

## Estudo de variáveis de ensaio que influenciam os resultados de ensaios de resistividade elétrica volumétrica

E. B. D. Lage<sup>1\*</sup>, E. P. Figueiredo<sup>2</sup>, J. O. S. Paulino<sup>3</sup>, E. Chahud<sup>4</sup>, M. T. P. Aguilár<sup>5</sup>

\*Autor de Contacto: [brandaolage@yahoo.com.br](mailto:brandaolage@yahoo.com.br)

### RESUMO

O controle de qualidade do concreto se baseia, comumente, na avaliação da sua consistência no estado fresco e na sua resistência mecânica à compressão no estado endurecido. Em casos especiais, se controla a porosidade aparente, a resistência ao desgaste, a expansão devido à reação álcali- agregado, a resistência ao ataque dos íons cloretos, a resistência à carbonatação e a resistência ao ataque por sulfatos. Na maioria dos casos, tal controle ocorre por métodos destrutivos. No caso da resistência à entrada de agentes agressivos, íons cloretos, CO<sub>2</sub> e sulfatos, por exemplo, existe a possibilidade de se avaliar a qualidade do concreto por meio do ensaio de resistividade elétrica. O ensaio de resistividade superficial é amplamente utilizado para estudo de estruturas in loco, enquanto o volumétrico se restringe a ensaios em corpos de prova para controle de qualidade do concreto. São poucos os dados sobre as variáveis que afetam estes ensaios, especialmente o método volumétrico. Neste contexto, e neste trabalho, se analisa algumas das variáveis do ensaio de resistividade elétrica volumétrica em um equipamento desenvolvido na Universidade Federal de Minas Gerais que utiliza corrente alternada. Os resultados indicam que o uso de lã de aço seca promove um contato adequado entre os eletrodos e a amostra. A imersão em água por no mínimo 2 horas e em câmara úmida por mais de 11 horas levam à saturação do corpo de prova e garantem a mesma condição de medição. Quando se utiliza corrente alternada, o uso de frequências na faixa de 10 Hz até 210 Hz parece não influenciar nos resultados de resistividade elétrica volumétrica.

**Palavras chave:** resistividad eléctrica volumétrica, concreto, control de calidad.

**Citar como:** Lage, E. B. D. et. al (2023). “Estudo de variáveis de ensaio que influenciam os resultados de ensaios de resistividade elétrica volumétrica” en: Álvaro G. Sánchez Bellido, Juan Carlos Rojas Vidovic, Alan J. Aparicio Ortubé, Enio J. Pazini Figueiredo y Pedro Castro Borges (Eds.), Memorias del XVII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XVIX Congreso de Control de Calidad en la Construcción, CONPAT 2023. Santa Cruz de la Sierra (BOL), (pp. 13). DOI: <https://doi.org/10.21041/CONPAT2023/V1CC6001>

<sup>1</sup> Departamento de engenharia Civil, UNIFUNCESI, Itabira, Brasil.

<sup>2</sup> EECA, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil

<sup>3</sup> DEE, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

<sup>4</sup> DEMC, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

<sup>5</sup> DEMC, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

## Study of test variables that influence the results of volumetric electrical resistivity tests

### ABSTRACT

Concrete quality control is commonly based on evaluating its consistency in the fresh state and its mechanical resistance to compression in the hardened state. In special cases, apparent porosity, wear resistance, expansion due to the alkali-aggregate reaction, resistance to attack by chloride ions, resistance to carbonation and resistance to attack by sulfates are controlled. In most cases, such control occurs by destructive methods. In the case of resistance to the entry of aggressive agents, chloride ions, CO<sub>2</sub> and sulfates, for example, there is the possibility of evaluating the quality of the concrete through the electrical resistivity test. The surface resistivity test is widely used to study structures in situ, while the volumetric test is restricted to tests on specimens for concrete quality control. There is little data on the variables that affect these tests, especially the volumetric method. In this context, and in this work, some of the variables of the volumetric electrical resistivity test are analyzed in equipment developed at the Federal University of Minas Gerais that uses alternating current. The results indicate that the use of dry steel wool promotes adequate contact between the electrodes and the sample. Immersion in water for at least 2 hours and in a humid chamber for more than 11 hours leads to saturation of the specimen and guarantees the same measurement condition. When using alternating current, the use of frequencies in the range of 10 Hz to 210 Hz does not seem to influence the volumetric electrical resistivity results.

**Keywords:** volumetric electrical resistivity, concrete, quality control.

## Estudio de variables de prueba que influyen en los resultados de las pruebas de resistividad eléctrica volumétrica

### RESUMEN

El control de calidad del hormigón comúnmente se basa en la evaluación de su consistencia en estado fresco y su resistencia mecánica a la compresión en estado endurecido. En casos especiales se controla la porosidad aparente, la resistencia al desgaste, la expansión debida a la reacción álcali-agregado, la resistencia al ataque de iones cloruro, la resistencia a la carbonatación y la resistencia al ataque de sulfatos. En la mayoría de los casos, dicho control se produce mediante métodos destructivos. En el caso de la resistencia al ingreso de agentes agresivos, iones cloruro, CO<sub>2</sub> y sulfatos, por ejemplo, existe la posibilidad de evaluar la calidad del concreto mediante el ensayo de resistividad eléctrica. El ensayo de resistividad superficial es ampliamente utilizado para estudiar estructuras in situ, mientras que el ensayo volumétrico se restringe a ensayos sobre probetas para el control de calidad del hormigón. Hay pocos datos sobre las variables que afectan a estas pruebas, especialmente al método volumétrico. En este contexto, y en este trabajo, se analizan algunas de las variables del ensayo de resistividad eléctrica volumétrica en equipos desarrollados en la Universidad Federal de Minas Gerais que utilizan corriente alterna. Los resultados indican que el uso de lana de acero seca promueve un contacto adecuado entre los electrodos y la muestra. La inmersión en agua durante al menos 2 horas y en una cámara húmeda durante más de 11 horas produce la saturación de la muestra y garantiza las mismas condiciones de medición. Cuando se utiliza corriente alterna, el uso de frecuencias en el rango de 10 Hz a 210 Hz no parece influir en los resultados de resistividad eléctrica volumétrica.

