concreto, ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, Vol. 1, 2005. p.381-406.

MAZER, Wellington. **Inspeção e ensaios em estruturas de concreto**. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012. 60 p.

MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo A.; LIMA, Maryangela Geimba de. **Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement**. Construction And Building Materials, Vol. 107, 2016. p. 11-16.

MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo A. de; LIMA, Maryangela Geimba de; MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de. **Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport**. Environment, Development And Sustainability, Vol. 17, 2014. p. 1103-1119.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014. 751 p.

MILLARD, S. G. **Reinforced concrete resistivity measurement techniques**. Proceedings of The Institution Of Civil Engineers. London, UK. 1991. p. 71-88.

MONFORE, G. E.. **The electrical resistivity of concrete**. Portland Cement Association, Vol. 10, 1968. p. 35-48.

NASCIMENTO, Otávio Luiz et al. **Estudo do comportamento da velocidade de onda ultrassônica em concreto fresco de cimento Portland – 58º Congresso Brasileiro do Concreto**, Belo Horizonte: Ibracon, 2016. 16 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. Tradução Ruy Alberto Cremonini. 2. ed. Porto Alegre, Bookman, 2013.
- PERLIN, L. P., PINTO, R. C. A. **Tomografia ultrassônica em concreto**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, Vol. 6, 2013. p. 246-269.
- PETRUCCI, Eládio G. R.. **Concreto de cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Globo, 1995. 308 p.
- POLDER, Rob B. **Test methods for on site measurement of resistivity of concrete: a RILEM TC-154 technical recommendation**. Construction And Building Materials, Vol. 15, 2001. p. 125-131.
- POLDER, Rob B. et al. **RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion**. Materials and Structures, Vol. 33. 2000. p. 603-611.
- POPOVICS, Sandór. **Strength and related properties of concrete: A quantitative approach**. New York, Usa: John Wiley & Sons, 1998. 535 p.
- QASRAWI, Hisham Y. **Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted**. Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000. p.739-746.
- QUARCIONI, Valdecir Angelo et al. **Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes**. Porto Alegre: Ambiente Construído, Vol. 9, 2009. p. 175-187.
- RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de Dosagem do Concreto: ET-67**. 3ª Ed. São Paulo: ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.
- ROJAS, Carolina Martínez; CINCOTTO, Maria Alba. **Influência da estrutura molecular dos policarboxilatos na hidratação do cimento Portland**. Porto Alegre: Ambiente Construído, Vol. 13, 2013. p. 267-283.
- SALEEM, Muhammad Kamran et al. **Effect of moisture, chloride and sulfate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete**. [s. L.]: Construction And Building Materials, Vol. 10, 1996. 209-214.
- SANTOR, Marcelo Silva. **Influência de materiais de proteção superficial na resistividade elétrica e absorção capilar do concreto**: Dissertação de mestrado. Santa Maria, Rs: Universidade Federal de Santa Maria, 2011. 104 p.
- SANTOS, Lourdimine. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**: Dissertação de mestrado. Brasília: Universidade de Brasília, 2006. 178 p.
- SILVA, Leandro Melo Andrade e. **Resistividade elétrica superficial do concreto: influência da cura**: Trabalho de conclusão de curso. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2016. 68 p.
- VARGAS, Alexandre Silva de. **Estudo da viabilidade do uso do pó de aciaria elétrica a arco na confecção de blocos de concreto para pavimentação**: Dissertação de mestrado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. 166 p.
- VILLATE, E. J. **Física 2 – Eletricidade e Magnetismo**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012. 220p.

WHITING, D. A; NAGI, M. **Electrical resistivity of Concrete – A literature review.** Portland Cement Association, Illinois, USA, 2003. 57 p.

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

WOELF, G. A.; LAUER, K.. **The Electrical Resistivity of Concrete with Emphasis on the Use of Electrical Resistance for Measuring Moisture Content.** Cement, Concrete And Aggregates, Vol. 1, 1979. p.64-67.

YOUNG, Hug. D.; FREEDMAN, Roger A. **Física III – Eletromagnetismo.** 12. ed. Colaborador A. Lewis Ford. Tradução Sonia Midori Yamamoto. Revisão técnica Adir Moysés Luiz. São Paulo, Pearson, 2009. 425p.