**Palabras clave:** resistividad eléctrica volumétrica, concreto, control de calidad.

## 1. INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de concreto é um dos principais aspectos a serem considerados no contexto da construção sustentável. Por sua vez, a vida útil da estrutura está relacionada à qualidade do concreto e às condições de serviço e ambientais à que é exposto. Em condições normais, o meio básico e a barreira física que envolve a armadura dentro do compósito cimentício protege o metal da corrosão. No entanto, esse meio pode ter seu pH e sua integridade alterados quando o material é submetido a atmosferas agressivas, seja pela penetração de CO<sub>2</sub>, ataque por ácidos ou pela ação de íons cloreto, entre outros, o que favorece a corrosão das armaduras. A ação danosa dos cloretos ocorre quando estão dissolvidos na água na forma de íons que podem penetrar e se movimentarem no composto por absorção, difusão atômica, permeabilidade sob pressão e migração iônica. A avaliação da resistência do composto cimentício à ação dos cloretos pode ser realizada por meio de ensaios indiretos ou diretos de longa duração ou acelerados.

Ensaio de resistividade elétrica têm sido apontados como métodos capazes de avaliar a facilidade de penetração dos cloretos nos compósitos cimentícios, uma vez que a resistividade elétrica é um parâmetro sensível à microestrutura do material, especialmente quanto ao diâmetro, à conectividade e à distribuição dos poros, características microestruturais que influenciam diretamente na penetração de fluidos e no conteúdo de umidade presente nos poros. Ramezaniapour *et al.* (2011) concluíram que a partir dos valores de resistividade elétrica é possível estimar a permeabilidade do concreto. Segundo Ghosh e Tran (2015), as técnicas não destrutivas de medição de resistividade elétrica são ferramentas potenciais para prever a taxa de corrosão em concreto de alto desempenho. Gudimettla (2016) mostrou que existe uma boa correlação entre o ensaio de resistividade elétrica e o teste rápido de permeabilidade ao cloreto.

Existem dois métodos para avaliação da resistividade elétrica de materiais cimentícios. O primeiro consiste na medida da diferença de potencial entre as faces opostas do corpo de prova (método volumétrico). No segundo, a medida se dá em pontos localizados da superfície do corpo de prova ou mesmo da estrutura. No controle de qualidade de estruturas existentes, se emprega o método superficial. No controle de qualidade do concreto se utiliza, comumente, o método volumétrico. No entanto, são muitas as variáveis que podem influenciar os ensaios de resistividade elétricas.

A temperatura ambiente pode influenciar nos resultados de resistividade elétrica, pois com a elevação da temperatura ocorre a diminuição da resistividade elétrica, e vice-versa, devido ao aumento da mobilidade iônica na água presente nos poros (Aguiar, 2018). No entanto, aumentos de temperatura em ambientes com umidade relativa baixa também podem ocasionar o aumento da resistividade ao provocar a evaporação da água livre capilar do concreto.

O contato entre o corpo de prova e o eletrodo do equipamento, bem como as propriedades destes materiais de contato, é de grande importância para a obtenção de bons resultados, pois a resistividade elétrica do material de contato pode se somar à do material em análise. A norma NBR 9204 (ABNT, 2012) que prescreve o ensaio de resistividade volumétrica no Brasil, recomenda o uso de mercúrio líquido, pois este possui uma baixa resistividade elétrica e um ótimo contato por ser um material líquido. Porém, o mercúrio é um material tóxico, o que pode dificultar o uso do ensaio em larga escala. Estudos realizados por Polder *et al.* (2000) utilizam apenas uma esponja molhada como condutor eletrolítico.

A umidade dos corpos de prova varia de acordo com as condições atmosféricas e o ambiente de cura, e influencia a passagem a resistividade elétrica, pois a passagem da corrente pelo concreto depende do teor de eletrólito contido em seus poros. Logo, quanto maior a saturação dos poros, menor será a resistividade elétrica e, conseqüentemente, maior será a velocidade da corrosão da armadura (ASKELAND *et al.*, 2006). Dessa forma, é importante garantir a saturação do corpo de

prova (LENCIONI e LIMA, 2010) e controlar a umidade do local de ensaio. De acordo com a norma NBR 9204 (ABNT, 2012), o ensaio deve ser realizado à temperatura de  $24 \pm 4$  °C, com umidade relativa do ar superior a 60%, estando o corpo de prova saturado em câmara úmida.

Trabalho de Duarte *et al.* (2015) mostra que dependendo da origem e do tratamento, as águas possuem resistividades elétricas significativamente diferentes, pois o teor de íons presentes pode ser diferente. Considerando que a resistividade elétrica do composto cimentício está relacionada ao fluxo de íons que se difundem no material por meio da água presente nos poros interconectados, a presença de íons na água utilizada na saturação dos corpos de prova pode influenciar na resistividade elétrica de compostos cimentícios.

De acordo com Layssi *et al.* (2015), no método volumétrico, quando se utiliza corrente alternada, a frequência utilizada pode variar de 0,5 Hz a 10 kHz. No entanto, não se pode determinar uma frequência ideal, uma vez que varia com proporções da mistura e condições de umidade. O uso de um sinal de baixa frequência, em torno de 40 Hz, pode aumentar a resistividade medida em até 9% em comparação com um sinal de kHz.