ZACCARDI, Y. A. Villagrán et al. **Influence of temperature and humidity on Portland cement mortar resistivity monitored with inner sensors.** Materials And Corrosion, 2009. p. 294-299.

ANEXO I

FABRICA: MATOZINHOS MARCA: CAMPEÃO CRH BRASIL BOLETIM DE ANÁLISES DE CIMENTO		CPIIE-32 (NBR 16697:2018) ENSACADO 31/01/2019 a 31/03/2019			
ENSAIOS QUÍMICOS					
ENSAIOS		NBR Nº	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 16697:2018 Req: (5.1.1)
Perda ao Fogo - PF		NBR NM18	%	6,91	≤ 8,5
Anidrido Sulfúrico - SO ₃		-	%	2,03	≤ 4,5
Resíduo Insolúvel - RI		NBR NM15	%	1,41	≤ 5,0
ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS					
ENSAIOS		NBR Nº	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 16697:2018 Req: (5.2.1)
Área Específica (Blaine)		NBR16372	cm ² /g	3896	não aplicável
Massa Específica		NBR16605/17	g/cm ³	2,98	não aplicável
Finura - Resíduo na Peneira de 0,075mm (#200)		NBR12826/14	%	2,40	≤ 12,0
Finura - Resíduo na Peneira de 0,044mm (#325)		NBR12826/14	%	8,56	não aplicável
Água da Pasta de Consistência Normal		NBR16606	%	28,0	não aplicável
Início de Pega		NBR16607	h:min	3:30	≥ 01:00
Fim de Pega		NBR16607	h:min	4:03	≤ 10:00
Expansibilidade de Le Chatelier - a Quente		NBR11582	mm	0,00	≤ 5
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa) - NBR 7215					
Idade (Dias)	Média	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 16697:2018 Req: (5.2.1)			
1	9,8	não aplicável			
3	16,3	≥ 10,0 MPa			
7	21,7	≥ 20,0 MPa			
28	34,9	≥ 32,0 MPa			
RESPONSÁVEL TÉCNICO					
<p>Ricardo Hatsuo Nishioka CRQ-II 04351031</p> <p>Roberto Adriano Lopes Gerente Geral - Fábrica Matozinhos</p>					
Atualizado: 02/04/2019					

ANEXO II



MC-PowerFlow 4001

Aditivo superplastificante de alto desempenho

Descrição
Aditivo superplastificante de alto desempenho baseado na nova tecnologia de polímeros MC, principalmente indicado para grandes reduções na quantidade de água

Áreas de Aplicação
<ul style="list-style-type: none"> • Concreto pré-moldado • Dosagens na betoneira na obra (concreto usinado) • Concreto auto-adensável • Concreto com alta resistência a agentes agressivos • Concreto aparente • Concreto de alto desempenho • Concreto de alta fluidez • Concretos de ultra alta resistência (UHPC)

Vantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Grande redução na quantidade de água • Longa manutenção do slump com alta resistência à compressão inicial • Rápida dispersão no concreto • Dosagens econômicas • Boa compatibilidade com incorporadores de ar • Boa estabilização em altas consistências • Bom funcionamento com uma grande variedade de cimentos

Dados Técnicos		
Característica	Valor	Observações
Densidade	1,12 kg/L	NBR 10908:2008
Dosagem Recomendada	≥ 0,2% ≤ 5,0%	sobre o peso do cimento

Dados do Produto	
Tipo de produto	Superplastificante
Estado	Líquido
Cor	Marrom
Armazenagem	Manter as embalagens em local coberto, fresco, seco, longe de temperaturas extremas ou fontes de calor, nas embalagens originais, separadas e lacradas. Para entregas a granel o produto deve ser mantido dentro dos reservatórios instalados em local previamente definido.
Validade	12 meses a partir da data de fabricação armazenada nas embalagens fechadas
Embalagens	Tambor 210 kg, peso líquido Container 1000 kg, peso líquido Granel

* Todos os dados técnicos se referem à temperatura de 23 °C (+/- 2 °C) e 60 % (+/- 2 %) de umidade relativa do ar. Temperaturas altas e umidades baixas aceleram, enquanto temperaturas baixas e umidades altas retardam o tempo de aplicação. Conforme a norma NBR 14082:2004.