Neste contexto, este estudo analisa, em uma montagem que utiliza corrente alternada, a influência do uso de diferentes contatos, distintos tipos de saturação e águas de diferentes naturezas nas medidas de resistividades elétrica volumétrica de concretos. Também avalia a aplicação de frequências na faixa de 10 Hz a 210 Hz.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Corpos de prova de um mesmo concreto, caracterizado quanto a resistência mecânica e módulo de elasticidade, após serem submetidos a cura em diferentes níveis de saturação, foram avaliados quanto à resistividade elétrica volumétrica. Na cura em ambiente submerso se utilizou águas de diferentes naturezas. No ensaio de resistividade elétrica foram utilizadas frequências variáveis e diferentes tipos de contatos entre o corpo de prova e os eletrodos.

### 2.1. Materiais

Foram produzidos, de acordo a NBR 5738 (ABNT, 2015; versão corrigida 2016), corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, utilizando Cimento CP III 32, dosagem em massa de 1 de cimento para 2 de areia média natural de rio e 2 de brita zero lavada, oriunda de rocha gnaisse e relação água cimento de 0,6. Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), o cimento CP III 32 pode conter entre 35 e 75% de escória de alto forno. A água utilizada foi fornecida pela companhia de saneamento local. Os corpos de provas foram submetidos à cura imersa em temperatura ambiente e em ambiente saturado com águas de diferentes condutividades elétricas.

### 2.2. Caracterização dos Concretos

Os concretos foram caracterizados quanto à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade nas idades de 3, 7, 14, 21 e 28 dias. Para cada idade foram ensaiados 5 corpos de prova. O ensaio de resistência à compressão foi realizado em uma prensa hidráulica marca Emic, segundo a norma NBR 5739 (ABNT, 2018). O módulo de elasticidade foi obtido pelo método da frequência ressonante forçada no modo longitudinal, em um equipamento Erudite MKII da C.N.S. Eletronics LTD, com base nas recomendações da Norma ASTM C215-19 (ASTM, 2019). Foram realizadas 10 medições para cada corpo de prova, aplicando-se vibrações na faixa de 7.000–15.000 Hz e voltagem de 0,5v, considerando a constante de amortecimento superior a 15 (Sales, 2008).

### 2.3. Determinação da Resistividade Elétrica Volumétrica

Para este estudo foi utilizado um equipamento desenvolvido na UFMG, no qual o corpo de prova de concreto é colocado entre duas placas de cobre de espessura 2mm e arestas de 100 mm. A corrente alternada é aplicada, utilizando a frequência de aproximadamente 40 Hz e, então, se avaliam as quedas dos potenciais entre os eletrodos. O cálculo da resistividade elétrica volumétrica do concreto é baseado apenas na parte real da impedância. O esquema elétrico da montagem do equipamento é apresentado na Figura 1 e a imagem real da montagem encontra-se na Figura 2. O osciloscópio é um instrumento que só mede tensão e, portanto, para a medição da corrente que circula pelo bloco de concreto foi utilizado um resistor *shunt*. Esse resistor fica em série com o corpo de prova de concreto e a corrente que circula no bloco também circula no resistor, gerando uma tensão no resistor *shunt*. Essa tensão é medida pelo osciloscópio e, como se conhece o valor do resistor *shunt*, o valor da corrente é calculado  $V = RI$ , onde  $V$  é a tensão no resistor *shunt*,  $R$  é o valor do resistor *shunt* e  $I$  é a corrente que se quer medir. O banco de resistores foi um artifício utilizado para medir a corrente por meio da medição da tensão desenvolvida do resistor, pois não se tinha um multímetro adequado.

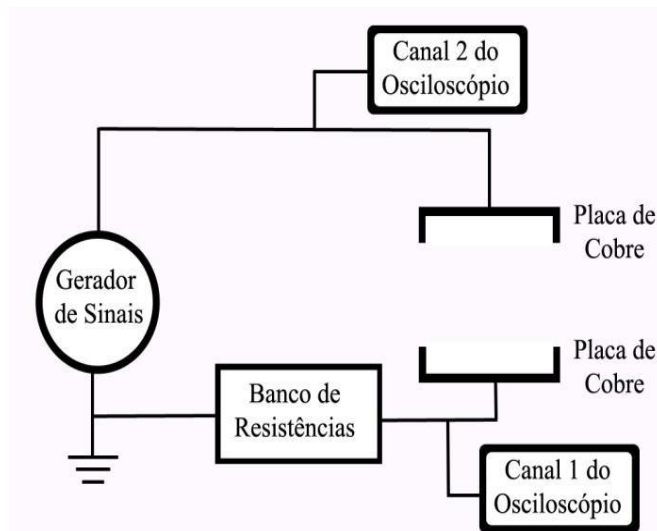


Figura 1. Esquema do equipamento de medição da resistividade elétrica volumétrica.

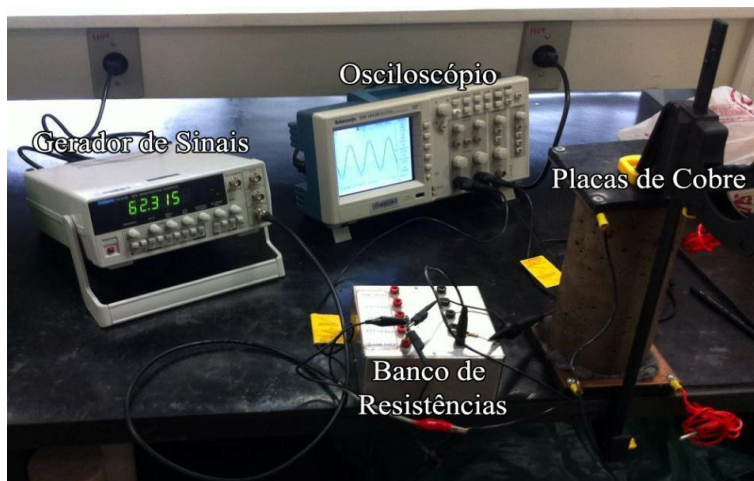


Figura 2. Equipamento de medição da resistividade elétrica volumétrica.