Método de Aplicação

MC-PowerFlow 4001 é um superplastificante sintético baseado na nova tecnologia de polímeros policarboxilatos (PCE) desenvolvida pela MC.

Seu específico mecanismo de funcionamento torna possível a produção de concretos com conteúdos de água extremamente baixo e excelente trabalhabilidade. As propriedades desejadas para o concreto fresco podem ser atingidas com dosagens econômicas.

MC-PowerFlow 4001 requer tempos de mistura relativamente curtos para desenvolver totalmente seu efeito plastificante, tornando a produção rápida e econômica.

MC-PowerFlow 4001 foi desenvolvido para proporcionar longos tempos de trabalhabilidade ao concreto sem prejuízo à resistência inicial. Portanto os frequentes problemas de perda de slump dos aditivos convencionais podem ser consideravelmente reduzidos.

Dosagens adicionais de superplastificantes na obra para a correção da consistência não são mais necessárias na maioria dos casos.

A combinação especial de diversos agentes ativos permite a produção de concretos homogêneos e sem segregação. Através da manutenção do conteúdo de água pode-se produzir concretos com diversas consistências.

MC-PowerFlow 4001 pode ser utilizado em conjunto com outros aditivos da MC. Por favor peça pelos serviços do nosso departamento de tecnologia de concreto para orientação sobre as melhores combinações.

Mistura

MC-PowerFlow 4001

deve ser adicionado no decorrer do processo de mistura ou no final para ajustes da trabalhabilidade. A utilização de equipamento de dosagem adequado é necessária.

Os tempos de mistura, as normas e as recomendações técnicas para a produção, processamento e cura do concreto e concreto armado devem ser observadas.

Recomendamos que testes preliminares sejam executados antes da utilização em grande escala.

Segurança

Verifique sempre as informações sobre segurança existentes nos rótulos das embalagens. Para mais informações de manuseio e segurança consulte a FISPQ do produto.

Nota Legal: As informações contidas nesta Ficha Técnica foram determinadas com base em testes laboratoriais e no melhor de nossa experiência e conhecimento, podendo sofrer variações em função das características de cada projeto e condições locais de aplicação do produto. Recomendações verbais diferentes das contidas aqui, não são válidas sem a confirmação por escrito da MC-Bauchemie.

A responsabilidade da MC é limitada à qualidade do Produto fornecido, de acordo com suas especificações técnicas e recomendações de aplicação contidos na presente Ficha Técnica. A responsabilidade da MC pela qualidade se dará dentro dos prazos legais e desde que observados os prazos de validade do produto. Se o Cliente estocar, manipular ou aplicar o Produto de qualquer outra maneira que não a recomendada na presente Ficha Técnica assumirá toda e qualquer responsabilidade por eventuais problemas e prejuízos.

Todo Pedido de Compra ou Proposta Comercial deste Produto estão sujeitos cláusulas e condições previstas nas Condições Gerais de Venda e Entrega da MC-Bauchemie publicadas no site <https://www.mc-bauchemie.com.br/sobre-nos/#/politica-de-qualidade>.

Edição 04/2019. Esta ficha técnica substitui a anterior. Caso seja necessária atualização, uma nova edição pode ser impressa em substituição a esta

MC-Bauchemie Brasil

Fábrica São Paulo: Rua Henry Martin, 235 – Vargem Grande Paulista – SP – Tel.: (11) 4158-9158

Fábrica Pernambuco: Rodovia Luiz Gonzaga/ BR-232 – Vitória de Santo Antão – PE – Tel.: (81) 3523-2343



Muraplast FK 101

Aditivo plastificante multifuncional retardador de pega

Descrição

Aditivo plastificante multifuncional retardador de pega para concretos comuns

Áreas de Aplicação

- Concreto usinado
- Dosagens na betoneira na obra
- Concreto bombeável
- Concreto protendido

Vantagens

- Pronto para usar
- Reduz a tensão superficial da água de mistura
- Boa dispersão das partículas de cimento
- Melhora a trabalhabilidade
- Ganho de tempo devido à facilidade da aplicação do concreto
- Melhora o adensamento junto à armadura
- Provoca um pequeno retardo no tempo de pega
- Permite ótimas formulações de concreto
- Permite uma manutenção da trabalhabilidade adequada, também nos ambientes quentes

Dados Técnicos

Característica	Valor	Observações
Densidade	1,20 kg/L	NBR 10908:2008
Dosagem Recomendada	$\geq 0,2\% \leq 1,0\%$	sobre o peso do cimento

Dados do Produto

Tipo de produto	Plastificante multifuncional retardador de pega
Estado	Líquido
Cor	Marrom
Armazenagem	Manter as embalagens em local coberto, fresco, seco, longe de temperaturas extremas ou fontes de calor, nas embalagens originais, separadas e lacradas. Para entregas a granel o produto deve ser mantido dentro dos reservatórios instalados em local previamente definido.
Validade	12 meses a partir da data de fabricação armazenada nas embalagens fechadas
Embalagens	Tambor 240 kg, peso líquido Container 1200 kg, peso líquido Granel

* Todos os dados técnicos se referem à temperatura de 23 °C (+/- 2 °C) e 60 % (+/- 2 %) de umidade relativa do ar. Temperaturas altas e umidades baixas aceleram, enquanto temperaturas baixas e umidades altas retardam o tempo de aplicação. Conforme a norma NBR 14082:2004.



Método de Aplicação

Método de atuação

Muraplast FK 101 age como um agente dispersor das partículas de cimento, evitando sua aglomeração e reduzindo a tensão superficial da água da mistura. Como consequência da melhor distribuição das partículas de cimento e do agregado, obtém-se uma melhora na coesão e trabalhabilidade do concreto.

Concretos produzidos com **Muraplast FK 101** possuem um concreto mais denso e homogêneo, bem como uma redução da permeabilidade.

Através da possibilidade de redução do volume de água da mistura, mantendo-se a mesma consistência e consumo de cimento, obtém-se uma mistura com um fator água/cimento menor e, portanto, com maiores resistências e menos capilaridades.

Caso o volume de água não seja reduzido, obtém-se uma melhora da trabalhabilidade do concreto, o que reduzirá a necessidade de adensamento.

Muraplast FK 101 também pode ser utilizado em conjunto com aditivos superplastificantes, incorporadores de ar e retardadores.

Mistura

Muraplast FK 101 deve ser adicionado no decorrer do processo de mistura ou no final para ajustes da trabalhabilidade. A utilização de equipamento de dosagem adequado é necessária.

Os tempos de mistura, as normas e as recomendações técnicas para a produção, processamento e cura do concreto e concreto armado devem ser observadas.

Recomendamos que testes preliminares sejam executados antes da utilização em grande escala.

Segurança

Verifique sempre as informações sobre segurança existentes nos rótulos das embalagens. Para mais informações de manuseio e segurança consulte a FISPQ do produto.

Nota Legal: As informações contidas nesta Ficha Técnica foram determinadas com base em testes laboratoriais e no melhor de nossa experiência e conhecimento, podendo sofrer variações em função das características de cada projeto e condições locais de aplicação do produto. Recomendações verbais diferentes das contidas aqui, não são válidas sem a confirmação por escrito da MC-Bauchemie.

A responsabilidade da MC é limitada à qualidade do Produto fornecido, de acordo com suas especificações técnicas e recomendações de aplicação contidas na presente Ficha Técnica. A responsabilidade da MC pela qualidade se dará dentro dos prazos legais e desde que observados os prazos de validade do produto. Se o Cliente estocar, manipular ou aplicar o Produto de qualquer outra maneira que não a recomendada na presente Ficha Técnica assumirá toda e qualquer responsabilidade por eventuais problemas e prejuízos.

Todo Pedido de Compra ou Proposta Comercial deste Produto estão sujeitos cláusulas e condições previstas nas Condições Gerais de Venda e Entrega da MC-Bauchemie publicadas no site <https://www.mc-bauchemie.com.br/sobre-nos/#/politica-de-qualidade>.