Os ensaios foram realizados nas condições de temperatura e umidade do ar, respectivamente de 22°C e 56%, propostas pela norma NBR 9204 (ABNT, 2012). Como material de contato nas interfaces utilizou-se um gel clínico condutor, pó de grafite, lã de aço seca e molhada e combinações entre eles (gel clínico condutor + pó de grafite, lã de aço + gel clínico condutor).

A influência da umidade do corpo de prova foi estudada empregando-se saturação por imersão e em câmara úmida, tempo de imersão em água e influência do tipo de água de saturação (água deionizada, destilada, salobra e água fornecida pela concessionária de Belo Horizonte, MG-COPASA, e pela distribuidora SAAE da cidade de Itabira, MG. Foram realizados ensaios, variando-se a frequência no intervalo de 10 Hz a 210 Hz (limites do gerador utilizado) em cinco diferentes corpos de prova.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Caracterização do Concreto

Na Figura 3 é apresentada a evolução da resistência à compressão média do concreto, assim como a linha de tendência. Observa-se um crescimento monotônico da resistência até os 28 dias, sendo o valor nessa data coerente com a relação água/cimento utilizada. Por ser um cimento com elevados teores de escória, pode-se esperar crescimentos significativos após os 28 dias.

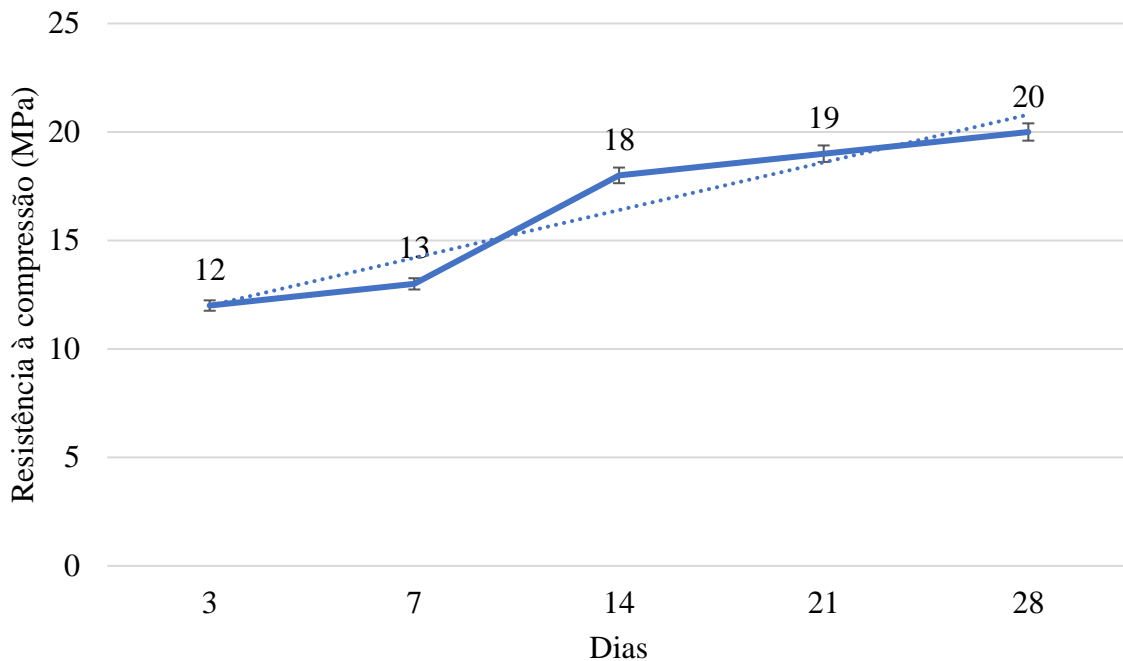


Figura 3. Resultados dos ensaios de resistência à compressão.

A Figura 4 apresenta os valores médios e linha de tendência obtidos no ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada no modo longitudinal. De modo geral, observa-se um crescimento dos valores do módulo com a idade. Um módulo de 32 GPa aos 28 dias para um concreto de 20 MPa se justifica pelo método de medição que, comumente, fornece valores superiores aos obtidos em ensaios de módulo conduzidos pela NBR 8522 (ABNT, 2017).

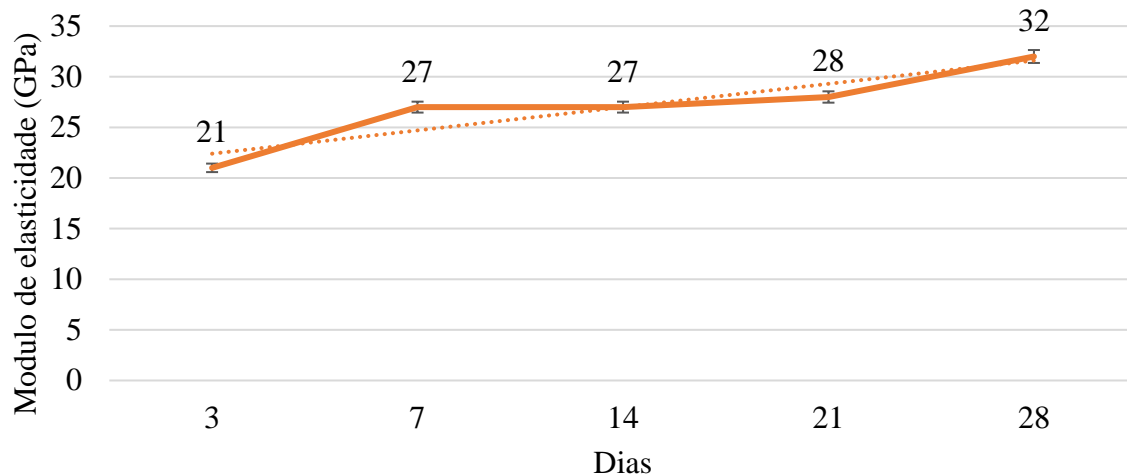


Figura 4. Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade obtidos por frequência ressonante forçada no modo longitudinal.