Edição 04/2019. Esta ficha técnica substitui a anterior. Caso seja necessária atualização, uma nova edição pode ser impressa em substituição a esta



Centrament Air 200

Aditivo incorporador de ar

Descrição

Aditivo incorporador de ar para concreto e argamassa

Áreas de Aplicação

- Concretos de pontes e pavimentos rígidos
- Concretos de barragens
- Concretos resistentes às reações de gelo e degelo

Vantagens

- Pronto para usar
- Forma microporos de ar
- Melhora a reologia
- Melhora a homogeneidade
- Reduz a segregação e a eflorescência

Dados Técnicos

Característica	Valor	Observações
Densidade	1,00 kg/L	NBR 10908:2008
Dosagem Recomendada	$\geq 0,2\% \leq 0,5\%$	sobre o peso do cimento

Dados do Produto

Tipo de produto	Incorporador de ar
Estado	Líquido
Cor	Castanho
Armazenagem	Manter as embalagens em local coberto, fresco, seco, longe de temperaturas extremas ou fontes de calor, nas embalagens originais, separadas e lacradas. Para entregas a granel o produto deve ser mantido dentro dos reservatórios instalados em local previamente definido.
Validade	12 meses a partir da data de fabricação armazenada nas embalagens fechadas
Embalagens	Tambor 200 kg, peso líquido Container 1000 kg, peso líquido

* Todos os dados técnicos se referem à temperatura de 23 °C (+/- 2 °C) e 60 % (+/- 2 %) de umidade relativa do ar. Temperaturas altas e umidades baixas aceleram, enquanto temperaturas baixas e umidades altas retardam o tempo de aplicação. Conforme a norma NBR 14082:2004.



Método de Aplicação

Método de atuação

Centrament Air 200 incorpora inúmeros microporos de ar (< 0,3 mm de diâmetro) em concretos e argamassas.

Centrament Air 200 melhora a reologia e a homogeneidade do concreto. Também reduz a segregação e a eflorescência.

Devido ao efeito dos microporos de ar, produz concretos muito fáceis de serem lançados e adensados.

Centrament Air 200 pode ser utilizado em concreto usinado ou produzido na obra.

Concretos produzidos com **Centrament Air 200** possuem inúmeros microporos de ar que estão uniformemente distribuídos no concreto.

Centrament Air 200 também pode ser utilizado em conjunto com outros aditivos da MC.

Mistura

Centrament Air 200 deve ser adicionado a água de amassamento antes ou durante a mistura.

Geralmente deve-se tomar cuidado durante a utilização de aditivos incorporadores de ar já que a temperatura do concreto e do ar, a quantidade de água, o método e tempo de mistura, bem como o tempo de transporte podem afetar o teor de poros no concreto.

Normalmente altas temperaturas reduzem a formação de microporos.

Para se obter os melhores resultados recomendamos adicionar **Centrament Air 200** a água de amassamento e misturar-se por pelo menos 60 segundos.

Recomendamos também que testes preliminares sejam executados antes da utilização em grande escala.

Outras aplicações

Centrament Air 200 também pode ser utilizado em concreto pré-moldado.

Centrament Air 200 também pode ser utilizado para reduzir a água utilizada no concreto obtendo-se a mesma trabalhabilidade. Porém normalmente para cada 1 % de ar incorporado, necessita-se de 8 % a mais de cimento para compensar a perda de resistência.

Centrament Air 200 também pode ser utilizado para melhorar o desempenho de argamassas tanto no estágio seco como no úmido.

Segurança

Verifique sempre as informações sobre segurança existentes nos rótulos das embalagens. Para mais informações de manuseio e segurança consulte a FISPQ do produto.

Nota Legal: As informações contidas nesta Ficha Técnica foram determinadas com base em testes laboratoriais e no melhor de nossa experiência e conhecimento, podendo sofrer variações em função das características de cada projeto e condições locais de aplicação do produto. Recomendações verbais diferentes das contidas aqui, não são válidas sem a confirmação por escrito da MC-Bauchemie.

A responsabilidade da MC é limitada à qualidade do Produto fornecido, de acordo com suas especificações técnicas e recomendações de aplicação contidos na presente Ficha Técnica. A responsabilidade da MC pela qualidade se dará dentro dos prazos legais e desde que observados os prazos de validade do produto. Se o Cliente estocar, manipular ou aplicar o Produto de qualquer outra maneira que não a recomendada na presente Ficha Técnica assumirá toda e qualquer responsabilidade por eventuais problemas e prejuízos.

Todo Pedido de Compra ou Proposta Comercial deste Produto estão sujeitos cláusulas e condições previstas nas Condições Gerais de Venda e Entrega da MC-Bauchemie publicadas no site <https://www.mc-bauchemie.com.br/sobre-nos/#/politica-de-qualidade>.

Edição 04/2019. Esta ficha técnica substitui a anterior. Caso seja necessária atualização, uma nova edição pode ser impressa em substituição a esta.



Murasit ECO 210

Aditivo para controle de hidratação do cimento

Descrição

Aditivo para controle de hidratação do cimento

Áreas de Aplicação

- Recuperação do concreto no estado fresco
- Concreto em locais quentes
- Limpeza de lastro de caminhões betoneiras

Vantagens

- Pronto para usar
- Controla hidratação do cimento
- Estabiliza concretos que irão demorar para serem lançados
- Estabiliza concreto por até 72 horas
- Elimina os descartes, favorecendo o meio-ambiente
- Controla a geração de calor de hidratação em concretos com alto consumo de cimento

Dados Técnicos

Característica	Valor	Observações
Densidade	1,17 kg/L	NBR 10908:2008
Dosagem Recomendada	$\geq 0,2\% \leq 1,0\%$	sobre o peso do cimento

Dados do Produto

Tipo de produto	Inibidor de hidratação
Estado	Líquido
Cor	Incolor
Armazenagem	Manter as embalagens em local coberto, fresco, seco, longe de temperaturas extremas ou fontes de calor, nas embalagens originais, separadas e lacradas. Para entregas a granel o produto deve ser mantido dentro dos reservatórios instalados em local previamente definido.
Validade	12 meses a partir da data de fabricação armazenada nas embalagens fechadas
Embalagens	Bombona de 20kg, peso líquido Tambor 210 kg, peso líquido Granel

* Todos os dados técnicos se referem à temperatura de 23 °C (+/- 2 °C) e 60 % (+/- 2 %) de umidade relativa do ar. Temperaturas altas e umidades baixas aceleram, enquanto temperaturas baixas e umidades altas retardam o tempo de aplicação. Conforme a norma NBR 14082:2004.



Método de Aplicação

Método de atuação

Murasit ECO 210 é um aditivo que controla a hidratação do cimento. Dependendo da dosagem, pode inibir a hidratação do cimento por até 72 horas.

Dosagem

Murasit ECO 210 pode ser usado normalmente em uma dosagem entre 0,1 a 2,0 % sobre o peso do cimento.

Dosagens diferentes dependerão do tipo de cimento, consumo por m³, temperatura ambiente e tempo requerido para estabilizar.

Recomendamos que testes preliminares sejam executados para a determinação da dosagem antes da utilização em grande escala.

Mistura

Murasit ECO 210 deve ser adicionado no início do processo de mistura ou também junto com a água da mistura. É necessária a utilização de equipamento de dosagem adequado.

Os tempos de mistura e as especificações com respeito a produção, trabalhabilidade e cura também devem ser observados.

Precauções

Deve-se prevenir a evaporação de água na mistura estabilizada. É recomendado proteger dos raios solares e do calor, mantendo em ambiente abrigado.

Segurança

Verifique sempre as informações sobre segurança existentes nos rótulos das embalagens. Para mais informações de manuseio e segurança consulte a FISPQ do produto.

Nota Legal: As informações contidas nesta Ficha Técnica foram determinadas com base em testes laboratoriais e no melhor de nossa experiência e conhecimento, podendo sofrer variações em função das características de cada projeto e condições locais de aplicação do produto. Recomendações verbais diferentes das contidas aqui, não são válidas sem a confirmação por escrito da MC-Bauchemie.

A responsabilidade da MC é limitada à qualidade do Produto fornecido, de acordo com suas especificações técnicas e recomendações de aplicação contidos na presente Ficha Técnica. A responsabilidade da MC pela qualidade se dará dentro dos prazos legais e desde que observados os prazos de validade do produto. Se o Cliente estocar, manipular ou aplicar o Produto de qualquer outra maneira que não a recomendada na presente Ficha Técnica assumirá toda e qualquer responsabilidade por eventuais problemas e prejuízos.

Todo Pedido de Compra ou Proposta Comercial deste Produto estão sujeitos cláusulas e condições previstas nas Condições Gerais de Venda e Entrega da MC-Bauchemie publicadas no site <https://www.mc-bauchemie.com.br/sobre-nos/#/politica-de-qualidade>.