### 3.2. Ensaios de Resistividade Elétrica Volumétrica

#### 3.2.1. Estudo da influência do contato

Os resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica volumétrica, após o mesmo tempo de cura (14 dias) e saturação, utilizando diferentes tipos de contato entre o corpo de prova e as placas de cobre, são apresentados na Tabela 1. O pó de grafite usado isoladamente não foi testado, pois não se distribuiu uniforme do pó nas seções superior e inferior dos corpos de prova. Os resultados obtidos são similares, uma vez que todos os contatos utilizados são condutores, se acomodam nas imperfeições do corpo de prova, permitindo um contato adequado com a placa de cobre e, dessa forma, influenciam da mesma forma na perda de carga. Em função da praticidade, optou-se pelo uso da lã de aço seca nos ensaios subsequentes. Ensaios complementares indicaram ser necessário usar lã nova a cada troca de corpo de prova, devido a lã a cada bateria criar uma ferrugem que gera resistência na palha de aço.

Tabela 1. Resultados de ensaios de resistividade elétrica volumétrica utilizando diferentes contatos entre o corpo de prova e os eletrodos de cobre.

Material de contato	Resistividade (Ohm.m)
gel clínico	82
gel clínico e pó de grafite	82
lã de aço molhada	81
lã de aço seco	80
lã de aço + gel clínico	82

#### 3.2.2. Influência da umidade do corpo de prova

A Figura 5 apresenta os dados obtidos no ensaio de resistividade elétrica volumétrica em corpos de prova submersos em água distribuída pela companhia de distribuição local por diferentes períodos. O processo acima foi realizado depois de fazer cura de 28 dias em câmara úmida, os corpos foram secos em ambiente aberto por 7 dias.

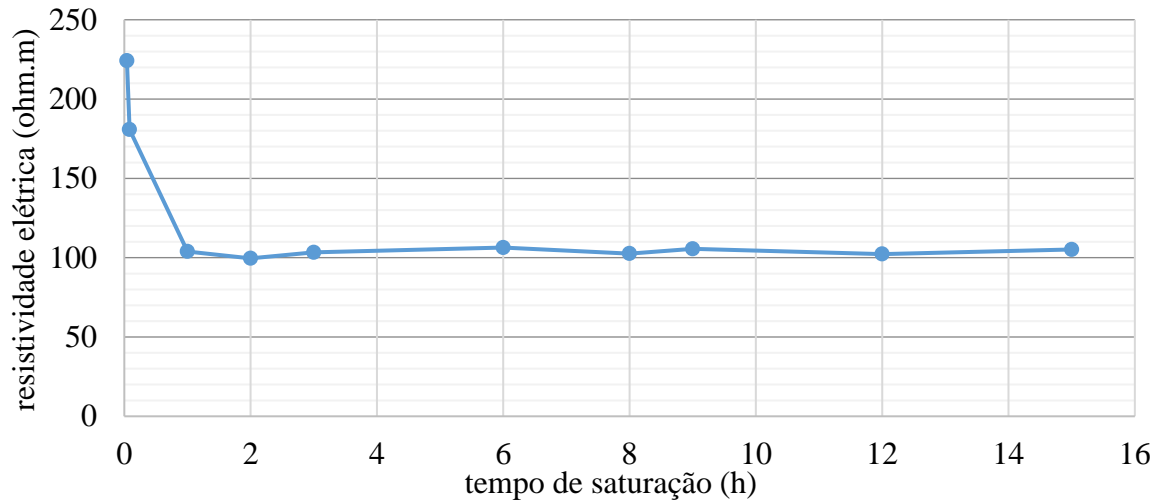


Figura 5. Resultados dos ensaios de resistividade elétrica volumétrica em corpos de prova de imersos em água por tempos distintos.

Inicialmente, a resistividade elétrica diminui com o tempo de saturação, uma vez que a água é condutora e passa a incorporar ao corpo de prova ao ser absorvida pelos poros abertos do concreto. Preenchidos esses poros, a resistividade elétrica se mantém constante, o que ocorre após 2 h de imersão. A norma NBR 9204 (ABNT, 2012) prescreve que a saturação deve ser feita com 48 horas em câmara úmida, período muito superior ao período necessário para saturar pôr do corpo de prova. Dessa forma analisou-se comparativamente a saturação obtida em câmara úmida e com imersão (Figura 6). Observa-se, considerando as imprecisões inerentes às medidas, que com a saturação em câmara úmida a umidade se estabiliza em 11 h e se iguala à obtida com a imersão. Ou seja, a saturação obtida por imersão agiliza a estabilização de resultados, como era de se esperar, devido ao contato direto e uniforme com a água.