Edição 04/2019. Esta ficha técnica substitui a anterior. Caso seja necessária atualização, uma nova edição pode ser impressa em substituição a esta



Centrament 600 Rápido

Aditivo acelerador de resistência

Descrição

Aditivo acelerador de endurecimento do concreto

Áreas de Aplicação

- Concretos convencionais e bombeáveis que necessitem de alta resistência inicial

Vantagens

- Rápido endurecimento do concreto
- Faixa de dosagem favorável ao controle dos tempos de pega
- Produzem concretos com alta resistência inicial
- Permite ótimas formulações de concreto

Dados Técnicos

Característica	Valor	Observações
Densidade	1,01 kg/L	NBR 10908:2008
Dosagem Recomendada	$\geq 0,2\% \leq 1,0\%$	sobre o peso do cimento

Dados do Produto

Tipo de produto	Acelerador de pega e endurecimento
Estado	Líquido
Cor	Castanho escuro
Armazenagem	Manter as embalagens em local coberto, fresco, seco, longe de temperaturas extremas ou fontes de calor, nas embalagens originais, separadas e lacradas. Para entregas a granel o produto deve ser mantido dentro dos reservatórios instalados em local previamente definido.
Validade	12 meses a partir da data de fabricação armazenada nas embalagens fechadas
Embalagens	Tambor 200 kg, peso líquido Granel

* Todos os dados técnicos se referem à temperatura de 23 °C (+/- 2 °C) e 60 % (+/- 2 %) de umidade relativa do ar. Temperaturas altas e umidades baixas aceleram, enquanto temperaturas baixas e umidades altas retardam o tempo de aplicação. Conforme a norma NBR 14082:2004.



Método de Aplicação

Método de atuação

Centrament 600 Rápido é um acelerador de endurecimento desenvolvido para concretos convencionais e bombeáveis que necessitam tempos de endurecimento e pega especialmente curtos.

O concreto aditivado com **Centrament 600 Rápido** adere muito bem às superfícies onde está sendo aplicado, mesmo que a superfície se apresente úmida ou levemente molhada.

A utilização de **Centrament 600 Rápido** é extremamente econômica, já que diminui significativamente o tempo de utilização de fôrmas e cimbramentos.

Mistura

O produto deve ser adicionado somente quando todos os procedimentos para o lançamento da concretagem estiverem prontos, caso contrário, a reação se inicia cedo demais. Recomenda-se que os equipamentos de mistura estejam o mais próximo do local da concretagem.

O concreto sem trabalhabilidade jamais deve receber a adição de mais água, devendo ser inutilizado.

Dosagem

Centrament 600 Rápido pode ser utilizado com todos os tipos de cimento empregados em concreto projetado, porém o tempo de endurecimento pode variar em função do tipo de cimento.

A dosagem do aditivo pode variar em função do tempo de endurecimento necessário, tipo e consumo de cimento, relação água/cimento e temperatura ambiente durante a aplicação.

Recomendamos que testes preliminares sejam executados antes da utilização em grande escala.

Segurança

Verifique sempre as informações sobre segurança existentes nos rótulos das embalagens. Para mais informações de manuseio e segurança consulte a FISPQ do produto.

Nota Legal: As informações contidas nesta Ficha Técnica foram determinadas com base em testes laboratoriais e no melhor de nossa experiência e conhecimento, podendo sofrer variações em função das características de cada projeto e condições locais de aplicação do produto. Recomendações verbais diferentes das contidas aqui, não são válidas sem a confirmação por escrito da MC-Bauchemie.

A responsabilidade da MC é limitada à qualidade do Produto fornecido, de acordo com suas especificações técnicas e recomendações de aplicação contidos na presente Ficha Técnica. A responsabilidade da MC pela qualidade se dará dentro dos prazos legais e desde que observados os prazos de validade do produto. Se o Cliente estocar, manipular ou aplicar o Produto de qualquer outra maneira que não a recomendada na presente Ficha Técnica assumirá toda e qualquer responsabilidade por eventuais problemas e prejuízos.

Todo Pedido de Compra ou Proposta Comercial deste Produto estão sujeitos cláusulas e condições previstas nas Condições Gerais de Venda e Entrega da MC-Bauchemie publicadas no site <https://www.mc-bauchemie.com.br/sobre-nos/#/politica-de-qualidade>.

Edição 04/2019. Esta ficha técnica substitui a anterior. Caso seja necessária atualização, uma nova edição pode ser impressa em substituição a esta.