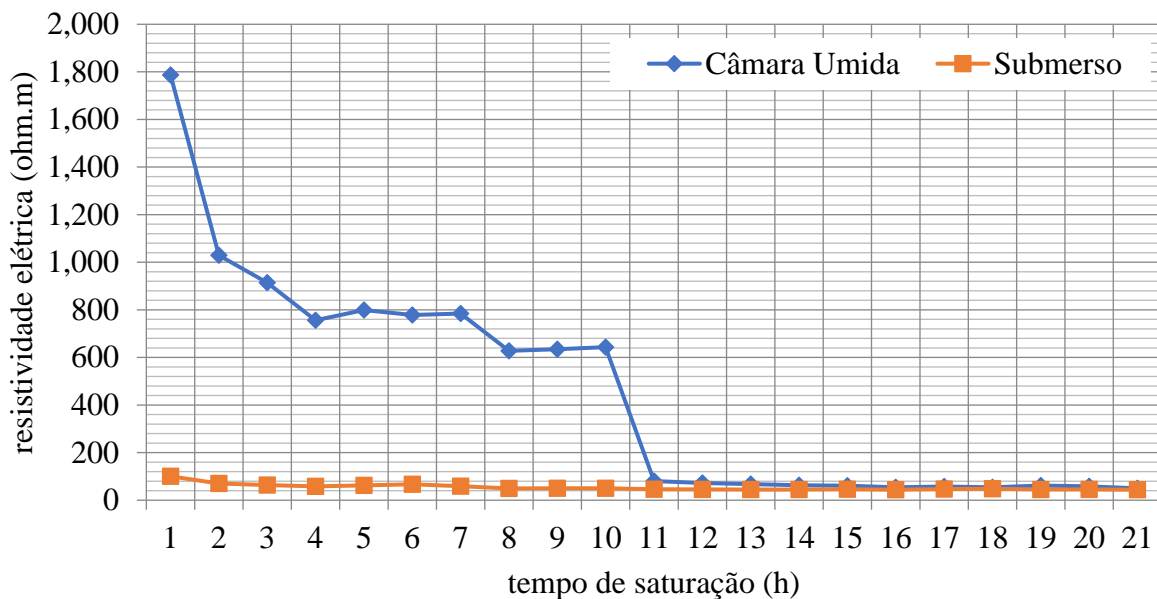


Figura 6. Resultados dos ensaios de resistividade elétrica volumétrica de corpos de prova de compra saturados em câmara úmida e em água.

Em função dos resultados, optou-se por utilizar saturação por imersão por 3h nos demais ensaios, considerando um fator de segurança.

A influência da condutividade elétrica da água utilizada na saturação pode ser analisada com os dados descritos na Figura 7. Os dados foram coletados após o mesmo tempo de cura dos corpos de prova. Os dados indicam, como mostrado por Duarte *et al.* (2015), que a natureza da água influencia nos resultados dos ensaios, pois quanto maior a presença de íons no líquido que satura o concreto, menor será a resistividade elétrica do concreto. A imersão dos corpos de prova em água deionizada, propicia a lixiviação de íons contidos na solução intersticial contida na rede porosa permeável do concreto, contribuindo para o aumento da resistividade. Desta forma, a imersão em água saturada com hidróxido de cálcio, segundo a NBR 1538 (ABNT, 2015), seria mais adequado, pois evitaria a lixiviação de íons da rede porosa do concreto, especialmente os íons de cálcio, mais abundantes na solução intersticial. Os resultados reforçam a importância de controlar a água de saturação para se comparar os dados.

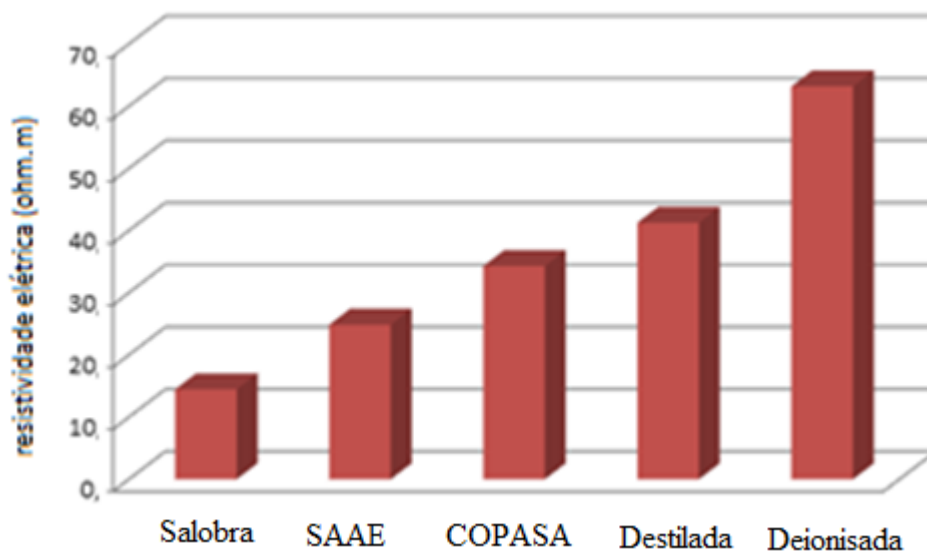


Figura 7. Resultados dos ensaios de resistividade elétrica volumétrica de corpos de prova saturados em águas de diferentes naturezas.

### 3.2.3. Influência da frequência

A Figura 8 ilustra a influência da frequência nos valores de resistividade elétrica de cinco corpos de prova após o mesmo tempo de cura. Observa-se que, para todos os corpos de prova testados, a variação de 10 Hz até 210 Hz (limite do osciloscópio) não influenciou de forma apreciável nos valores de resistividade elétrica obtidos, indicando que a frequência, nessa faixa de valores, não interfere na medição de resistividade elétrica do aparelho.

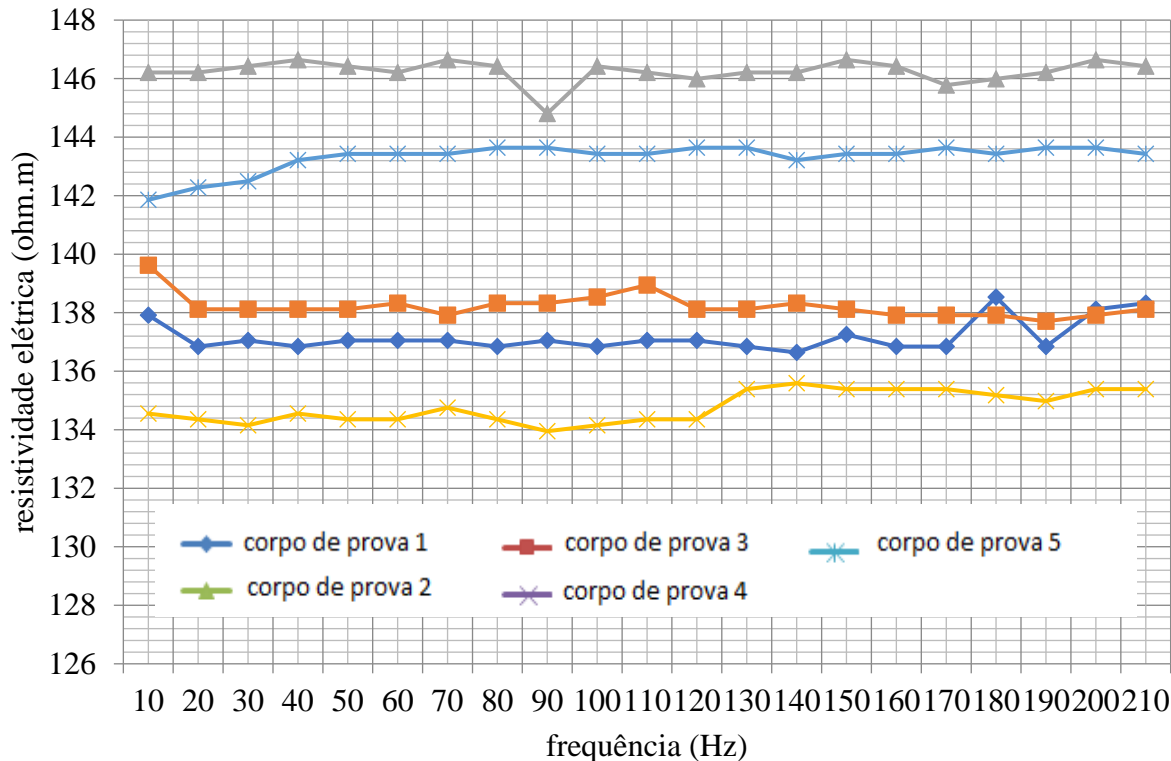


Figura 8. Resultados dos ensaios de resistividade elétrica volumétrica, variando a frequência, de 5 diferentes corpos de prova coletados aleatoriamente no laboratório.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo discutiu a influência de algumas variáveis que poderiam influenciar nos resultados de resistividade elétrica do concreto.

Os resultados indicam que os diferentes materiais de contato estudados, com exceção do grafite, garantem um contato adequado entre os eletrodos e o corpo de prova, sendo a lã de aço a mais indicada pois é um material de fácil acesso e baixo custo, sendo necessário trocar a lã a cada troca de corpo de prova.

A imersão em água por no mínimo 2 horas e em câmara úmida por mais de 11 horas levam à saturação do corpo de prova e garantem a mesma qualidade de medição. No entanto, a saturação por imersão agiliza a obtenção de dados. A imersão em água saturada com hidróxido de cálcio seria a que menos influenciaria nos resultados, uma vez que a solução intersticial contida na rede porosa do concreto está saturada de íons positivos, especialmente os íons cálcio.

Quando se utiliza corrente alternada, o uso de frequências na faixa de 10 Hz até 210 Hz parece não influenciar nos resultados de resistividade elétrica, mantendo-se as demais variáveis constantes.

#### 5. REFERÊNCIA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C215 (2019), Edition, December 1, 2019 - *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*.

AASHTO: TP 95. (2014), *Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's*

*Ability to Resist Chloride Ion Penetration.*

- AGUIAR; Leticia Couto de. (2018), *Os efeitos da variação de temperatura nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto*. Dissertações de Mestrado; Universidade Federal de Minas Gerais.
- ALMEIDA, Silvio Martins de. (2012), *Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante*. UFMG, Belo Horizonte.
- ARAÚJO A. de; PANOSSIAN Z.; OLIV K.r J.; FILHO M. L. P. (2014). *Técnicas de medição da resistividade elétrica em estruturas atmosféricas de concreto convencional*. Técnica Educação, Edição 210.
- ASKLAND, Donald R., FULAY, Pradeep P., WRIGHT, Wendell j. (2006). *The Science and Engineering of Materials*. Ed. Cengage Learning, Sixth edition..
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 5732: *Cimento Portland comum*. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_.NBR 5733. *Cimento Portland com Alta Resistencia Inicial*. Rio de Janeiro, 1990.
- \_\_\_.NBR 5734. *Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico*. Rio de Janeiro, 1989.
- \_\_\_.NBR 5736. *Cimento Portland pozolânico*. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_.NBR 5737. *Cimentos Portland resistentes a sulfatos*. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_.NBR 5738:2015 Versão Corrigida 2016. *Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_.NBR 5739:2007 - *Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007.
- \_\_\_.NBR 6118:2014. *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.
- \_\_\_.NBR 6467 - *Agregados: determinação do inchamento do agregado miúdo, especificação*. Rio de Janeiro, 1987. 5 p.
- \_\_\_.NBR 6502. *Rochas e Solos*. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_.NBR 7211 - *Agregados para concreto, especificação*. Rio de Janeiro, 1982. 9p.
- \_\_\_.NBR 7217 - *Agregado: determinação da composição granulométrica, especificação*. Rio de Janeiro, 1987. 5 p.
- \_\_\_.NBR 7251 - *Agregado em estado solto: determinação da massa unitária, especificação*. Rio de Janeiro, 1982. 3 p.
- \_\_\_.NBR 7810 - *Agregado em estado compactado a seco: determinação da massa unitária, especificação*. Rio de Janeiro, 1982. 3 p.
- \_\_\_.NBR 8953. *Concreto Para Fins Estruturais*. Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_.NBR 9776 - *Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman, especificação*. Rio de Janeiro, 1986. 3 p.
- \_\_\_.NBR 9204/2012. *Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrica-volumétrica — Método de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_.NBR 11578. *Cimento Portland composto*. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_.NBR 12655/2015 – *Concreto de cimento Portland – Preparo controle e recebimento - Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_.NBR 12989. *Cimento Portland Branco*. Rio de Janeiro, 1992.
- \_\_\_.NBR 13116. *Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação*. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_.NBR 15900 2009 - *Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_.NM 248:2001. *Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2001.

- \_\_\_\_NM 26:2000. *Agregados - Amostragem / Agregados*. Rio de Janeiro, 2000.
- DUARTE, Arthur Soares Lamourier ; SILVA, Marina Vasconcelos de Paula e ; Aguilár, Maria Teresa Paulino ; PAULINO, José Osvaldo Saldanha (2015). Determinação Experimental do Valor da Resistividade Elétrica de Amostras de Água Potável. In: XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção (CONPAT 2015).
- FERREIRA, C. R.; TAVERES, S. S.; TEIXEIRA, R. L. P.; GOUVEIA, L. L. de A.; OLIVEIRA; C. A. de S. (2016). *Accelerated corrosion test for the qualitative evaluation of corrosion in concrete*. Revista Construindo, Belo Horizonte, volume 08 número.
- GHOSH, Pratanu, TRAN, Quang. (2015). *Correlation Between Bulk and Surface Resistivity of Concrete*. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. Vol.9, No.1, pp.119–132.
- HALLIDAY, David. (2010). *Fundamentos da Física: Eletromagnetismo*. Editora LTC, 4<sup>o</sup> edição. Rio de Janeiro.
- HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. (2010). *Concreto de Cimento Portland*. São Paulo. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais - IBRACON.
- HOPPE, T. F. (2005). *Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casaca de arroz*. Dissertação de mestrado. Santa Maria - RS.
- ISAIA, G.C (2007). *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. Editora IBRACON. São Paulo: IBRACON, 2 v.
- J. Gudimettla, G. Crawford, *Resistivity tests for concrete-recent field experience*, ACI Mater. J. 113 (2016) 505–512. doi:10.14359/51688830. [15] A.A.
- KAEFER. Luís Fernando. (1998). *A Evolução do Concreto Armado*. São Paulo, PEF 5707 – Conceção, Projeto e Realização das estruturas: aspectos históricos.
- LAGE, E.B.D, SIQUEIRA, P. G. F., MARTINS, P.H.A., AGUILAR, M.T.P., CHAHUD, E. (2017). *Resistividade Volumétrica Do Concreto: Parâmetros Laboratoriais*. Anais do 59<sup>o</sup> Congresso Brasileiro do Concreto.
- LAYSSI, Hamed; GHODS, Pouria; ALIZADEH, Aali R.; SALEHI, Mustafa (2015). *Electrical Resistivity of Concrete Concepts, applications, and measurement techniques*.
- LENCIONI, J. W., LIMA, M. G. (2010). *Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto – Estado-da-Arte*. VI Congresso internacional sobre patologias e reabilitação de estruturas, Sixth edition. Córdoba – Argentina. CINPAR
- LIU, Yanbo, SUAREZ, Andres\*, PRESUEL-MORENO, Francisco J. (2010). *Characterization of New and Old Concrete Structures Using Surface Resistivity Measurements*. Department of Transportation Research. Tallahassee, Florida..
- LÜBECK A. (2008). *Resistividade Elétrica de Concretos de Cimento Portland Branco e Elevados Teores de Escória de Alto Forno*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, p.142.
- MADHAVI, T. Ch., ANNAMALAI, S. (2016). *Electrical conductivity of concrete*. India, ARPN Journals, Ninety edition, vol.11
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. (2008). *Concrete: microstructure and properties*. 3.ed. Usa: McGraw-Hill.
- NEVILLE, Adam M. (2015). *Propriedades do concreto*. São Paulo: Pini, 5<sup>a</sup> edição. 828p
- NOKKEN, M. R., HOOTON, R. D. (2006). *Electrical Conductivity Testing*. Ed. PCA R&D, No. 3002.
- PEREIRA, V. C.de O.; ALMEIDA, K.; MONTEIRO, E. C. B. (2012) . *Avaliação da corrosão em argamassas de cimento portland utilizando a técnica de potencial de corrosão*. Revista Construindo, Belo Horizonte, volume 04 número 01.
- PESSÔA, J. R. de C.; DOMINGUÉZ, J. S.; CARVALHO, G. de; ASSIS, J. T. de. (2014).

- Porosidade do Concreto Determinada por Microtomografia com Raio X e Processamento de Imagem*. Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE, v. 14 - n. 2 - p. 20-26.
- POLDER R. (2000), with contributions from C. Andrade, B. Elsener, Ø. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert and M. Raupac. *Test methods for on site measurement of resistivity of concrete, rilem tc 154-emc: electrochemical techniques for measuring metallic corrosion*. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 33, pp 603-611
- RAMEZANIANPOUR, PILVAR A., MAHDIKHANI M.; MOODI F. (2011), *Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength*, Constr. Build. Mater. 2472–2479. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.
- ROSA, A. R. O.; GONÇALVES, D. K. C.; OLIVEIRA, N. N. C. (2014). *Avaliação da resistência à compressão do concreto usando raios-X*. Revista Construindo, Belo Horizonte, v.6, n. 1, p.19-25.
- ROSA, D. W. de. (2005). *Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de escória de alto forno e ativador químico*. Rio Grande do Sul, Universidade Federal de Santa Maria.
- SALES, R.B.C. (2008) *Estudo de compostos de cimento Portland utilizando o ensaio de frequência ressonante forçada e termografia*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- SANTOS, L. (2006). *Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloreto em estruturas de concreto*. Dissertação de mestrado em estruturas e construção civil. Brasília.
- SILVA, L. M. A. (2016). *Resistividade elétrica superficial do concreto: influência da cura*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Goiás.
- SONG, H., VELU, S. (2007). *Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review*. Int. J. Electrochem. Sci. Páginas 1- 28.
- TORAYA, Juan de las Cuevas (1999). *Un siglo de Cemento en Latinoamérica, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto – IMCYC, Mexico*.